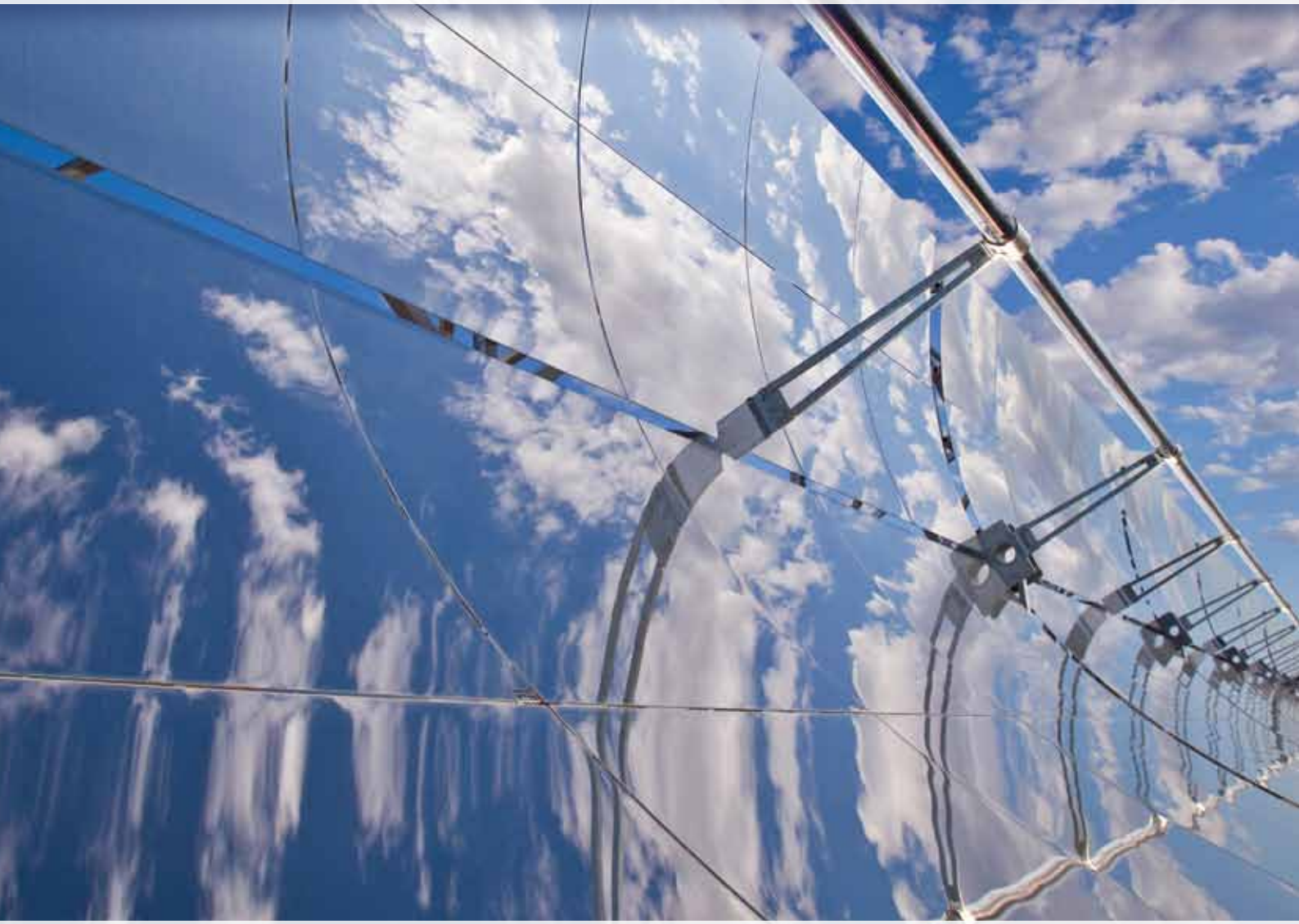
SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE ET ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

RÉSUMÉ À L'INTENTION DES DÉCIDEURS ET RÉSUMÉ TECHNIQUE



RAPPORT SPÉCIAL DU GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

giec

OMM PNUE

Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation du changement climatique

Résumé à l'intention des décideurs

Rapport du Groupe de travail III du GIEC

et

Résumé technique

Rapport accepté par le Groupe de travail III du GIEC

mais non approuvé dans le détail

Publié sous la direction de

Ottmar Edenhofer
Coprésident du Groupe de travail III
Institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique (PIK)

Ramón Pichs-Madruga
Coprésident du Groupe de travail III
Centro de Investigaciones de la Economía Mundial (CIEM)

Youba Sokona
Coprésident du Groupe de travail III
Centre africain de politique climatique
Commission économique pour l'Afrique de l'ONU (CEA)

Kristin Seyboth **Patrick Matschoss** **Susanne Kadner** **Timm Zwickel**

Patrick Eickemeier **Gerrit Hansen** **Steffen Schlömer** **Christoph von Stechow**

Unité d'appui technique du Groupe de travail III
Institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique (PIK)

Publié pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

© 2011, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ISBN 978-92-9169-231-6
Couverture: miroirs paraboliques d'une centrale solaire thermodynamique utilisés pour chauffer un fluide caloporteur.
©Michael Melford/National Geographic Stock

Table des matières

Section I

Avant-propos vii

Préface ix

Section II

Résumé à l'intention des décideurs 3

Résumé technique 27

Annexes

Annexe I Glossaire, abréviations, symboles chimiques et préfixes 161

Annexe II Méthodologie 181

Annexe III Coûts et performances actualisés de l'exploitation des énergies renouvelables 209

I Avant-propos et préface

Avant-propos

Le Rapport spécial du GIEC sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation du changement climatique analyse en détail ces formes d'énergie et les technologies correspondantes, leurs coûts et leurs avantages et le rôle qu'elles pourraient jouer dans le cadre de diverses options d'atténuation.

Pour la première fois, la comptabilisation de l'ensemble des coûts et des émissions de gaz à effet de serre pour un éventail de technologies et de scénarios confirme le rôle clé que les énergies renouvelables sont appelées à jouer, indépendamment de tout accord concret sur l'atténuation du changement climatique.

En tant qu'organisme intergouvernemental établi en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), le GIEC n'a cessé de mettre à la disposition des responsables politiques les évaluations scientifiques et techniques les plus fiables et les plus objectives qui soient. Susceptibles d'orienter les politiques, ces évaluations ne préconisent pas pour autant des choix précis. Le présent rapport revêt une importance particulière à une époque où les gouvernements réfléchissent au rôle des énergies renouvelables dans le contexte de leurs politiques d'atténuation du changement climatique.

Si le présent rapport a pu voir le jour, c'est grâce aux efforts et au dévouement de centaines d'experts représentant diverses régions et disciplines. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs-Madruga et Youba Sokona, qui n'ont pas ménagé leur peine pour mener à bien le processus d'élaboration du rapport spécial, ainsi qu'à tous les auteurs coordonnateurs principaux, auteurs principaux, auteurs collaborateurs, éditeurs-réviseurs et examinateurs et au personnel de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III.

Nous apprécions vivement l'engagement de l'Allemagne et son soutien généreux, comme en témoigne notamment l'hébergement de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III. Nous tenons à remercier les Émirats arabes unis d'avoir accueilli la session plénière du GIEC durant laquelle le rapport a été approuvé, et nous exprimons aussi notre gratitude au Brésil, à la Norvège, au Royaume-Uni et au Mexique, qui ont accueilli les réunions successives des auteurs principaux, à tous ceux qui ont contribué aux travaux du Groupe d'experts par leur soutien financier et logistique et, enfin, au Président du GIEC, R.K. Pachauri, qui a su mener à bonne fin le processus d'élaboration du rapport spécial.



M. Jarraud
Secrétaire général
Organisation météorologique mondiale



A. Steiner
Directeur exécutif
Programme des Nations Unies pour l'environnement

Préface

Le Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation du changement climatique, établi par le Groupe de travail III du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), livre une évaluation et une analyse approfondie des technologies des énergies renouvelables et du rôle qu'elles jouent ou pourraient jouer dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les conclusions présentées ici se fondent sur une évaluation détaillée de la littérature scientifique, y compris certaines études individuelles, mais aussi sur la synthèse de diverses études analysées à des fins plus générales. Le rapport combine les résultats d'études consacrées à des technologies particulières et les résultats de modèles intégrés à grande échelle et fournit aux décideurs des orientations, sans pour autant préconiser des choix précis, sur les caractéristiques et le potentiel technique de différentes familles de ressources. Il porte aussi sur l'historique des technologies considérées, les défis que pose leur adoption ainsi que leur impact socio-environnemental et compare le coût moyen actualisé des technologies des énergies renouvelables disponibles sur le marché aux coûts des énergies non renouvelables tels qu'ils ont été calculés récemment. Par ailleurs, la contribution des énergies renouvelables à la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre, comme il en est fait état dans le présent rapport, ainsi que la présentation et l'analyse des politiques envisagées pour faciliter la mise au point et l'application de technologies appropriées pour l'atténuation du changement climatique et à d'autres fins font partie des points importants que le rapport était censé aborder dès le départ.

Procédure suivie

Le rapport a été établi conformément aux règles et aux procédures fixées par le GIEC et appliquées pour les rapports d'évaluation précédents. Après la tenue à Lübeck, en Allemagne, du 20 au 25 janvier 2008, d'une réunion visant à définir les grandes lignes du rapport, celles-ci ont été approuvées lors de la vingt-huitième session plénière du GIEC, qui s'est déroulée à Budapest, en Hongrie, les 9 et 10 avril 2008. Peu après, une équipe composée de 122 auteurs principaux (33 en provenance de pays en développement, 4 de pays à économie de transition et 85 de pays industrialisés), 25 éditeurs-réviseurs et 132 auteurs collaborateurs était constituée.

Le processus d'examen du GIEC a été appliqué, à savoir que les projets de texte rédigés par les auteurs ont été soumis à deux examens. Un total de 24 766 commentaires émanant de plus de 350 spécialistes, gouvernements et organisations internationales ont été pris en compte. Pour chaque chapitre, les éditeurs-réviseurs ont veillé à ce que tous les commentaires des experts gouvernementaux et des examinateurs soient dûment pris en considération.

Le Résumé à l'intention des décideurs a été approuvé ligne par ligne, et la version définitive du rapport a été acceptée à la onzième session du Groupe de travail III qui s'est tenue à Abu Dhabi, aux Émirats arabes unis, du 5 au 8 mai 2011. Le rapport spécial a été accepté dans sa totalité lors de la trente-troisième session plénière du GIEC organisée elle aussi à Abu Dhabi, du 10 au 13 mai 2011.

Structure du rapport spécial

Le Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation du changement climatique est divisé en trois parties: un chapitre introductif, six chapitres consacrés à des technologies particulières (chapitres 2 à 7) et quatre chapitres portant sur des questions communes aux diverses technologies (chapitres 8 à 11).

Le chapitre 1 est le chapitre d'introduction qui entend replacer les technologies des énergies renouvelables dans le cadre plus général des options d'atténuation du changement climatique et définir les caractéristiques communes à ces technologies.

Chacun des six chapitres suivants (2 à 7) livre des informations sur les ressources potentiellement disponibles, sur l'état du marché et l'évolution technologique et sur les implications sociétales et environnementales de chaque source d'énergie renouvelable, y compris la bioénergie, l'énergie solaire directe, l'énergie géothermique, l'énergie hydraulique, l'énergie marine et l'énergie éolienne. Les perspectives d'innovation technique et de réduction des coûts sont également abordées, et un débat sur l'application potentielle des futures technologies vient clore le chapitre.

Le chapitre 8, premier des chapitres à portée plus générale, porte sur les modalités d'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes de distribution d'énergie existants et à venir. Il aborde aussi la question des modes de développement fondés sur une utilisation stratégique des énergies renouvelables dans les transports, les bâtiments, l'industrie et l'agriculture.

Les énergies renouvelables dans le contexte du développement durable font l'objet du chapitre 9, qui aborde également les implications sociétales, environnementales et économiques de ces formes d'énergie, y compris le potentiel d'amélioration de l'accès à l'énergie et de sécurisation des approvisionnements. Il est aussi question des obstacles techniques à l'exploitation des énergies renouvelables.

Passant en revue plus de 160 scénarios, le chapitre 10 étudie la manière dont les technologies des énergies renouvelables pourraient entrer en ligne de compte dans les divers scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre, qu'il s'agisse des scénarios correspondant à la poursuite inchangée des activités ou de ceux qui reflètent des mesures ambitieuses de stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre. Quatre scénarios sont analysés en détail, et la question du coût d'une mise en valeur généralisée des énergies renouvelables est également abordée.

Dernier chapitre du rapport, le chapitre 11 décrit les tendances actuelles en matière de politiques d'appui aux énergies renouvelables, ainsi que l'évolution des investissements dans les technologies correspondantes. Il passe en revue les politiques mises en oeuvre dans ce domaine, notamment les mesures destinées à accroître l'efficacité et l'efficience, et décrit la mesure dans laquelle un environnement favorable peut contribuer au succès de ces politiques.

Les auteurs du rapport ont puisé dans la littérature la plus récente disponible à l'époque de sa parution, mais le lecteur doit être conscient du fait que les domaines traités ici sont susceptibles d'évoluer rapidement, qu'il s'agisse de certaines technologies afférentes aux énergies renouvelables ou de l'état des connaissances concernant les problèmes d'intégration, les coûts des mesures d'atténuation, les avantages connexes, les incidences environnementales et sociales, les mesures d'intervention ou les options en matière de financement. Les frontières, appellations et désignations figurant sur les cartes géographiques que contient le présent rapport ne signifient pas qu'elles sont reconnues ou acceptées officiellement par les Nations Unies. La ligne en pointillé tracée sur le Jammu-et-Cachemire correspond approximativement à la Ligne de contrôle admise par l'Inde et le Pakistan. Les parties en présence ne se sont pas encore mises d'accord sur le statut définitif du Jammu-et-Cachemire.

Remerciements

La production du présent rapport a constitué une entreprise majeure qui a fait intervenir un grand nombre de personnes du monde entier et suscité des contributions fort diverses. Nous souhaitons remercier à cet égard les gouvernements et les organismes concernés pour leur générosité, qui a permis aux auteurs, aux éditeurs-réviseurs, aux examinateurs et aux experts gouvernementaux de prendre part à ce processus.

Nous sommes particulièrement reconnaissants au Gouvernement allemand et notamment au Ministère fédéral de l'éducation et de la recherche (BMBF) d'avoir soutenu cette entreprise en finançant l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III du GIEC. Chargés de coordonner les opérations de financement, Gregor Laumann et Christiane Textor, du Centre allemand d'aéronautique et d'astronautique (DLR), ont toujours su consacrer à l'ensemble de l'équipe le temps et l'énergie nécessaires. Nous voudrions aussi exprimer notre gratitude au Ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature et de la sécurité nucléaire (BMU). En outre, l'Institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique (PIK) a aimablement accepté d'héberger les bureaux de l'Unité d'appui technique.

Nous tenons beaucoup à remercier les gouvernements brésilien, norvégien, britannique et mexicain qui ont accueilli, en collaboration avec des organismes locaux, les réunions des auteurs principaux respectivement à São José dos Campos (janvier 2009), Oslo (septembre 2009), Oxford (mars 2010) et Mexico (septembre 2010). Nous souhaitons aussi remercier le Gouvernement des États-Unis d'Amérique et l'Institute for Sustainability ainsi que le Founder Society Technologies for Carbon Management Project d'avoir accueilli à Washington, en février 2010, une réunion d'experts consacrée au rapport spécial. Enfin, nous sommes

reconnaissants à l'Institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique d'avoir accueilli dans ses locaux les auteurs coordonnateurs principaux du rapport spécial pour une réunion de clôture (janvier 2011).

Le présent rapport spécial n'a pu voir le jour que grâce à la compétence et au dévouement des auteurs coordonnateurs principaux et des auteurs principaux, qui ont toujours visé l'excellence, aidés en cela par un grand nombre d'auteurs collaborateurs. Nous voulons aussi exprimer notre gratitude aux examinateurs et aux experts gouvernementaux, qui ont consacré beaucoup de temps et d'efforts aux diverses versions du rapport, pour lesquelles ils ont formulé de précieuses observations. Les éditeurs-réviseurs ont joué eux aussi un rôle crucial en aidant l'équipe de rédaction à prendre en compte les commentaires reçus et à traiter objectivement les différentes questions.

C'est avec plaisir que nous rendons hommage aux efforts inlassables déployés par les membres de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III, Patrick Matschoss, Susanne Kadner, Kristin Seyboth, Timm Zwickel, Patrick Eickemeier, Gerrit Hansen, Steffen Schloemer, Christoph von Stechow, Benjamin Kriemann, Annegret Kuhnigk, Anna Adler et Nina Schuetz, qui étaient assistés par Marilyn Anderson, Lelani Arris, Andrew Ayres, Marlen Goerner, Daniel Mahringer et Ashley Renders. En sa qualité de conseillère principale auprès de l'Unité d'appui technique, Brigitte Knopf a fourni en permanence des orientations qui se sont révélées fort utiles. Nous exprimons aussi notre gratitude à Kay Schröder et à son équipe pour les travaux graphiques réalisés à Daily Interactive Digitale Kommunikation, ainsi qu'à Valarie Morris et Arroyo Writing LLC pour la mise en page.

Le Bureau du Groupe de travail III, dont les membres sont Antonina Ivanova Boncheva (Mexique), Carlo Carraro (Italie), Suzana Kahn Ribeiro (Brésil), Jim Skea (Royaume-Uni), Francis Yamba (Zambie), Taha Zatari (Arabie saoudite) et, avant son accession à la vice-présidence du GIEC, Ismail A.R. Elgizouli (Soudan), a secondé sans relâche les coprésidents du Groupe de travail III tout au long de l'élaboration du rapport spécial.

Nous tenons à remercier Renate Christ, Secrétaire du GIEC, et le personnel du Secrétariat, Gaetano Leone, Mary Jean Burer, Sophie Schlingermann, Judith Ewa, Jesbin Baidya, Joëlle Fernandez, Annie Courtin, Laura Biagioni, Amy Smith Aasdam et Rockaya Aidara, qui ont apporté un soutien logistique pour la liaison avec les gouvernements et pour les déplacements des experts provenant de pays en développement et de pays à économie de transition.

Nous exprimons aussi toute notre reconnaissance à Rajendra Pachauri, Président du GIEC, pour son soutien et sa précieuse contribution à l'élaboration du présent rapport.



Ottmar Edenhofer
Coprésident du Groupe
de travail III du GIEC



Ramon Pichs-Madruga
Coprésident du Groupe
de travail III du GIEC



Youba Sokona
Coprésident du Groupe
de travail III du GIEC



Patrick Matshoss
Responsable de l'Unité d'appui
technique du Groupe de travail III
du GIEC



Kristin Seyboth
Scientifique principale au
Groupe de travail III du GIEC
Responsable du rapport spécial

Le présent rapport est dédié à

Wolfram Krewitt, Allemagne
Auteur coordonnateur principal pour le chapitre 8

Wolfram Krewitt est décédé subitement le 8 octobre 2009. Il travaillait au Centre allemand d'aéronautique et d'astronautique (DLR), situé à Stuttgart en Allemagne.

Raymond Wright, Jamaïque
Auteur principal pour le chapitre 10

Raymond Wright est décédé le 7 juillet 2011. Il travaillait à la Petroleum Corporation of Jamaica (PCJ) à Kingston, en Jamaïque.

Wolfram Krewitt a apporté une contribution substantielle au présent rapport, et son projet pour le chapitre 8 (Intégration des énergies renouvelables dans les systèmes énergétiques actuels et futurs) imprègne le texte qui porte sa marque.
Raymond Wright était un membre éminent de l'équipe de rédaction du chapitre 10 (Potentiel et coûts des mesures d'atténuation), dont les points de vue éclairés ont grandement contribué à l'équilibre et à la crédibilité du Rapport spécial. Ces deux auteurs étaient des membres talentueux et dévoués de l'équipe de rédaction du GIEC, et leur disparition représente une lourde perte pour la communauté scientifique internationale, en particulier pour les climatologues et les énergéticiens. Leurs co-auteurs gardent d'eux un souvenir ému.

II Résumés

SPM

Résumé à l'intention des décideurs

Auteurs coordinateurs principaux:
Ottmar Edenhofer (Allemagne), Ramon Pichs-Madruga (Cuba),
Youba Sokona (Éthiopie/Mali) et Kristin Seyboth (Allemagne/États-Unis d'Amérique)

Auteurs principaux:
Dan Arvizu (États-Unis d'Amérique), Thomas Bruckner (Allemagne), John Christensen (Danemark), Helena Chum (États-Unis d'Amérique/Brésil), Jean-Michel Devernay (France), Andre Faaij (Pays-Bas), Manfred Fischedick (Allemagne), Barry Goldstein (Australie), Gerrit Hansen (Allemagne), John Huckerby (Nouvelle-Zélande), Arnulf Jäger-Waldau (Italie/Allemagne), Susanne Kadner (Allemagne), Daniel Kammen (États-Unis d'Amérique), Volker Krey (Autriche/Allemagne), Arun Kumar (Inde), Anthony Lewis (Irlande), Oswaldo Lucon (Brésil), Patrick Matschoss (Allemagne), Lourdes Maurice (États-Unis d'Amérique), Catherine Mitchell (Royaume-Uni), William Moomaw (États-Unis d'Amérique), José Moreira (Brésil), Alain Nadai (France), Lars J. Nilsson (Suède), John Nyboer (Canada), Atiq Rahman (Bangladesh), Jayant Sathaye (États-Unis d'Amérique), Janet Sawin (États-Unis d'Amérique), Roberto Schaeffer (Brésil), Tormod Schei (Norvège), Steffen Schlömer (Allemagne), Ralph Sims (Nouvelle-Zélande), Christoph von Stechow (Allemagne), Aviel Verbruggen (Belgique), Kevin Urama (Kenya/Nigéria), Ryan Wiser (États-Unis d'Amérique), Francis Yamba (Zambie) et Timm Zwickel (Allemagne)

Conseiller spécial:
Jeffrey Logan (États-Unis d'Amérique)

Le présent chapitre doit être cité ainsi:
GIEC, 2011: Résumé à l'intention des décideurs. In: Rapport spécial du GIEC sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation des effets des changements climatiques [sous la direction de O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer et C. von Stechow], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique

Sommaire

1. Introduction 6

2. Énergies renouvelables et changements climatiques 7

3. Technologies et marchés concernant les énergies renouvelables 7

4. Intégration dans les systèmes énergétiques actuels et à venir 15

5. Énergies renouvelables et développement durable 18

6. Potentiel d'atténuation et coûts de l'atténuation 20

7. Politiques, mise en œuvre et financement 24

8. Progrès des connaissances concernant les énergies renouvelables 26

1. Introduction

Le Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation des effets des changements climatiques rédigé par le Groupe de travail III du GIEC présente une évaluation de la documentation concernant les aspects scientifiques, techniques, environnementaux, économiques et sociaux de la contribution de six sources d'énergie renouvelable (ÉR) à l'atténuation des effets des changements climatiques. Ce rapport a pour objet de présenter des informations stratégiques aux gouvernements, processus intergouvernementaux et autre parties intéressées. Le présent Résumé à l'intention des décideurs donne un aperçu du Rapport spécial, dont il résume les principales conclusions.

Le Rapport spécial comprend 11 chapitres. Le chapitre premier établit le contexte propre aux ÉR et aux changements climatiques, les chapitres 2 à 7 donnent des informations sur six technologies concernant les énergies renouvelables (ou technologies ÉR) et les chapitres 8 à 11 portent sur des questions d'intégration (voir la figure SPM.1).

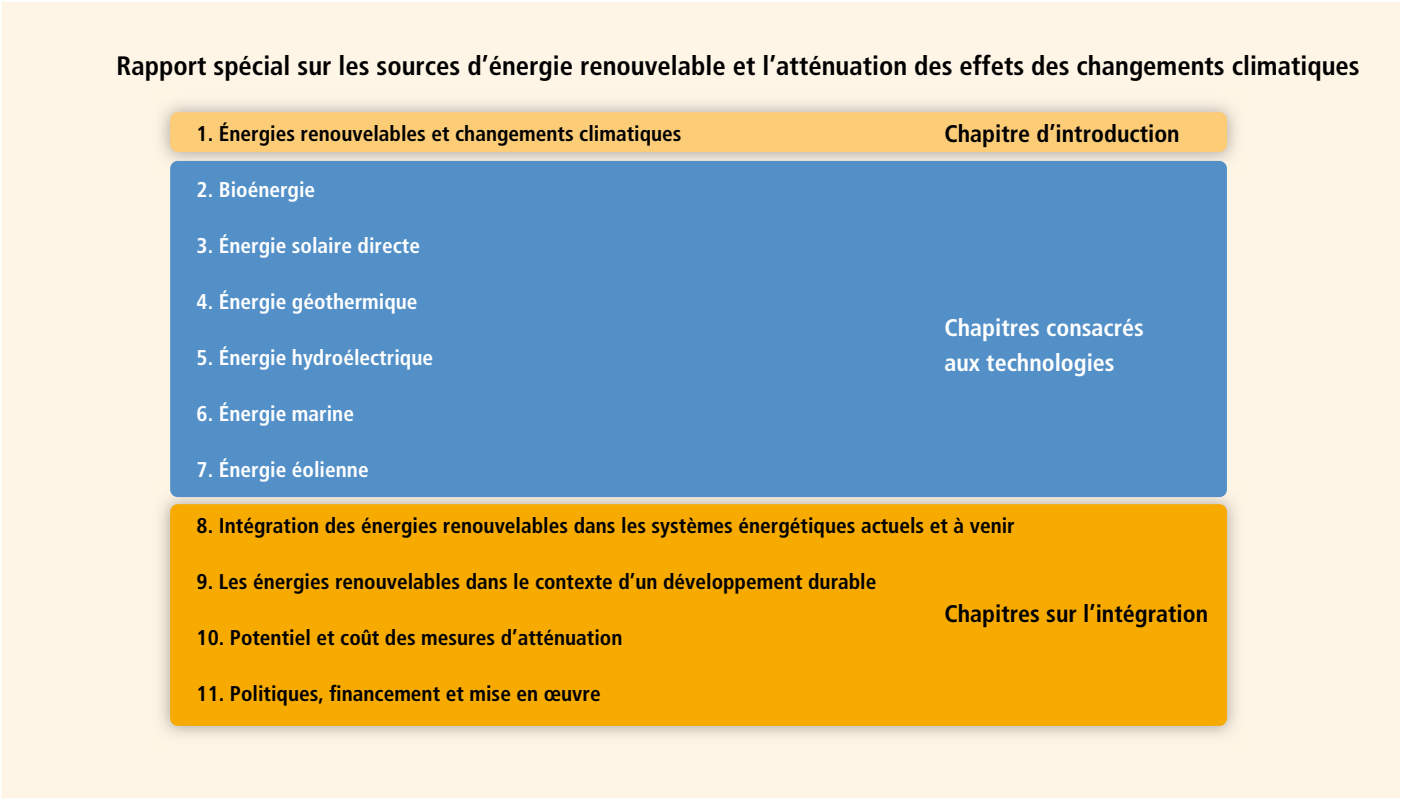


Figure SPM.1 | Structure du Rapport spécial. [Figure 1.1, 1.1.2]

Les références aux chapitres et aux sections sont indiquées par les numéros correspondants des chapitres et sections, mis entre crochets. On trouvera, dans le glossaire du Rapport spécial (annexe I), une explication des termes, abréviations et symboles chimiques utilisés dans le présent résumé. On trouvera, dans les annexes II et III, les conventions et les méthodes permettant de déterminer les coûts, l'énergie primaire et d'autres points à analyser. Le présent rapport rend compte de l'incertitude, le cas échéant[1].

1 Le présent rapport rend compte de l'incertitude, par exemple en montrant les résultats des analyses de sensibilité et en présentant quantitativement les fourchettes des coûts et les fourchettes des résultats de scénarios. On n'y emploie pas la terminologie officielle du GIEC concernant l'incertitude, car, au moment de son approbation, les directives du Groupe d'experts concernant l'incertitude étaient en cours de révision.

2. Énergies renouvelables et changements climatiques

La demande d'énergie et de services connexes pour assurer un développement économique et social et améliorer le bien-être et la santé est à la hausse. Toutes les sociétés ont besoin de services énergétiques pour répondre aux besoins fondamentaux de l'homme (éclairage, cuisson des aliments, confort, mobilité, communications, etc.) et pour favoriser les processus de production. [1.1.1, 9.3.2]. Depuis 1850 environ, l'exploitation mondiale de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) s'est accrue jusqu'à assurer l'essentiel des approvisionnements en énergie, ce qui a entraîné une augmentation rapide des émissions de dioxyde de carbone (CO_2). [Figure 1.6]

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de la prestation de services énergétiques ont nettement contribué à un accroissement historique de la concentration de GES dans l'atmosphère. Dans son quatrième Rapport d'évaluation, le GIEC a conclu que «l'essentiel de l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XX^{e} siècle est très probablement[2] attribuable à l'augmentation observée de la concentration de gaz à effet de serre d'origine humaine».

Des données récentes confirment que la consommation de combustibles fossiles représente la majorité des émissions mondiales de GES d'origine humaine[3]. Les émissions continuent de s'accroître et, fin 2010, la concentration de CO_2 est passée à plus de 390 ppm, soit 39 % de plus que les niveaux préindustriels. [1.1.1, 1.1.3]

Il existe de nombreuses solutions pour réduire les émissions de GES issues du système énergétique tout en répondant à la demande mondiale de services énergétiques. [1.1.3, 10.1] Certaines des solutions envisageables telles que la conservation de l'énergie et l'amélioration du rendement énergétique, le renoncement aux combustibles fossiles, les ÉR, l'énergie nucléaire et le captage et le stockage du carbone (CSC) ont été évaluées dans le quatrième Rapport d'évaluation. Une évaluation globale d'un éventail donné de possibilités d'atténuation supposerait une évaluation de chacune de ces possibilités, de leur apport au développement durable et de tous les risques et coûts associés. [1.1.6] Le présent rapport porte essentiellement sur le rôle que peut jouer la mise en valeur de technologies ÉR au sein d'un tel éventail.

Outre qu'elles recèlent un vaste potentiel d'atténuation des effets des changements climatiques, les ÉR peuvent offrir d'autres avantages. Si elles sont mises en œuvre correctement, elles peuvent contribuer au développement économique et social, à l'accès à l'énergie, à la sûreté des approvisionnements en énergie et à la réduction des incidences négatives sur l'environnement et la santé. [9.2, 9.3]

Dans la plupart des cas, l'augmentation de la part des ÉR dans les sources d'énergie va exiger des politiques destinées à favoriser l'évolution du système énergétique. La mise en place de technologies ÉR s'est nettement accélérée au cours des dernières années, et l'on prévoit que la part qu'elles représentent va augmenter sensiblement dans les scénarios les plus ambitieux concernant l'atténuation. [1.1.5, 10.2] D'autres politiques seraient en outre nécessaires pour stimuler les investissements indispensables dans les technologies et l'infrastructure. [11.4.3, 11.5, 11.6.1, 11.7.5]

3. Technologies et marchés concernant les énergies renouvelables

Les ÉR englobent un ensemble hétérogène de technologies (encadré SPM.1). Les divers types d'ÉR peuvent fournir de l'électricité, de l'énergie thermique ou de l'énergie mécanique et produire des combustibles susceptibles de répondre à de multiples besoins en matière de services énergétiques. [1.2] Certaines technologies ÉR peuvent être mises en place à l'endroit où elles sont utilisées (technologies décentralisées), en milieu rural ou urbain, tandis que d'autres sont employées essentiellement au sein de grands réseaux énergétiques (technologies centralisées). [1.2, 8.2, 8.3, 9.3.2] Bien qu'un nombre croissant de technologies ÉR soient parfaitement au point sur le plan technique et soient appliquées à grande échelle, d'autres en sont à un stade moins avancé de maturité technique et de développement commercial ou occupent des niches du marché spécialisées. [1.2] Le rendement énergétique des technologies ÉR peut être i) variable et imprévisible dans une certaine mesure à diverses échelles temporelles (allant de quelques minutes à plusieurs années), ii) variable mais prévisible, iii) constant ou iv) contrôlable. [8.2, 8.3]

2 Selon la terminologie officielle concernant l'incertitude employée dans le quatrième Rapport d'évaluation, «très probablement» indique une probabilité d'occurrence évaluée à plus de 90 %.

3 En 2004, la part des GES d'origine humaine dans les émissions totales indiquée dans le quatrième Rapport d'évaluation, exprimée en équivalent CO_2, était la suivante: CO_2 émanant de combustibles fossiles (56,6 %), CO_2 émanant du déboisement, de la décomposition de la biomasse, etc. (17,3 %), CO_2 provenant d'autres sources (2,8 %), méthane (14,3 %), oxyde de diazote (7,9 %) et gaz fluorés (1,1 %). [Figure 1.1b, quatrième Rapport d'évaluation, Groupe de travail III, chapitre 1. On trouvera d'autres informations sur les émissions sectorielles, y compris la foresterie, dans la figure 1.3b et les notes en bas de page correspondantes.]

Encadré SPM.1 | Sources d'énergie renouvelable et technologies connexes examinées dans le présent rapport

On peut produire de la **bioénergie** à partir de diverses réserves de biomasse, dont les résidus issus des forêts, de l'agriculture et de l'élevage; de plantations forestières à rotation rapide; de cultures énergétiques; de la fraction organique des déchets urbains solides; et d'autres déchets organiques. Grâce à divers procédés, ces matières premières peuvent être utilisées directement pour produire de l'électricité ou de la chaleur ou indirectement pour obtenir des combustibles gazeux, liquides ou solides. Il existe une vaste gamme de technologies bioénergétiques, plus au moins au point sur le plan technique. On peut prendre comme exemples de technologies disponibles dans le commerce les chaudières de petite ou grande capacité, les systèmes de chauffage domestique à base de granulés et la production d'éthanol à partir de sucre ou d'amidon. Les modernes centrales intégrées gazéification/cycle mixte à biomasse et les carburants à base de lignocellulose sont des exemples de technologies encore au stade précommercial, alors que la production de biocombustibles liquides à partir d'algues et certaines autres techniques de transformation biologique en sont au stade de la recherche-développement. Les technologies bioénergétiques ont des applications dans des cadres centralisés ou décentralisés, l'emploi traditionnel de la biomasse dans les pays en voie de développement étant l'application actuelle la plus répandue[4]. En général, la bioénergie permet une production constante ou contrôlable. Les projets faisant appel à la bioénergie dépendent généralement des disponibilités en combustibles sur le plan local et régional, mais on a pu constater dernièrement que la biomasse solide et les biocombustibles liquides se négociaient de plus en plus sur le plan international. [1.2, 2.1, 2.3, 2.6, 8.2, 8.3]

Les technologies fondées sur l'**énergie solaire directe** permettent de maîtriser l'énergie de l'éclairement énergétique du soleil pour produire de l'électricité grâce au solaire photovoltaïque et au solaire thermodynamique et de l'énergie thermique (chauffage ou refroidissement par des techniques passives ou actives), pour répondre aux besoins en matière d'éclairage direct et, éventuellement, pour produire des combustibles et carburants utilisables pour les transports et à d'autres fins. Le degré de maturité technique des applications solaires va de la recherche-développement (par ex. pour les combustibles produits à partir de l'énergie solaire) à une relative maturité (par ex. pour le solaire thermodynamique) et à une maturité complète (par ex. pour le chauffage solaire passif ou actif et le solaire photovoltaïque à base de plaquettes de silicium). Nombre de techniques – mais pas toutes – sont modulaires, ce qui permet de les utiliser dans des systèmes énergétiques centralisés ou décentralisés. L'énergie solaire est variable et, dans une certaine mesure, imprévisible, bien que, dans certains cas, le profil temporel de son rendement corresponde relativement bien à la demande d'énergie. Le stockage de l'énergie thermique offre la possibilité d'améliorer le contrôle de la production pour certaines technologies telles que le solaire thermodynamique et le chauffage solaire direct. [1.2, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, 8.2, 8.3]

L'**énergie géothermique** fait appel à l'énergie thermique disponible à l'intérieur de la Terre. La chaleur est extraite de réservoirs géothermiques au moyen de puits ou d'autres techniques. Les réservoirs qui sont, à l'état naturel, suffisamment chauds et perméables sont appelés réservoirs hydrothermiques, alors que ceux qui sont suffisamment chauds mais qui nécessitent une stimulation hydraulique sont appelés systèmes géothermiques améliorés. Lorsqu'ils parviennent à la surface du sol, les liquides de température variable peuvent servir à produire de l'électricité ou, plus directement, à des applications qui exigent une énergie thermique, y compris le chauffage urbain ou l'emploi de liquides à température plus basse émanant de puits peu profonds pour faire fonctionner des pompes à chaleur géothermique employées pour le chauffage ou le refroidissement. Les centrales hydrothermiques et les applications thermiques de l'énergie géothermique sont des technologies éprouvées, alors que les projets de systèmes géothermiques améliorés en sont au stade de la démonstration ou des projets pilotes, tout en faisant l'objet d'activités de recherche-développement. Lorsqu'elles servent à produire de l'électricité, les centrales géothermiques offrent en général une production constante. [1.2, 4.1, 4.3, 8.2, 8.3]

L'**énergie hydroélectrique** met à profit l'énergie de l'eau qui se déplace d'un point haut vers un point bas, essentiellement pour produire de l'électricité. Les projets de production d'énergie hydroélectrique englobent des projets de barrages-réservoirs, de centrales d'éclusées ou au fil de l'eau et de centrales dans le courant à toutes les échelles de projet. Cette diversité permet à l'énergie hydroélectrique de répondre aux importants besoins urbains centralisés ainsi qu'aux besoins ruraux décentralisés. Les technologies faisant appel à l'énergie hydroélectrique sont éprouvées. Dans les projets de centrales hydroélectriques, on exploite une ressource qui varie dans le temps. Cependant, la production contrôlable des centrales qui disposent de réservoirs peut être utilisée pour répondre à la demande d'électricité en période de pointe et contribuer ainsi à équilibrer les systèmes d'alimentation électrique fondés pour une bonne part sur une production d'ÉR variable. L'exploitation des réservoirs des centrales hydroélectriques est souvent liée à leurs multiples usages, comme l'alimentation en eau potable, l'irrigation, la maîtrise des crues et des sécheresses et la navigation, en plus de la production d'énergie. [1.2, 5.1, 5.3, 5.5, 5.10, 8.2]

4 La biomasse traditionnelle est définie par l'Agence internationale de l'énergie (AIÉ) comme la consommation de biomasse dans le secteur résidentiel des pays en développement et désigne l'emploi souvent non durable de bois, de charbon de bois, de résidus agricoles et de déjections animales pour la cuisson des aliments et le chauffage. Tous les autres emplois de la biomasse sont définis comme modernes [annexe I].

L'**énergie marine** provient de l'énergie potentielle, cinétique, thermique et chimique de l'eau de mer, qui peut servir à produire de l'électricité, de l'énergie thermique ou de l'eau potable. Des technologies très diverses peuvent être employées, comme les centrales marémotrices, les turbines sous-marines exploitant les marées et les courants océaniques, les échangeurs de chaleur fondés sur la transformation de l'énergie thermique des océans et divers systèmes qui tirent profit de l'énergie des vagues et des gradients de salinité. À l'exception des centrales marémotrices, les technologies océaniques en sont au stade de la démonstration et des projets pilotes, et nombre d'entre elles exigent davantage de recherche-développement. Certaines de ces technologies se caractérisent par une forte variabilité de la production énergétique et des niveaux de prévisibilité (par ex. vagues, amplitude des marées et courants), alors que d'autres sont susceptibles d'être exploitées de façon quasi continue ou même contrôlable (par ex. l'énergie thermique des océans et le gradient de salinité). [1.2, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.6, 8.2]

L'**énergie éolienne** se fonde sur l'énergie cinétique de l'air en mouvement. La principale application en matière d'atténuation des effets des changements climatiques consiste à produire de l'électricité à l'aide de grandes éoliennes implantées sur terre (terrestres) ou en mer ou en eau douce (au large des côtes). Les moyens de production d'énergie éolienne terrestre sont déjà fabriqués et mis en place à grande échelle. Les technologies de production d'énergie éolienne au large des côtes présentent de plus vastes possibilités d'innovation technique permanente. L'électricité produite par le vent est à la fois variable et, dans une certaine mesure, imprévisible, mais l'expérience acquise et diverses études approfondies réalisées dans de nombreuses régions indiquent qu'en général, l'intégration de l'énergie éolienne ne pose pas de problèmes techniques insurmontables. [1.2, 7.1, 7.3, 7.5, 7.7, 8.2]

Sur le plan mondial, on estime qu'en 2008, les ÉR représentaient 12,9 % des 492 exajoules (EJ)[5] correspondant à l'approvisionnement total en énergie primaire (encadré SPM.2 et figure SPM.2). La source la plus importante d'ÉR était la biomasse (10,2 %), dont la plus grande partie (60 % environ) était la biomasse traditionnelle utilisée pour la cuisson des aliments et le chauffage dans les pays en développement, l'usage de la biomasse moderne s'accélérant rapidement[6]. L'énergie hydroélectrique représentait 2,3 %, alors que les autres sources d'ÉR totalisaient 0,4 %. [1.1.5] En 2008 toujours, les ÉR contribuaient pour environ 19 % à la production mondiale d'électricité (16 % pour l'énergie hydroélectrique, 3 % pour les autres ÉR) et les biocarburants, pour 2 % à la production mondiale de carburants pour les transports routiers. La biomasse traditionnelle (17 %), la biomasse moderne (8 %) et l'énergie thermique solaire et géothermique (2 %) permettaient ensemble de répondre à 27 % de la demande mondiale totale en matière de chaleur. Quant à la contribution des ÉR à l'approvisionnement en énergie primaire, elle variait sensiblement selon les pays et les régions. [1.1.5, 1.3.1, 8.1]

La mise en valeur des ÉR s'est accrue rapidement ces dernières années (figure SPM.3). Divers types de politiques gouvernementales, la diminution du coût de nombreuses technologies ÉR, l'évolution du prix des combustibles fossiles, l'augmentation de la demande d'énergie et d'autres facteurs ont favorisé un recours accru aux ÉR. [1.1.5, 9.3, 10.5, 11.2, 11.3] Malgré les incertitudes financières à l'échelle du globe, la capacité en matière d'ÉR a continué de croître rapidement en 2009 par rapport à la puissance installée cumulée de l'année précédente, notamment pour ce qui concerne l'énergie éolienne (augmentation de 32 %, en progression de 38 gigawatts (GW)), l'énergie hydroélectrique (3 %, en progression de 31 GW), l'énergie photovoltaïque raccordée au réseau (53 %, en progression de 7,5 GW), l'énergie géothermique (4 %, en progression de 0,4 GW) et le solaire pour la production d'eau chaude et le chauffage (21 %, en progression de 31 GW). Les biocombustibles ont représenté 2 % de la demande mondiale de carburants pour les transports routiers en 2008 et près de 3 % en 2009. La production annuelle d'éthanol est passée à 1,6 EJ (76 milliards de litres) fin 2009 et la production de biogazole, à 0,6 EJ (17 milliards de litres). [1.1.5, 2.4, 3.4, 4.4, 5.4, 7.4]

Sur les 300 GW environ de capacité supplémentaire de production d'électricité au niveau mondial pendant la période biennale 2008-2009, 140 GW provenaient des ÉR. Collectivement, les pays en développement représentent 53 % de la capacité mondiale de production d'électricité émanant d'ÉR. [1.1.5] Fin 2009, les ÉR utilisées pour la production d'eau chaude et le chauffage incluaient la biomasse moderne (270 GW_{th}), l'énergie solaire (180 GW_{th}) et l'énergie géothermique (60 GW_{th}). L'utilisation d'ÉR décentralisées (à l'exclusion de la biomasse traditionnelle) pour répondre aux besoins en énergie rurale au niveau des ménages ou des villages avait également augmenté grâce notamment à des centrales hydroélectriques, à diverses options fondées sur la biomasse moderne, à l'énergie photovoltaïque, à l'énergie éolienne ou à des systèmes hybrides associant des technologies multiples. [1.1.5, 2.4, 3.4, 4.4, 5.4]

5 1 exajoule = 10^{18} joules = 23,88 millions de tonnes d'équivalent-pétrole (MTép)

6 Outre cette proportion de 60 % de la biomasse traditionnelle, il faudrait aussi tenir compte de l'usage de la biomasse – estimée à 20 à 40 % – non déclarée dans les bases de données officielles sur l'énergie primaire, comme les déjections animales, la production non comptabilisée de charbon de bois, l'exploitation forestière illégale, le ramassage de bois de chauffage et l'utilisation de résidus agricoles. [2.1, 2.5]

Encadré SPM.2 | Méthode de comptabilisation de l'énergie primaire dans le Rapport spécial

Il n'existe pas de moyen clair et exclusif de tenir compte, pour le calcul de l'énergie primaire, de celle issue de sources d'énergie non combustibles telles que les sources d'ÉR non combustibles et l'énergie nucléaire. Dans le Rapport spécial, on a adopté la méthode de l'«équivalent direct» pour évaluer l'approvisionnement en énergie primaire. D'après cette méthode, les combustibles fossiles et la bioénergie sont pris en compte selon leur pouvoir calorifique, alors que les sources d'énergie non combustibles, y compris l'énergie nucléaire et l'ensemble des ÉR non combustibles, sont comptabilisées selon l'énergie secondaire qu'elles produisent. Cela peut conduire à sous-estimer la contribution des ÉR non combustibles et de l'énergie nucléaire par rapport à la bioénergie et aux combustibles fossiles d'un facteur de l'ordre de 1,2 à 3. Le choix de la méthode de calcul se répercute aussi sur la part relative des diverses sources d'énergie. Les comparaisons de données et de chiffres présentées dans le Rapport spécial entre combustibles fossiles et bioénergie d'une part et ÉR et énergie nucléaire de l'autre reflètent cette méthode de calcul. [1.1.9, annexe II.4]

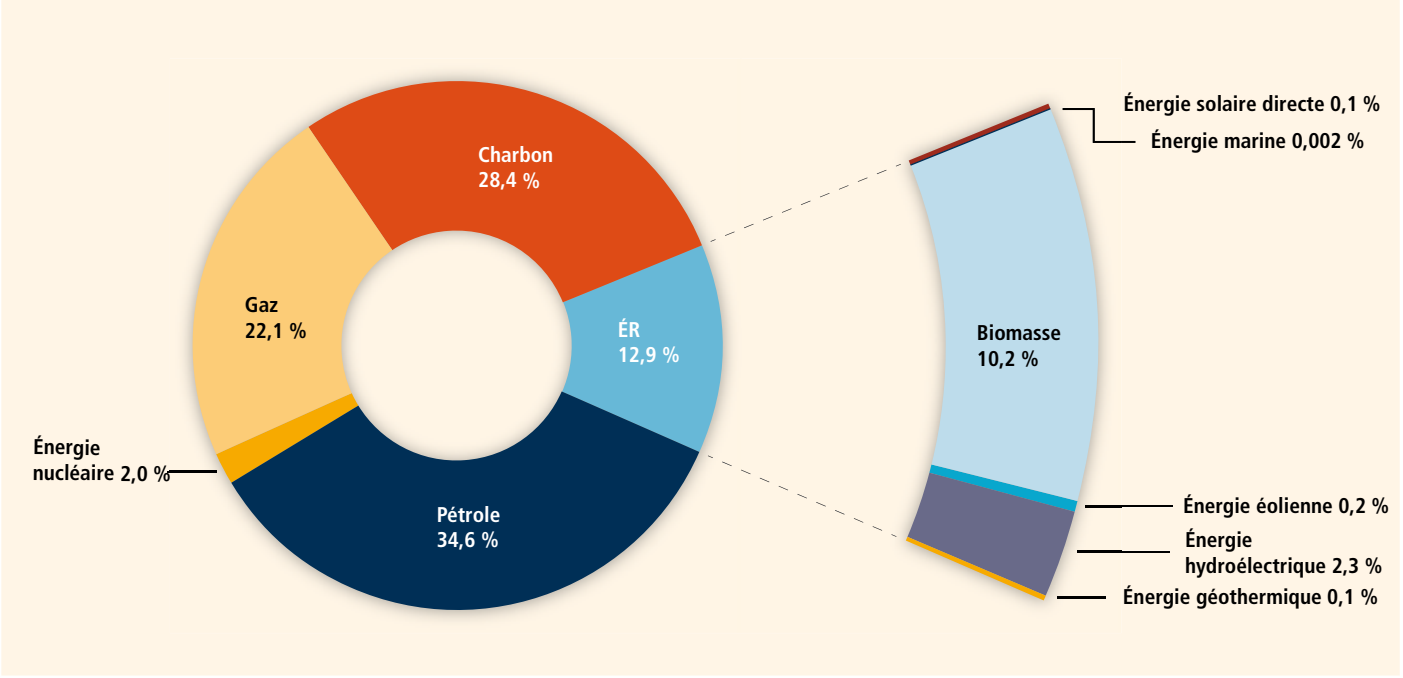


Figure SPM.2 | Proportion des diverses sources d'énergie dans l'approvisionnement mondial total en énergie primaire en 2008 (492 EJ). La biomasse moderne représente 38 % de la part totale de la biomasse. [Figure 1.10, 1.1.5]

Note: Les données retenues pour cette figure ont été converties selon la méthode de l'«équivalent direct» pour le calcul de l'approvisionnement en énergie primaire. [Encadré SPM.2, 1.1.9, annexe II.4]

Le potentiel technique mondial[7] des sources d'ÉR ne va pas limiter l'augmentation continue de l'emploi d'ÉR. La documentation présente un large éventail d'estimations, mais, d'après les études réalisées, on a constaté régulièrement que le potentiel technique mondial total des ÉR était sensiblement plus élevé que la demande mondiale d'énergie (figure SPM.4). [1.2.2, 10.3, annexe II] Le potentiel technique de l'énergie solaire est le plus élevé parmi les sources d'ÉR, mais il existe un potentiel technique important pour les six sources d'ÉR. Même dans les régions disposant d'un potentiel technique relativement faible pour toutes les sources d'ÉR, on trouve généralement de vastes possibilités pour une mise en valeur accrue par rapport aux niveaux actuels. [1.2.2, 2.2, 2.8, 3.2, 4.2, 5.2, 6.2, 6.4, 7.2, 8.2, 8.3, 10.3] À long terme et à un niveau supérieur de mise en application, les potentiels techniques semblent cependant indiquer une limite de l'apport de certaines technologies ÉR. Des facteurs tels que les préoccupations concernant la pérennité [9.3], l'acceptation par le public [9.5], l'intégration des systèmes et les contraintes en matière d'infrastructure [8.2] ou les facteurs économiques [10.3] peuvent également limiter la mise en valeur des technologies ÉR.

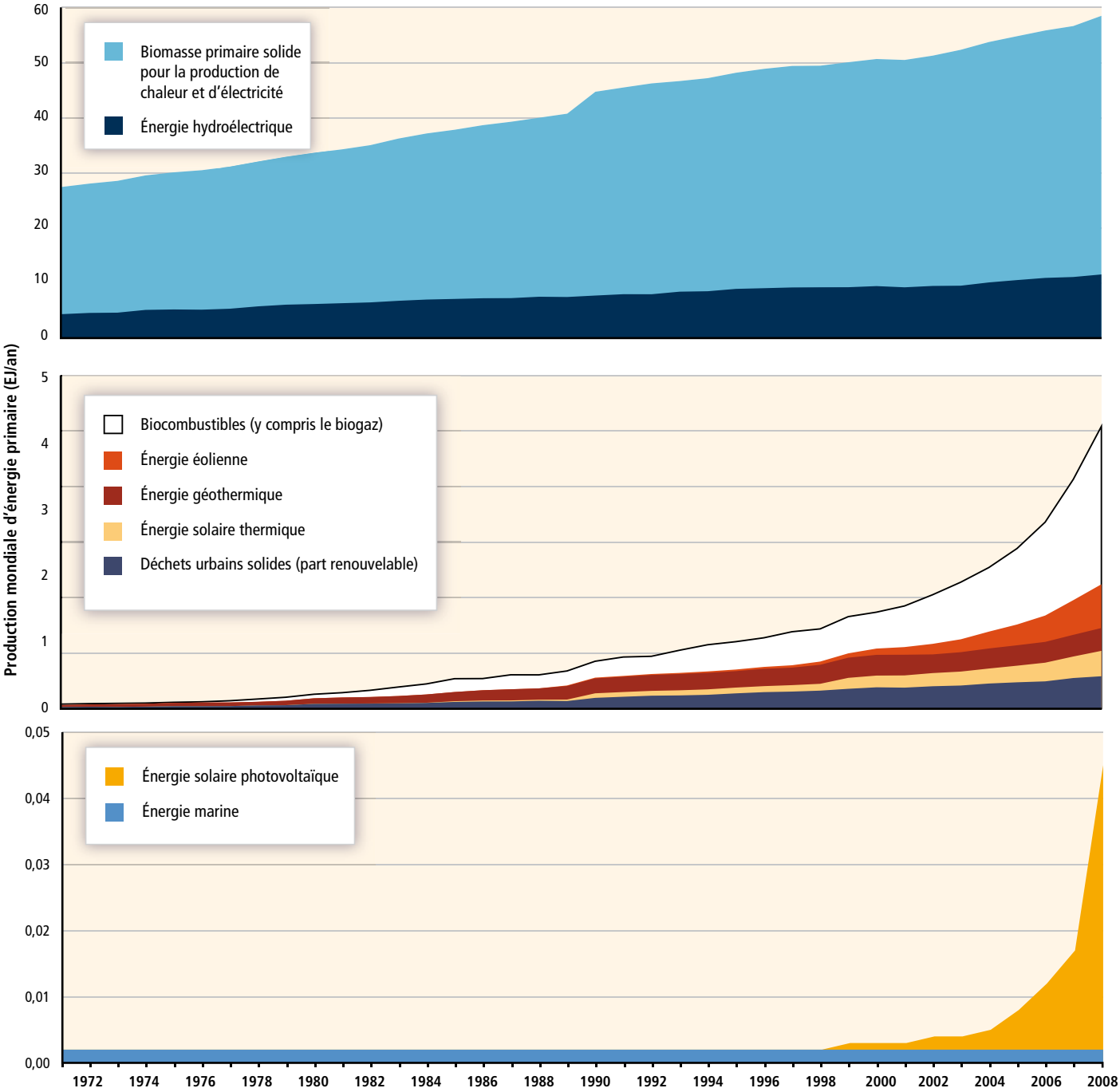


Figure SPM.3 | Évolution historique de l'approvisionnement mondial en énergie primaire émanant de sources d'énergie renouvelable de 1971 à 2008. [Figure 1.12, 1.1.5]

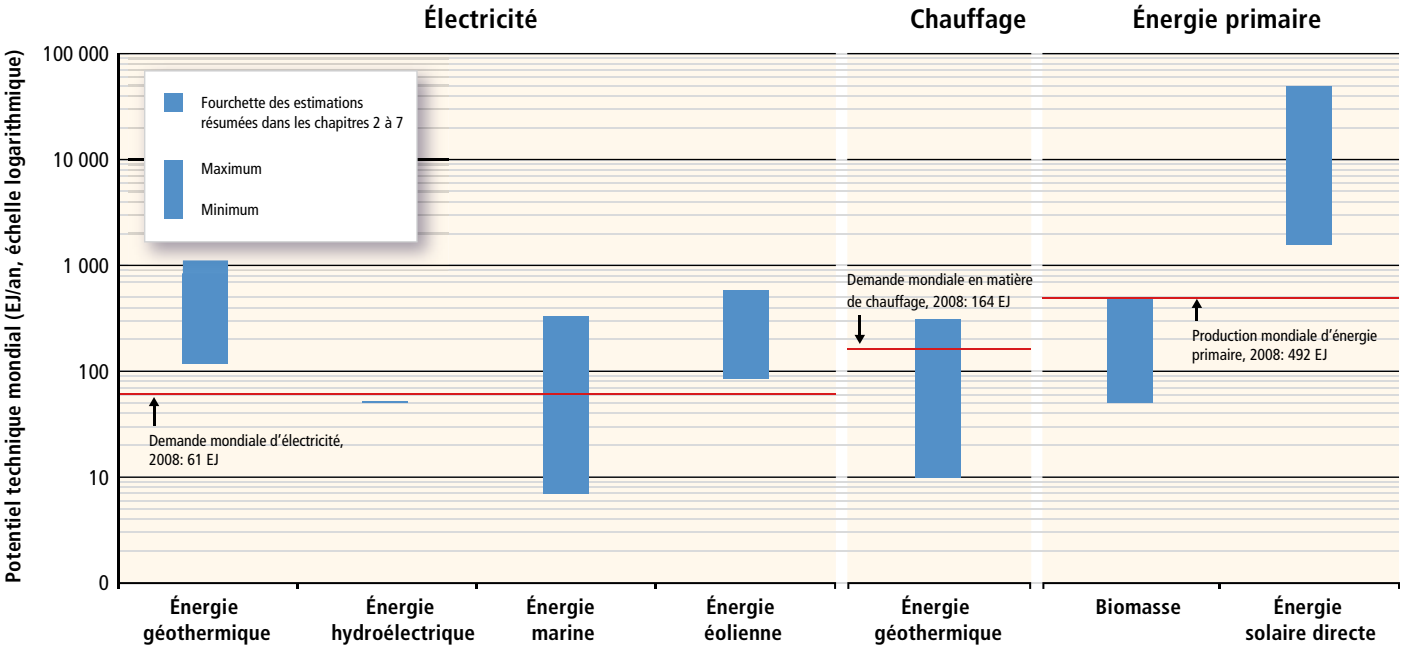
Note: Les technologies renvoient à des unités verticales distinctes aux fins de présentation uniquement. Les données sous-jacentes à la figure ont été converties selon la méthode de l'«équivalent direct» pour calculer l'approvisionnement en énergie primaire [encadré SPM.2, 1.1.9, annexe II.4], sauf que le contenu énergétique des biocombustibles est indiqué selon l'énergie secondaire produite (la biomasse primaire utilisée pour produire des biocombustibles étant plus élevée en raison de pertes lors de la conversion). [2.3, 2.4]

Les changements climatiques vont se répercuter sur l'ampleur et la répartition géographique du potentiel technique des sources d'ÉR, mais les recherches sur l'importance de ces effets possibles en sont à leurs débuts. Du fait que, dans de nombreux cas, les sources d'ÉR dépendent du climat, l'évolution mondiale de ce dernier va influer sur la base de ressources énergétiques renouvelables, malgré les incertitudes concernant la nature et l'importance précises de ces répercussions. À l'avenir, le potentiel technique de la bioénergie pourrait subir l'influence de l'évolution du climat en raison d'incidences sur la production de biomasse telles que l'altération de l'état des sols, les précipitations, la productivité des cultures et d'autres facteurs. L'impact global d'une élévation moyenne mondiale de la

température de moins de 2 °C sur le potentiel technique de la bioénergie devrait être relativement faible à l'échelle planétaire. Toutefois, on peut s'attendre à des différences considérables selon les régions, et les incertitudes sont plus importantes et plus difficiles à évaluer que pour d'autres technologies ÉR en raison du grand nombre de mécanismes de rétroaction à prendre en compte. [2.2, 2.6] Pour ce qui est de l'énergie solaire, même si les changements climatiques devraient influer sur la répartition et la variabilité de la nébulosité, on s'attend à de faibles répercussions de ces changements sur le potentiel technique global. [3.2] Pour l'énergie hydroélectrique, on prévoit que les incidences globales sur le potentiel technique mondial seront légèrement positives. Cependant, les résultats indiquent qu'il pourrait y avoir des variations sensibles selon les régions et même à l'intérieur des pays. [5.2] Selon les recherches effectuées à ce jour, l'évolution du climat ne devrait pas avoir une incidence marquée sur le potentiel technique mondial de l'énergie éolienne, mais on peut s'attendre à des fluctuations de la répartition régionale des ressources liées à cette énergie. [7.2] Enfin, les changements climatiques ne devraient pas avoir de répercussions notables sur l'importance ou la répartition géographique des ressources en matière d'énergie géothermique ou marine. [4.2, 6.2]

À ce jour, le coût moyen actualisé de l'énergie[8] pour de nombreuses technologies ÉR est plus élevé que le prix actuel de l'énergie, bien que dans de nombreux cas, les ÉR soient déjà compétitives sur le plan économique. Les fourchettes des coûts moyens actualisés récents de l'énergie correspondant à certaines technologies ÉR disponibles dans le commerce sont larges et dépendent de divers facteurs, dont les caractéristiques de ces technologies, les variations régionales des coûts et des performances et les différences entre les taux d'actualisation (figure SPM.5). [1.3.2, 2.3, 2.7, 3.8, 4.8, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5, annexe III] Certaines technologies ÉR sont tout à fait compétitives par rapport aux prix actuels de l'énergie sur le marché. Nombre des autres technologies ÉR

8 Le coût moyen actualisé de l'énergie représente le coût d'un système de production d'énergie pendant sa durée de vie utile. On le calcule en déterminant le prix unitaire auquel l'énergie doit être produite à partir d'une source donnée pendant sa durée de vie utile pour qu'on atteigne le seuil de rentabilité. Ce coût inclut généralement l'ensemble des coûts privés qui s'accumulent en amont dans la chaîne de valeur, mais ne prend pas en compte le coût en aval de livraison au client final, le coût d'intégration et les coûts externes, environnementaux ou autres. Les subventions, les primes et les aides fiscales ne sont pas incluses elles non plus.



Fourchette des estimations des potentiels techniques mondiaux

	Énergie géothermique	Énergie hydroélectrique	Énergie marine	Énergie éolienne	Énergie géothermique	Biomasse	Énergie solaire directe
Max. (EJ/an)	1 109	52	331	580	312	500	49 837
Min. (EJ/an)	118	50	7	85	10	50	1 575

Figure SPM.4 | Fourchettes des potentiels techniques mondiaux des sources d'ÉR selon les études présentées dans les chapitres 2 à 7. La biomasse et l'énergie solaire sont classées parmi les énergies primaires en raison de leurs usages multiples. On notera que la figure est présentée à l'échelle logarithmique en raison de l'écart important des données évaluées. [Figure 1.17, 1.2.3]

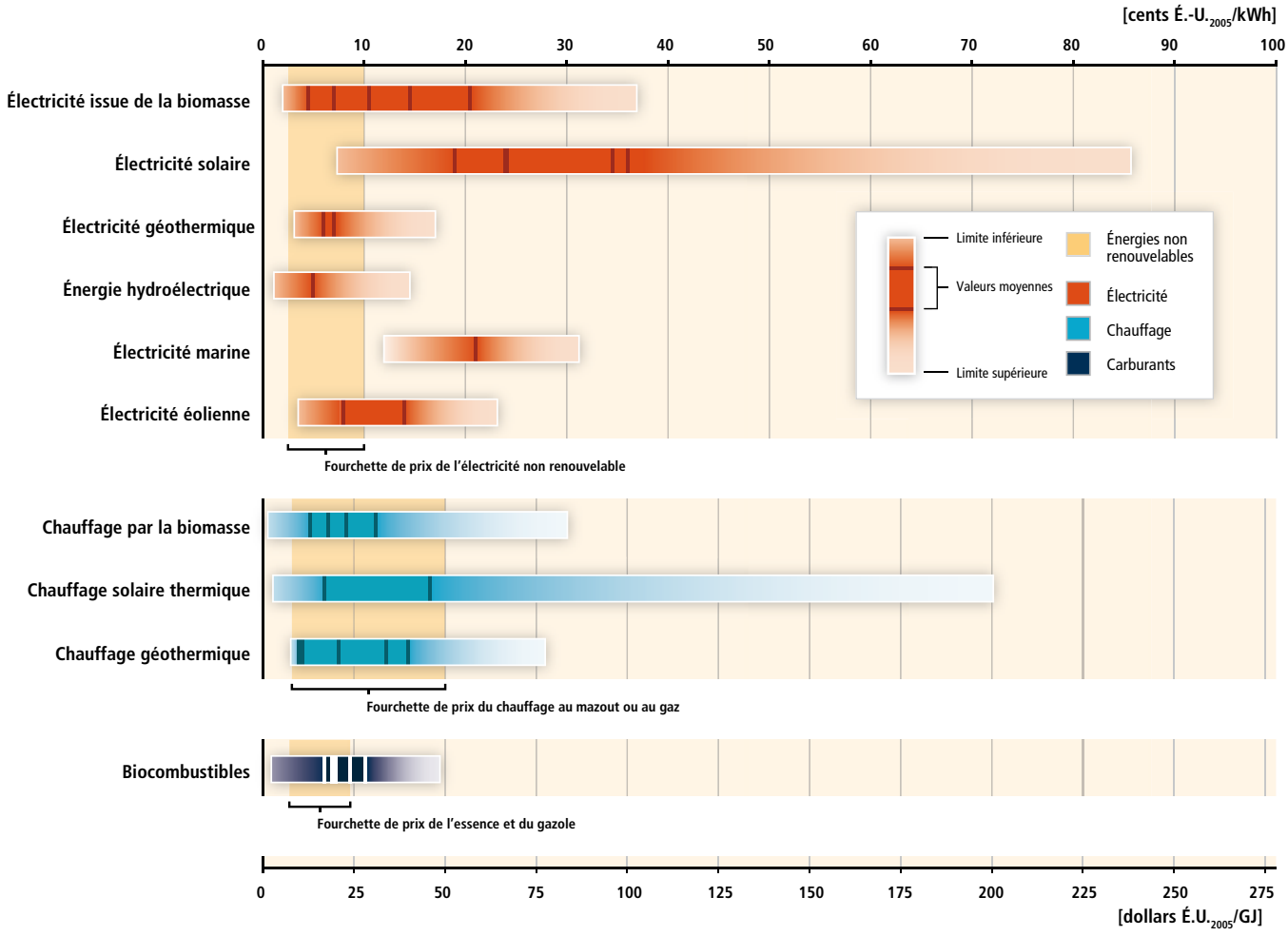
Note: Les potentiels techniques évoqués ici représentent les potentiels mondiaux totaux de la production annuelle d'ÉR. On n'en déduit aucun potentiel déjà comptabilisé. On notera que les sources d'électricité renouvelable peuvent également être utilisées pour le chauffage, alors que la biomasse et les ressources solaires ne sont classées que parmi les énergies primaires, mais peuvent être utilisées pour répondre à divers besoins en matière de services énergétiques. Les fourchettes, déterminées selon différentes méthodes, s'appliquent à diverses années à venir. C'est pourquoi elles ne sont pas strictement comparables selon les technologies. Pour les données de la figure SPM.4 et autres notes supplémentaires pertinentes, voir le chapitre 1, annexe, tableau A.1.1 (ainsi que les chapitres sous-jacents).

peuvent assurer la prestation de services énergétiques concurrentiels dans certaines circonstances, par exemple dans des régions où la situation en matière de ressources se révèle favorable ou qui ne disposent pas de l'infrastructure voulue pour assurer un approvisionnement en énergie à partir d'autres sources à faible prix. Dans la plupart des régions du monde, des mesures de politique générale sont toujours nécessaires pour la mise en valeur rapide de nombreuses sources d'ÉR. [2.3, 2.7, 3.8, 4.7, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5]

En monétisant les coûts externes de l'approvisionnement en énergie, on améliorerait la compétitivité relative des ÉR. Il en irait de même si les prix du marché augmentaient pour d'autres motifs (figure SPM.5). [10.6] Le coût moyen actualisé de l'énergie pour une technologie donnée n'est pas le seul facteur déterminant de sa valeur ou de sa compétitivité économique. L'intérêt d'une forme donnée d'approvisionnement en énergie dépend également d'aspects économiques, environnementaux et sociaux plus vastes ainsi que de la contribution que cette technologie apporte à la prestation de certains services énergétiques (par ex. la demande d'électricité en période de pointe) ou impose sous forme de frais accessoires pour le système énergétique considéré (par ex. le coût d'intégration). [8.2, 9.3, 10.6]

Le coût de la plupart des technologies ÉR a baissé, et d'autres progrès techniques attendus devraient entraîner de nouvelles baisses. Des progrès sensibles des technologies ÉR et une baisse correspondante des prix sur le long terme ont eu lieu depuis quelques dizaines d'années, bien qu'on ait parfois observé des périodes de hausse des prix (par exemple en raison d'une augmentation de la demande d'ÉR, qui a dépassé l'offre) (figure SPM.6). On ne comprend pas toujours parfaitement le rôle des divers facteurs concernés (comme la recherche-développement, les économies d'échelle, l'apprentissage axé sur la mise en valeur ou la concurrence accrue des fournisseurs d'ÉR sur les marchés). [2.7, 3.8, 7.8, 10.5] On s'attend à d'autres baisses des prix, qui amélioreront les possibilités de mise en valeur de ces technologies et qui favoriseront par conséquent l'atténuation des effets des changements climatiques. Voici quelques exemples de domaines importants où des progrès techniques sont possibles: mise au point de nouveaux systèmes de production et de fourniture de matières premières ou amélioration des systèmes existants ; production de biocombustibles par de nouveaux procédés (permettant d'obtenir ce qu'on appelle des biocombustibles avancés ou de nouvelle génération, comme les biocombustibles lignocellulosiques) et par un bioraffinage avancé [2.6]; technologies et processus de production avancés pour ce qui concerne le solaire photovoltaïque et thermodynamique [3.7]; systèmes géothermiques perfectionnés [4.6]; multiples technologies marines nouvelles [6.6]; conception des fondations et des turbines pour l'énergie éolienne au large des côtes. [7.7] Les nouvelles réductions des coûts de l'énergie hydroélectrique devraient être moins importantes que pour certaines des autres technologies ÉR, mais il existe des possibilités de recherche-développement pour rendre les projets hydroélectriques réalisables sur le plan technique à des endroits plus divers et pour améliorer les performances techniques des projets actuels et nouveaux. [5.3, 5.7, 5.8]

Divers problèmes propres aux technologies (en plus du coût) devront sans doute être résolus pour que les ÉR puissent contribuer davantage à la réduction des émissions de GES. Dans la perspective d'une utilisation accrue et durable de la bioénergie, une approche appropriée de la conception, de la mise en œuvre et du contrôle des facteurs de durabilité peut réduire au minimum les incidences négatives et maximiser les avantages sur le plan économique, social et environnemental. [SPM.5, 2.2, 2.5, 2.8] Des obstacles réglementaires et institutionnels peuvent entraver la mise en valeur de l'énergie solaire, tout comme diverses questions d'intégration et de transport [3.9]. Dans le cas de l'énergie géothermique, il importe de démontrer que des systèmes géothermiques améliorés peuvent être mis en place de façon économique et durable et à grande échelle. [4.5, 4.6, 4.7, 4.8] De nouveaux projets faisant appel à l'énergie hydroélectrique peuvent avoir des répercussions écologiques et sociales qui varient considérablement selon les emplacements concernés, et une mise en valeur accrue de cette forme d'énergie peut exiger de meilleurs outils d'évaluation de la durabilité de ces projets ainsi qu'une collaboration régionale et multipartite pour répondre aux besoins en matière d'énergie et d'eau. [5.6, 5.9, 5.10] La mise en valeur de l'énergie marine pourrait bénéficier des travaux de centres d'essais pour des projets de démonstration ainsi que de l'adoption de politiques et de réglementations visant spécifiquement à favoriser un déploiement rapide. [6.4] Dans le cas de l'énergie éolienne, il serait bon d'apporter des réponses techniques et institutionnelles aux problèmes de transport et d'intégration opérationnelle et de faire évoluer l'opinion publique sur un certain nombre de questions concernant essentiellement les incidences sur le paysage. [7.5, 7.6, 7.9]



Note: Les valeurs moyennes sont indiquées pour les sous-catégories suivantes, présentées dans l'ordre où apparaissent dans les fourchettes correspondantes (de gauche à droite):

Électricité	Chauffage	Carburants
Biomasse: 1. Cocombustion 2. Production combinée à petite échelle de chaleur et d'électricité (moteur à combustion interne alimenté par gazéification) 3. Chargeur direct spécialisé et production combinée 4. Production combinée à petite échelle de chaleur et d'électricité (turbine à vapeur) 5. Production combinée à petite échelle de chaleur et d'électricité (cycle organique de Rankine) **Électricité solaire:** 1. Solaire thermodynamique 2. Système photovoltaïque à fins commerciales (un seul axe et panneaux fixes) 3. Système photovoltaïque commercial pour toiture 4. Système photovoltaïque résidentiel pour toiture **Électricité géothermique:** 1. Centrale flash à condensation 2. Centrale à cycle binaire **Énergie hydro-électrique:** 1. Tous types **Électricité marine:** 1. Usine marémotrice **Électricité éolienne:** 1. Terrestre 2. Au large des côtes	**Chauffage par la biomasse:** 1. Production combinée de chaleur et d'électricité à partir de déchets urbains solides 2. Production combinée de chaleur et d'électricité par digestion anaérobie 3. Production combinée de chaleur et d'électricité par turbine à vapeur 4. Système de chauffage par granulés **Chauffage solaire thermique:** 1. Systèmes de production d'eau chaude dans les foyers chinois 2. Chauffage de l'eau et des espaces **Chauffage géothermique:** 1. Serres 2. Bassins d'aquaculture non couverts 3. Chauffage urbain 4. Pompes à chaleur géothermiques 5. Chauffage géothermique d'immeubles	**Biocarburants:** 1. Éthanol de maïs 2. Biogazole de soja 3. Éthanol de blé 4. Éthanol de canne à sucre 5. Biogazole d'huile de palme

La limite supérieure du coût moyen actualisé de l'énergie pour chaque technologie ÉR est fondée sur une combinaison des valeurs d'entrée les plus favorables, alors que la limite inférieure est fondée sur une combinaison des valeurs d'entrée les moins favorables. Les fourchettes de référence présentées à l'arrière-plan de la figure pour les sources d'électricité non renouvelable indiquent le coût moyen actualisé de la production centralisée d'électricité non renouvelable. Les fourchettes de référence pour le chauffage correspondent aux technologies de production de chaleur selon les prix récemment déterminés du pétrole et du gaz. Les fourchettes de référence pour les carburants sont fondées sur le prix au comptant récemment déterminé du pétrole brut, qui s'établit entre 40 et 130 dollars É.-U. le baril, et sur le prix hors taxes correspondant du gazole et de l'essence.

Figure SPM.5 | Fourchette des prix actualisés de l'énergie déterminés récemment pour certaines technologies ÉR disponibles dans le commerce par rapport aux prix des énergies non renouvelables déterminés récemment. Les sous-catégories de technologies et les taux d'actualisation ont été regroupés pour cette figure. On trouvera des figures connexes avec moins de regroupements ou sans regroupement dans [1.3.2, 10.5, annexe III].

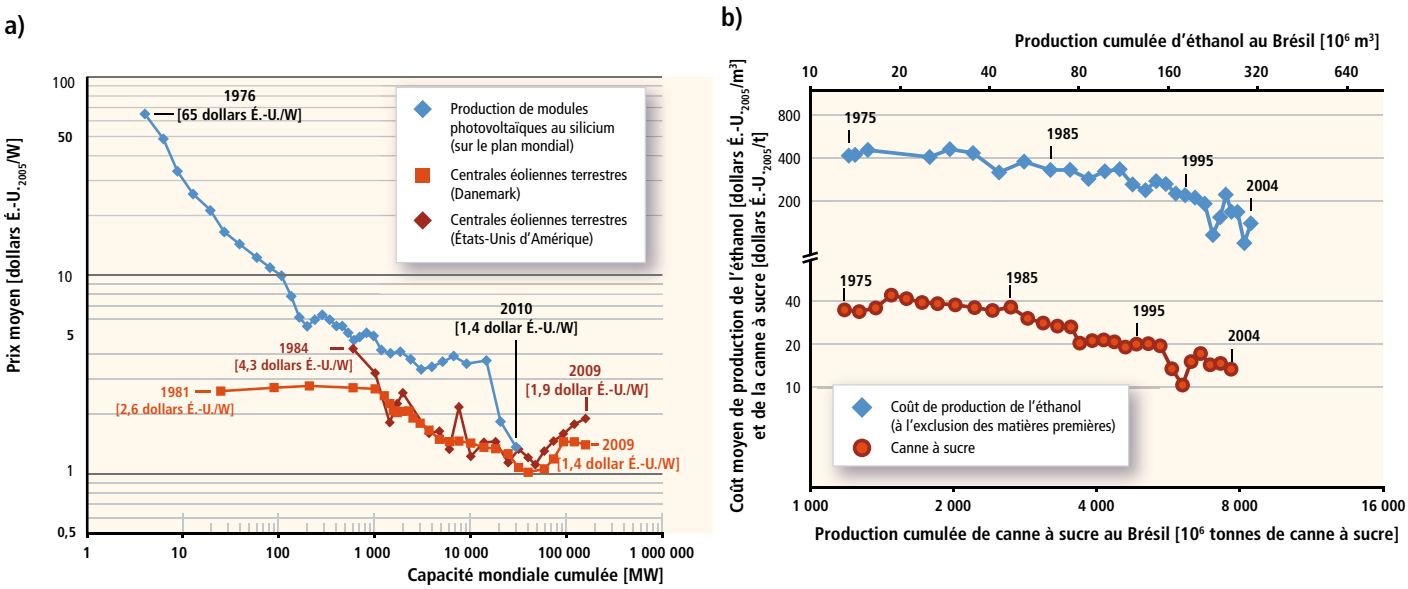


Figure SPM.6 | Courbes d'expérience sélectionnées à l'échelle logarithmique concernant a) le prix des modules photovoltaïques au silicium et des centrales éoliennes terrestres par unité de puissance et b) le coût de production de l'éthanol à partir de la canne à sucre [d'après figure 3.17, 3.8.3, figure 7.20, 7.8.2, figure 2.21, 2.7.2].

Note: Des baisses de prix peuvent se produire à diverses échelles géographiques selon l'endroit. Les exemples de portée nationale présentés ici sont tirés de la documentation publiée. Aucun jeu de données mondial sur le prix ou le coût des centrales éoliennes n'est disponible. La baisse du coût ou du prix d'une technologie par unité de puissance sous-estime les réductions du coût moyen actualisé de l'énergie pour cette technologie lorsque les performances s'améliorent. [7.8.4, 10.5]

4. Intégration dans les systèmes énergétiques actuels et à venir

Diverses ressources énergétiques renouvelables sont déjà intégrées avec succès dans les systèmes d'approvisionnement en énergie [8.2] et dans les secteurs d'utilisation finale [8.3]. (Figure SPM.7)

Les caractéristiques des diverses sources d'ÉR peuvent influer sur l'échelle des modes d'intégration. Certaines ressources énergétiques renouvelables ont une vaste répartition géographique. D'autres, comme l'énergie hydroélectrique à grande échelle, peuvent être plus centralisées, mais leurs possibilités d'intégration sont limitées par leur situation géographique. Certaines de ces ressources sont variables, et leur prévisibilité est limitée. Quelques-unes ont une densité énergétique plus faible que celle des combustibles fossiles et des spécifications techniques différentes. Ces caractéristiques peuvent limiter le processus d'intégration et impliquent des coûts systémiques supplémentaires, surtout lorsque la proportion d'ÉR devient élevée. [8.2]

L'intégration à un rythme accéléré des ÉR dans la plupart des systèmes d'approvisionnement en énergie et des secteurs d'utilisation finale existants – qui conduit à une plus grande proportion d'ÉR – est réalisable sur le plan technique, mais devrait occasionner plusieurs nouveaux problèmes. On prévoit une augmentation de la part des ÉR dans l'éventail global des technologies entraînant de faibles émissions de GES. [10.3, tableaux 10.4-10.6] Qu'il s'agisse de l'électricité, du chauffage, du refroidissement et des combustibles gazeux ou liquides, les problèmes d'intégration des ÉR dépendent du contexte et du lieu et supposent l'ajustement des systèmes actuels d'approvisionnement en énergie. [8.2, 8.3]

Le coût et les problèmes d'intégration d'une proportion croissante d'ÉR dans tout système actuel d'approvisionnement en énergie dépendent de la part actuelle des ÉR, de la disponibilité et des caractéristiques des ressources énergétiques renouvelables, des caractéristiques du système et de la façon dont celui-ci évoluera et se développera à l'avenir.

- Les ÉR peuvent être intégrées dans tous les types de *réseaux électriques*, depuis les vastes réseaux continentaux reliés entre eux [8.2.1] jusqu'aux petits réseaux autonomes et aux bâtiments individuels. [8.2.5] Au nombre des caractéristiques pertinentes de ces systèmes figurent les parts relatives des différentes sources d'énergie dans la production d'électricité et leur souplesse, l'infrastructure des réseaux, la conception et les règles institutionnelles des marchés de l'énergie, le lieu et le profil de la demande et la capacité de contrôle et de communication. L'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque et le solaire thermodynamique sans stockage peuvent être plus difficiles à intégrer que l'énergie hydroélectrique répartissable[9], la bioénergie, le solaire thermodynamique avec stockage et l'énergie géothermique.

9 Les centrales électriques qui peuvent programmer la production d'énergie selon les besoins sont classées comme des centrales à production répartissable. [8.2.1.1, annexe I] Les technologies de production variable d'ÉR (c.-à-d. uniquement lorsque les ressources énergétiques renouvelables sont disponibles) sont partiellement répartissables. Les centrales thermodynamiques sont classées comme des centrales à production répartissable lorsque la chaleur est stockée en vue d'un usage nocturne ou lors des périodes de faible ensoleillement.

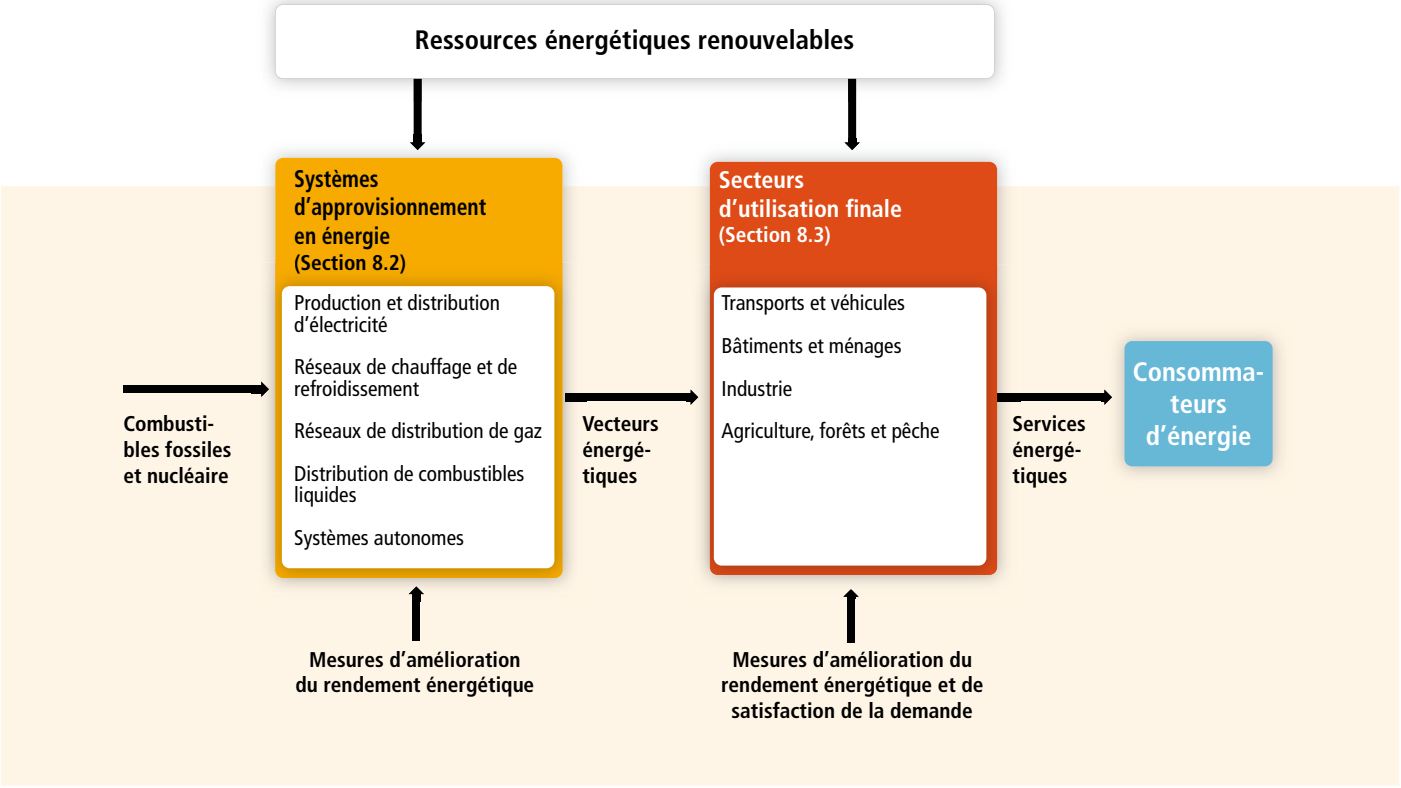


Figure SPM.7 | Modes d'intégration des ÉR pour fournir des services énergétiques, soit dans les systèmes d'approvisionnement en énergie, soit sur site à l'intention des secteurs d'utilisation finale. [Figure 8.1, 8.1]

Lorsque la part des sources d'ÉR variables augmentera, le maintien de la fiabilité des réseaux pourrait devenir plus difficile et coûteux. La mise en place d'un éventail de technologies ÉR complémentaires est une solution envisageable pour réduire les risques et les coûts d'intégration des ÉR. Parmi les autres solutions figurent la mise en place d'une production complémentaire souple et l'exploitation plus flexible des systèmes existants; l'amélioration des prévisions à courte échéance, de l'exploitation des systèmes et des outils de planification; une demande d'électricité qui puisse varier selon l'offre disponible; la mise en œuvre de techniques de stockage de l'énergie (y compris l'énergie hydroélectrique stockable); et la modification des dispositions institutionnelles. Le transport par réseaux électriques (y compris les interconnexions entre réseaux) et/ou l'infrastructure de distribution devront peut-être être renforcées et élargies, du fait notamment de la répartition géographique et de l'emplacement fixe éloigné de nombreuses ressources énergétiques renouvelables. [8.2.1]

- Les *réseaux de chauffage urbain* peuvent faire appel à des ÉR thermiques à basse température telles que l'énergie solaire, l'énergie géothermique ou encore la biomasse, et notamment à des sources à usages restreints, comme les combustibles tirés des ordures. Le refroidissement urbain peut être assuré par des cours d'eau froids. Une capacité de stockage thermique et une cogénération souple peuvent permettre de résoudre les problèmes de variabilité de l'offre et de la demande et de répondre à la demande dans les réseaux électriques. [8.2.2]
- S'il est possible d'injecter du biométhane ou, à l'avenir, de l'hydrogène issu d'ÉR et du gaz naturel synthétique dans les *réseaux de distribution de gaz* pour diverses applications, une intégration fructueuse exige que des normes appropriées concernant la qualité du gaz soient respectées et que les gazoducs soient améliorés si nécessaire. [8.2.3]
- Les *systèmes à combustibles liquides* peuvent intégrer des biocombustibles pour les transports, la cuisson des aliments et le chauffage. En général, les biocombustibles purs (à 100 %) et, plus généralement, ceux mélangés à des combustibles extraits du pétrole doivent respecter des normes techniques correspondant aux spécifications relatives aux carburants destinés aux moteurs des véhicules. [8.2.4, 8.3.1]

Il existe de nombreux moyens d'accroître la part des ÉR dans tous les secteurs d'utilisation finale. La facilité d'intégration varie selon la région, les caractéristiques propres au secteur considéré et la technologie employée.

- Dans le secteur des *transports*, les biocarburants liquides et gazeux sont déjà intégrés et devraient continuer à l'être dans les systèmes d'approvisionnement en carburants d'un nombre de plus en plus élevé de pays. Les possibilités d'intégration peuvent inclure la production décentralisée sur site ou centralisée d'hydrogène issu d'ÉR pour les véhicules équipés de piles à combustible et d'électricité issue d'ÉR pour les véhicules électriques et sur rails [8.2.1, 8.2.3], selon l'infrastructure et les progrès techniques concernant les véhicules. [8.3.1] À l'avenir, la demande de véhicules électriques pourrait permettre d'accroître la souplesse des systèmes de production d'électricité. [8.2.1, 8.3.1]
- Dans le secteur des *bâtiments*, les technologies ÉR peuvent être intégrées dans des structures nouvelles et existantes pour produire de l'électricité et assurer le chauffage et le refroidissement. L'approvisionnement en énergie supplémentaire est possible, surtout dans les bâtiments économes en énergie. [8.3.2] Dans les pays en développement, l'intégration des systèmes d'approvisionnement en ÉR est réalisable, même pour des logements modestes. [8.3.2, 9.3.2]
- Les secteurs de l'*agriculture* et de la *transformation des aliments et des fibres* ont souvent recours à la biomasse pour répondre directement à la demande locale de chauffage et d'énergie. Ces secteurs peuvent être également des exportateurs nets de combustibles, de chaleur et d'électricité vers des systèmes d'approvisionnement adjacents. [8.3.3, 8.3.4] L'augmentation de l'intégration des ÉR destinées aux industries est une possibilité dans plusieurs sous-secteurs, par exemple par le biais de technologies électrothermiques ou, à long terme, en utilisant l'hydrogène issu des ÉR. [8.3.3]

Les coûts associés à l'intégration des ÉR, que ce soit pour la production d'électricité, le chauffage, le refroidissement ou la production de combustibles gazeux ou liquides, dépendent du contexte et du site considéré et sont généralement difficiles à déterminer. Ils peuvent inclure des coûts supplémentaires pour les investissements dans l'infrastructure des réseaux, l'exploitation des systèmes et les pertes connexes et d'autres ajustements à apporter aux systèmes actuels de production d'énergie, selon les besoins. La documentation sur les coûts d'intégration est peu abondante, et les chiffres sont souvent insuffisants ou très variables.

Afin de prendre en compte la forte proportion d'ÉR, les systèmes énergétiques vont devoir évoluer et s'adapter. [8.2, 8.3] Les activités d'intégration à long terme pourraient inclure des investissements dans une infrastructure propice; la modification des cadres institutionnels et de gouvernance; la prise en compte des aspects sociaux, des marchés et de la planification; et le renforcement des capacités en prévision du développement des ÉR. [8.2, 8.3] En outre, l'intégration de technologies moins maîtrisées telles que celles concernant les biocombustibles produits par de nouveaux procédés (également appelés biocombustibles avancés ou biocombustibles de nouvelle génération), les combustibles issus de l'énergie solaire, le refroidissement solaire, les technologies faisant appel à l'énergie marine, les piles à combustible et les véhicules électriques vont exiger des investissements soutenus dans les activités de recherche, développement et démonstration, le renforcement des capacités et d'autres mesures de soutien. [2.6, 3.7, 11.5, 11.6, 11.7]

À l'avenir, les ÉR pourraient fortement influer sur les systèmes d'approvisionnement en énergie et les systèmes d'utilisation finale, en particulier pour l'électricité qui, sur le plan mondial, devrait compter une proportion plus élevée d'ÉR plus tôt que les secteurs du chauffage et des carburants. [10.3] Le développement parallèle des véhicules électriques [8.3.1], l'emploi de plus en plus important de l'électricité (y compris les pompes à chaleur) pour le chauffage et le refroidissement [8.2.2, 8.3.2, 8.3.3], des services souples pour la prise en compte de la demande (y compris l'usage de compteurs intelligents) [8.2.1], le stockage de l'énergie et d'autres technologies pourraient être associés à cette tendance.

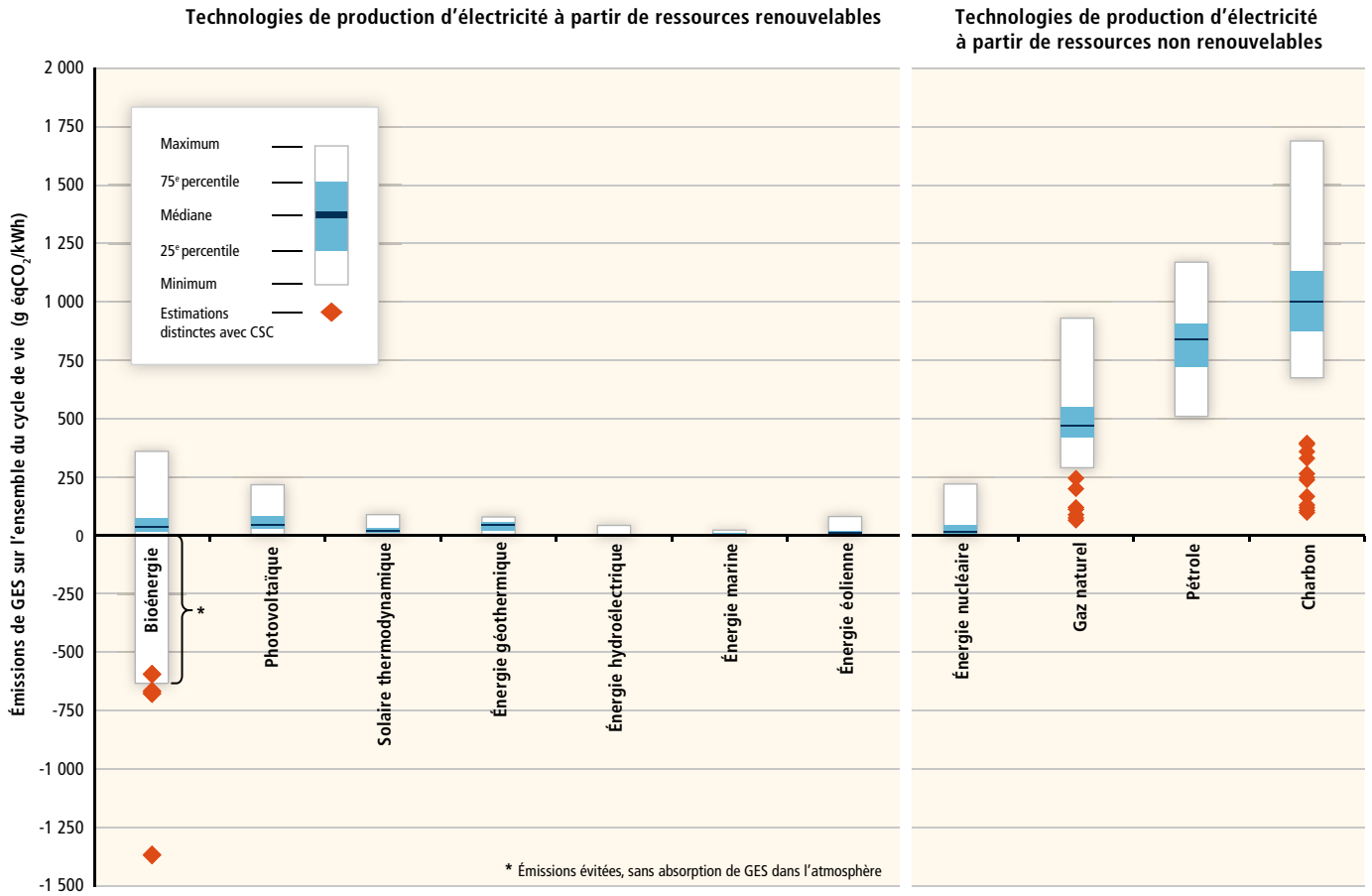
À mesure que l'infrastructure et les systèmes énergétiques se développent et malgré la complexité des processus engagés, il n'existe guère de limites techniques fondamentales en ce qui concerne l'intégration d'un éventail de technologies ÉR pour faire face à la plus grande partie de la demande totale d'énergie aux endroits disposant ou pouvant disposer de ressources énergétiques renouvelables appropriées. Toutefois, le rythme actuel d'intégration et la proportion résultante d'ÉR seront influencés par des facteurs tels que les coûts, les politiques, les questions environnementales et les aspects sociaux. [8.2, 8.3, 9.3, 9.4, 10.2, 10.5]

5. Énergies renouvelables et développement durable

Par le passé, le développement économique était étroitement lié à l'emploi croissant d'énergie et à l'accroissement des émissions de GES. Les ÉR peuvent contribuer à suspendre cette corrélation et concourir ainsi à un développement durable. Bien que l'apport exact des ÉR au développement durable reste à évaluer au niveau des pays, les ÉR offrent la possibilité de contribuer au développement économique et social, à l'accès à l'énergie, à la sûreté de l'approvisionnement énergétique, à l'atténuation des effets des changements climatiques et à la réduction des incidences négatives sur l'environnement et la santé. [9.2] Garantir l'accès à des services énergétiques modernes contribuerait en outre à la réalisation des objectifs du Millénaire pour le développement. [9.2.2, 9.3.2]

- **Les ÉR peuvent contribuer au développement économique et social.** Dans des conditions favorables, on peut faire des économies par rapport aux énergies non renouvelables, en particulier à des endroits reculés et dans des zones rurales pauvres n'ayant pas accès à des sources d'énergie centralisées. [9.3.1, 9.3.2] Il est souvent possible de réduire les coûts associés à l'importation d'énergie grâce à la mise en valeur de technologies ÉR nationales qui sont déjà compétitives. [9.3.3] Les ÉR peuvent avoir des incidences positives sur la création d'emplois, bien que les études disponibles divergent quant à l'ampleur de l'emploi net. [9.3.1]
- **Les ÉR peuvent contribuer à accélérer l'accès à l'énergie, en particulier pour le 1,4 milliard de personnes qui n'ont pas accès à l'électricité et le 1,3 milliard de plus qui ont recours à la biomasse traditionnelle.** Le niveau de base d'accès à des services énergétiques modernes peut avoir des avantages importants pour les communautés et les ménages. Dans de nombreux pays en développement, les réseaux décentralisés fondés sur les ÉR et l'inclusion d'ÉR dans les réseaux énergétiques centralisés ont élargi et amélioré l'accès à l'énergie. En outre, les technologies ÉR hors électricité offrent également des possibilités de modernisation des services énergétiques, par exemple grâce à l'emploi de l'énergie solaire pour le chauffage de l'eau et le séchage des récoltes, des biocarburants pour les transports, des biogaz et de la biomasse moderne pour le chauffage, le refroidissement, la cuisson des aliments et l'éclairage et du vent pour le pompage de l'eau. [9.3.2, 8.1] Le nombre de personnes n'ayant pas accès à des services énergétiques modernes devrait rester le même sauf si des politiques nationales appropriées sont mises en œuvre, éventuellement soutenues ou complétées par une assistance internationale, selon les besoins. [9.3.2, 9.4.2]
- **Les possibilités offertes par les ÉR peuvent contribuer à un approvisionnement plus sûr en énergie, bien qu'il faille tenir compte de problèmes particuliers en matière d'intégration.** La mise en valeur des ÉR peut réduire la vulnérabilité aux perturbations en matière d'approvisionnement et à la volatilité du marché, si la concurrence s'accroît et que les sources d'énergie soient diversifiées. [9.3.3, 9.4.3] Selon les études de scénarios, les préoccupations en ce qui concerne la sûreté de l'approvisionnement en énergie pourraient persister à l'avenir faute d'améliorations techniques dans le secteur des transports. [2.8, 9.4.1.1, 9.4.3.1, 10.3] Le profil variable de la production assurée par certaines technologies ÉR nécessite souvent des mesures techniques et institutionnelles correspondant aux conditions locales, afin de garantir la fiabilité de l'approvisionnement en énergie. [8.2, 9.3.3]
- **Outre qu'elles réduisent les émissions de GES, les technologies ÉR peuvent avoir d'autres avantages importants pour l'environnement. La maximisation de ces avantages dépend de la technologie employée, de la gestion et des caractéristiques du site associées à chaque projet concernant les ÉR.**
  - **Les analyses du cycle de vie pour la production d'électricité indiquent que les émissions de GES émanant de technologies ÉR sont généralement beaucoup plus faibles que celles issues de technologies faisant appel à des combustibles fossiles et, dans certaines conditions, inférieures à celles correspondant à l'utilisation de combustibles fossiles avec captage et stockage du carbone (CSC).** Les valeurs médianes pour toutes les énergies renouvelables s'échelonnent de 4 à 46 g éqCO_2/kWh, alors que pour les combustibles fossiles, elles vont de 469 à 1 001 g éqCO_2/kWh (à l'exclusion des émissions dues aux changements d'affectation des sols). (Figure SPM. 8)
  - **Les systèmes bioénergétiques les plus courants, y compris ceux qui font appel aux biocombustibles liquides, donnent lieu à des réductions des émissions de GES, et la plupart des biocombustibles produits par de nouveaux procédés (également appelés biocombustibles avancés ou de nouvelle génération) permettent des réductions encore plus importantes. Le bilan des GES pourrait subir l'influence des changements d'affectation des sols et de l'évolution correspondante des émissions et des absorptions.** La bioénergie peut contribuer à éviter des émissions de GES émanant des résidus et des déchets présents dans les décharges et des produits connexes; la combinaison de la bioénergie et du captage et du stockage du carbone peut permettre des réductions encore plus importantes (voir la figure SPM.8). Il existe des incertitudes considérables en ce qui concerne les effets des GES liés aux changements de gestion et d'affectation des sols se rapportant aux stocks de carbone. [2.2, 2.5, 9.3.4.1]

- **La viabilité de la bioénergie, notamment en fonction des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie, subit l'influence des pratiques en matière de gestion des ressources en sols et en biomasse.** Les changements dans l'exploitation ou la gestion des sols et des forêts qui, selon un nombre considérable d'études, pourraient résulter *directement* ou *indirectement* de la production de biomasse comme source de combustibles, d'énergie ou de chaleur sont à même de réduire ou d'accroître les stocks de carbone dans le sol. Selon ces mêmes études, il existe des incertitudes considérables quant aux modifications indirectes de ces stocks de carbone qui ne sont pas observables directement, dont la modélisation s'avère complexe et qu'il est difficile d'attribuer à une seule cause. Une gouvernance appropriée de l'utilisation des sols, du zonage et du choix des systèmes de production de biomasse sont des considérations essentielles pour les décideurs. [2.4.5, 2.5.1, 9.3.4, 9.4.4] Des politiques ont été mises en œuvre, qui visent à garantir les avantages de la bioénergie tels que le développement rural, l'amélioration globale de la gestion de l'agriculture et la contribution à l'atténuation des effets des changements climatiques, mais leur efficacité n'a pas été évaluée. [2.2, 2.5, 2.8]



Nombre d'estimations	222(+4)	124	42	8	28	10	126	125	83(+7)	24	169(+12)
Nombre de références	52(+0)	26	13	6	11	5	49	32	36(+4)	10	50(+10)

Figure SPM.8 | Évaluation des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie (g éqCO_2/kWh) pour les grandes catégories de technologies de production d'électricité et pour certaines technologies intégrées avec captage et stockage du carbone. L'évolution nette des stocks de carbone liée à l'utilisation des sols (s'appliquant essentiellement à la bioénergie et à l'énergie hydroélectrique issue de réservoirs) et les incidences de la gestion des sols ne sont pas prises en compte. Les estimations négatives[10] concernant la bioénergie sont fondées sur des hypothèses relatives aux émissions évitées en provenance des résidus et déchets présents dans les décharges et des produits connexes. Les références et les méthodes employées pour l'étude sont présentées à l'annexe II. Le nombre d'estimations est supérieur au nombre de références du fait que, dans de nombreuses études, on a envisagé des scénarios multiples. Les chiffres indiqués entre parenthèses ont trait à des références et à des estimations supplémentaires qui ont permis d'évaluer les technologies recourant au captage et au stockage du carbone. Les informations sur la distribution concernent les estimations présentées dans la documentation actuelle sur l'évaluation du cycle de vie, et pas nécessairement les extrêmes théoriques ou pratiques sous-jacents, ainsi que la tendance centrale véritable lorsque l'on considère toutes les conditions de mise en valeur. [Figure 9.8, 9.3.4.1]

10 Dans le cadre de la terminologie des analyses du cycle de vie présentée dans le Rapport spécial, les «estimations négatives» se rapportent aux émissions évitées. Contrairement au cas de la bioénergie avec captage et stockage du carbone, les émissions évitées ne correspondent pas à la suppression d'une certaine quantité de GES dans l'atmosphère.

- **Les technologies ÉR, et en particulier celles qui ne sont pas fondées sur la combustion, peuvent offrir des avantages en ce qui concerne la pollution de l'air et les problèmes de santé connexes.** [9.3.4.3, 9.4.4.1] Les améliorations apportées en matière d'utilisation de la biomasse traditionnelle peuvent réduire sensiblement la pollution de l'air locale et intérieure (en plus des effets positifs sur les émissions de GES, le déboisement et la dégradation des forêts) et diminuer les répercussions associées sur la santé, surtout chez les femmes et les enfants des pays en développement. [2.5.4, 9.3.4.4]
- **Les disponibilités en eau pourraient influer sur le choix des technologies ÉR.** Les centrales thermiques traditionnelles refroidies par eau peuvent être particulièrement vulnérables en cas de pénurie d'eau et d'évolution du climat. Dans les endroits où la rareté de l'eau est déjà un problème, des technologies ÉR non thermiques ou des technologies ÉR thermiques faisant appel à un refroidissement par voie sèche peuvent assurer des services énergétiques sans solliciter davantage les ressources en eau. L'énergie hydroélectrique et certains systèmes bioénergétiques dépendent des disponibilités en eau et peuvent aussi bien accroître la concurrence qu'atténuer la rareté de l'eau. De nombreux effets peuvent être atténués par le choix des sites et une planification intégrée. [2.5.5.1, 5.10, 9.3.4.4]
- **Les conditions propres aux sites déterminent la mesure dans laquelle les technologies ÉR se répercutent sur la biodiversité.** Les incidences des ÉR sur la biodiversité peuvent être positives ou négatives. [2.5, 3.6, 4.5, 5.6, 6.5, 9.3.4.6]
- **Les technologies ÉR entraînent peu d'accidents mortels.** Les risques d'accidents dus à ces technologies ne sont pas négligeables, mais la structure souvent décentralisée de ces dernières limite nettement les risques de décès. Cependant, les barrages construits dans le cadre de certains projets hydroélectriques peuvent induire un risque défini selon des facteurs propres aux sites. [9.3.4.7]

6. Potentiel d'atténuation et coûts de l'atténuation

La majorité des 164 scénarios examinés dans le Rapport spécial font état d'un accroissement sensible de la mise en valeur des ÉR d'ici 2030, 2050 et au-delà.[11] En 2008, la production totale d'ÉR était d'environ 64 EJ/an (12,9 % de l'approvisionnement total en énergie primaire), dont plus de 30 EJ/an provenaient de la biomasse traditionnelle. Plus de la moitié de ces scénarios prévoient, pour 2050, des niveaux de mise en valeur des ÉR supérieurs à 173 EJ/an et, dans certains cas, à 400 EJ/an. (Figure SPM.9) Vu que l'emploi de la biomasse traditionnelle diminue dans la plupart des scénarios, on prévoit une augmentation générale correspondante de la production d'ÉR (à l'exclusion de la biomasse traditionnelle), qui serait multipliée par un chiffre variant approximativement de 3 à plus de 10. La part des ÉR dans l'approvisionnement mondial en énergie primaire varie sensiblement selon les scénarios. Plus de la moitié des scénarios prévoient que les ÉR devraient contribuer pour plus de 17 % à l'approvisionnement en énergie primaire en 2030 et pour plus de 27 % en 2050. Les scénarios les plus optimistes quant à la part des ÉR font état de 43 % en 2030 et de 77 % en 2050. [10.2, 10.3]

On peut s'attendre à ce que les ÉR se développent, même dans le cas des scénarios de référence. La plupart des scénarios de référence font état d'une mise en valeur des ÉR nettement supérieure au niveau de 2008 – 64 EJ/an –, pouvant atteindre 120 EJ/an en 2030. Pour 2050, nombre de scénarios de référence prévoient des niveaux de mise en valeur des ÉR supérieurs à 100 EJ/an, allant dans certains cas jusqu'à 250 EJ/an environ. (Figure SPM.9) Ces niveaux de base résultent d'un ensemble d'hypothèses, dont la croissance continue de la demande de services énergétiques pendant tout le XXIe siècle, la capacité des ÉR à faciliter l'accès à l'énergie et une moindre disponibilité des ressources fossiles à long terme. D'autres hypothèses (comme la baisse des coûts et l'amélioration des performances des technologies ÉR) rendent ces technologies de plus en plus compétitives sur le plan économique dans de nombreux cas, même en l'absence d'une politique climatique. [10.2]

La mise en valeur des ÉR augmente très nettement dans les scénarios à faible concentration de GES en phase de stabilisation. En moyenne, ces scénarios prévoient une mise en valeur des ÉR plus importante que les scénarios de référence. Toutefois, pour tout objectif à long terme donné concernant la concentration de GES, les scénarios présentent une large gamme de niveaux de mise en valeur des ÉR. (Figure SPM.9) Dans les scénarios prévoyant la stabilisation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère à un niveau inférieur à 440 ppm, le niveau médian de mise en valeur des ÉR est de 248 EJ/an en 2050 (139 en 2030), les niveaux les plus élevés atteignant 428 EJ/an en 2050 (252 en 2030). [10.2]

11 Pour cela, on a étudié 164 scénarios mondiaux établis par 16 modèles intégrés à grande échelle. Bien que l'ensemble des scénarios permette de procéder à une évaluation satisfaisante de l'incertitude, les 164 scénarios étudiés ne constituent pas un échantillon entièrement aléatoire en vue d'une analyse statistique rigoureuse et ne représentent pas toujours l'éventail complet des ÉR (à ce jour, par exemple, l'énergie marine n'est envisagée que dans quelques scénarios). [10.2.2] Pour obtenir une analyse plus précise, on s'est fondé sur un sous-ensemble de quatre scénarios représentatifs sur les 164 scénarios utilisés. Ces quatre scénarios consistent en un scénario de référence sans objectifs précis en matière d'atténuation et en trois scénarios correspondant à divers niveaux de stabilisation du CO_2. [10.3]

Nombre de combinaisons de solutions envisageables pour un approvisionnement en énergie à faible intensité de carbone et d'améliorations du rendement énergétique peuvent permettre d'obtenir de faibles niveaux de concentration de GES, les ÉR devenant la principale solution à cet égard d'ici 2050 selon la majorité des scénarios. Ce vaste éventail de résultats se fonde sur un certain nombre d'hypothèses concernant des facteurs tels que l'évolution des technologies ÉR (y compris la bioénergie avec CSC) et de leurs bases de ressources et des coûts associés; l'intérêt que peuvent présenter pour leur part les autres possibilités d'atténuation (amélioration du rendement énergétique dans les secteurs d'utilisation finale, énergie nucléaire, énergie d'origine fossile avec captage et stockage du carbone, etc.); les modes de consommation et de production; les principaux facteurs de la demande de services énergétiques (y compris la croissance démographique et économique); la capacité d'intégrer des sources d'ÉR variables dans les réseaux électriques; les ressources en combustibles fossiles; les approches stratégiques précises du processus d'atténuation; et les taux d'émissions à atteindre pour parvenir à des niveaux de concentration à long terme donnés. [10.2]

Selon l'étude des scénarios figurant dans le Rapport spécial, les ÉR disposent d'un vaste potentiel de réduction des émissions de GES. Quatre scénarios illustratifs indiquent, pour les réductions cumulées d'émissions de CO_2 à l'échelle du globe entre 2010 et 2050, une fourchette comprise entre 220 et 560 Gt CO_2 environ, par comparaison avec des émissions cumulées de CO_2 issues de la combustion de combustibles fossiles et d'origine industrielle d'environ 1 530 Gt prévues pour la même période dans le scénario de référence présenté dans les Perspectives énergétiques mondiales de 2009. L'attribution précise de potentiels d'atténuation aux ÉR dépend du rôle que les scénarios attribuent aux technologies d'atténuation concernées, du comportement de systèmes complexes et, en particulier, des sources d'énergie que les ÉR remplacent. Ainsi, il faut envisager avec toute la prudence voulue l'attribution de potentiels d'atténuation précis aux diverses ÉR. [10.2, 10.3, 10.4]

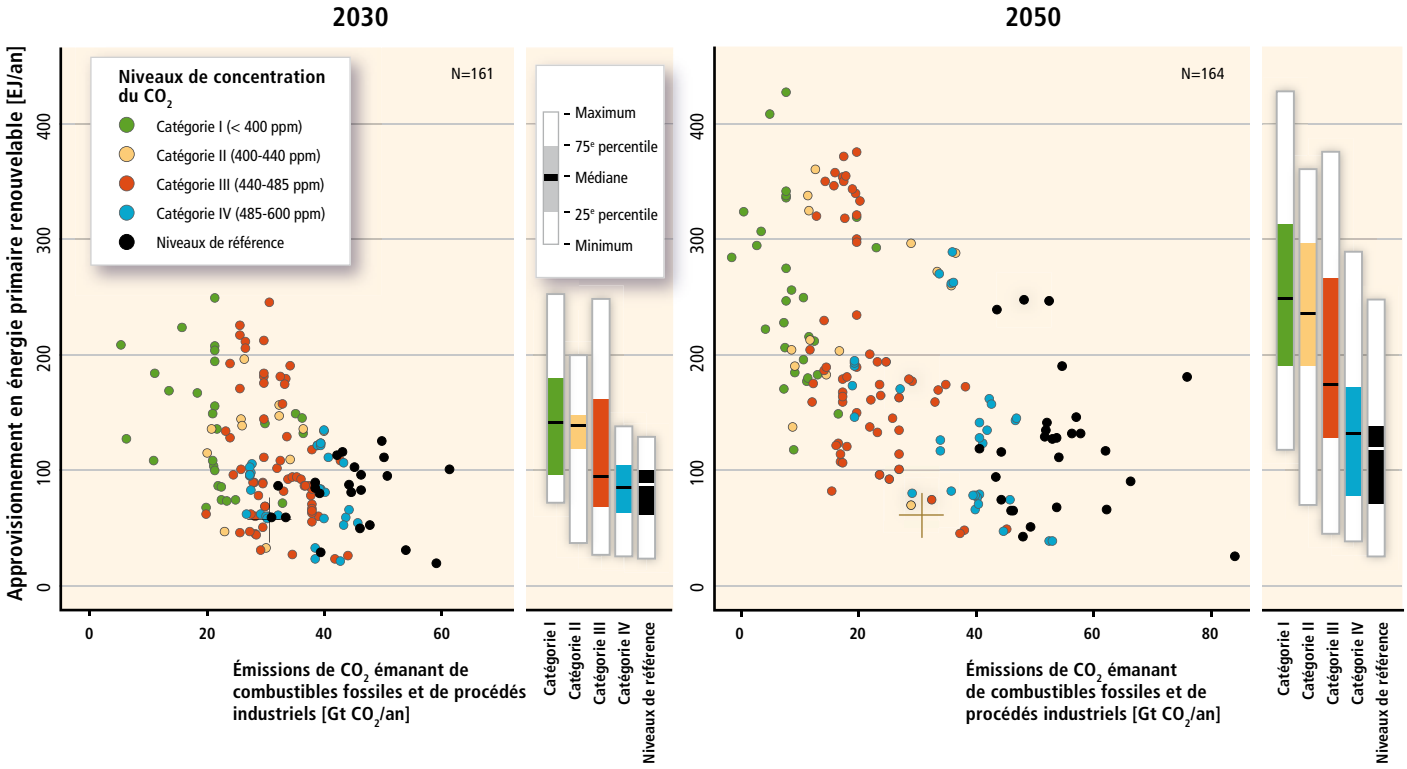


Figure SPM.9 | Approvisionnement mondial en énergie primaire renouvelable (équivalent direct), d'après 164 scénarios à long terme, par rapport aux émissions de CO_2 d'origine industrielle ou issues de la combustion de combustibles fossiles en 2030 et 2050. Le codage couleur est fondé sur des catégories de niveaux de stabilisation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère définies pour correspondre à celles du quatrième Rapport d'évaluation. Les barres situées à droite des nuages de points indiquent les niveaux de mise en valeur des ÉR pour chacune des catégories de concentration de CO_2 dans l'atmosphère. Les traits noirs épais correspondent aux médianes, les segments de barres colorés, aux intervalles interquartiles (25e au 75e percentile) et les extrémités de la partie blanche des barres, à la fourchette complète pour tous les scénarios étudiés. Les croix grises correspondent à la situation en 2007. [Figure 10.2, 10.2.2.2]

Note: Les résultats pour 2030 indiqués ici sont tirés de 161 scénarios seulement (sur un ensemble complet de 164 scénarios) pour des raisons de communication des données. Si certains niveaux de mise en valeur des ÉR sont inférieurs à ceux d'aujourd'hui, c'est en raison des sorties de modèles et de la disparité des méthodes de prise en compte de la biomasse traditionnelle. On trouvera, dans l'encadré SPM.2, des détails sur l'emploi de la méthode de l'«équivalent direct» pour la détermination de l'approvisionnement en énergie primaire et sur le soin à apporter à l'interprétation des résultats issus des scénarios. On notera que les catégories V et plus ne sont pas incluses et que la catégorie IV voit sa limite supérieure passer de 570 à 600 ppm, du fait que tous les scénarios de stabilisation indiquent des valeurs inférieures à 600 ppm de CO_2 en 2100 et que les scénarios de référence les plus bas atteignent des niveaux de concentration légèrement supérieurs à 600 ppm à l'horizon 2100.

En général, les scénarios indiquent que la progression des ÉR s'effectuera dans le monde entier. Bien que la répartition précise de la mise en valeur des ÉR dans les régions varie sensiblement selon les scénarios, ceux-ci s'accordent globalement à prévoir une progression générale de la mise en valeur des ÉR sur le plan mondial. En outre, dans la plupart des scénarios, la mise en valeur totale des ÉR est plus importante à long terme dans le groupe des pays non visés à l'annexe I[12] que dans le groupe de pays visés à cette annexe. (Figure SPM.10) [10.2, 10.3]

Les scénarios n'indiquent pas de technologie ÉR manifestement prédominante sur le plan mondial. En outre, les potentiels techniques globaux au plan mondial ne limitent pas la contribution future des ÉR. Bien que la contribution des technologies ÉR varie selon les scénarios, la biomasse moderne, l'énergie éolienne et l'énergie solaire directe représenteront en 2050 les contributions les plus importantes de ces technologies au système énergétique. (Figure SPM.11) Tous les scénarios évalués confirment que les potentiels techniques ne limiteront pas le développement des ÉR sur le plan mondial. Malgré des différences techniques et régionales sensibles dans les quatre scénarios illustratifs, moins de 2,5 % du potentiel technique des ÉR disponible au plan mondial est exploité. [10.2, 10.3]

12 Les expressions «visés à l'annexe I» et «non visés à l'annexe I» renvoient à des catégories de pays définies dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).

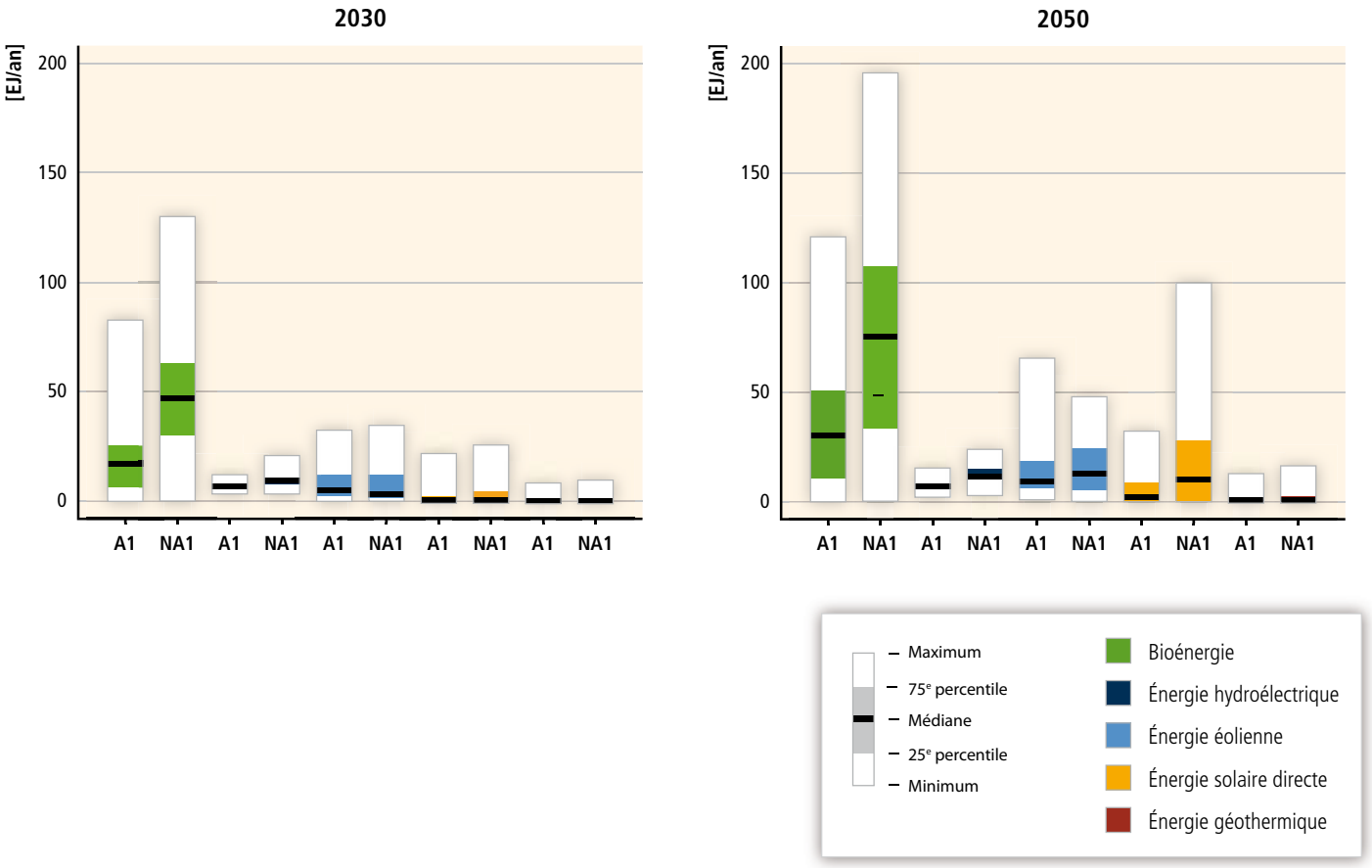


Figure SPM.10 | Approvisionnement mondial en énergie primaire renouvelable (équivalent direct) par source pour le groupe de pays visés à l'annexe I (A1) et le groupe de pays non visés à l'annexe I (NA1) selon 164 scénarios à long terme à l'horizon 2030 et 2050. Les traits noirs épais correspondent aux médianes, les segments de barres colorés, aux intervalles interquartiles (25e à 75e percentiles) et les extrémités de la partie blanche des barres, à la fourchette complète pour tous les scénarios étudiés. [Figure 10.8, 10.2.2.5]

Note: On trouvera dans l'encadré SPM.2 des détails sur l'emploi de la méthode de l'«équivalent direct» pour déterminer l'approvisionnement en énergie primaire et sur le soin à apporter à l'interprétation des résultats issus des scénarios. Plus précisément, on peut considérer que les fourchettes de l'énergie secondaire issue de la bioénergie, de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire directe sont d'une importance comparable dans les scénarios de pénétration les plus favorables pour 2050. L'énergie marine n'est pas présentée ici, du fait que très peu de scénarios prennent en compte cette technologie.

Des études particulières montrent que, si la mise en valeur des ÉR est limitée, les coûts d'atténuation vont augmenter et une stabilisation à une faible concentration de GES risque d'échouer. Un certain nombre d'études se sont intéressées au point de vue des scénarios qui supposent que des contraintes s'exercent sur la mise en valeur des diverses options en matière d'atténuation, y compris les ÉR ainsi que l'énergie nucléaire et l'énergie tirée de la combustion de combustibles fossiles avec captage et stockage du carbone. Il existe des points de désaccord quant à l'ampleur précise des hausses de coûts. [10.2]

Le passage à une économie caractérisée par une faible concentration de GES et une part accrue d'ÉR suppose une augmentation des investissements dans les technologies et l'infrastructure. Selon les quatre scénarios illustratifs analysés en détail dans le Rapport spécial, les investissements cumulés totaux dans les ÉR (uniquement dans le secteur de la production d'énergie) seraient compris entre 1 360 et 5 100 milliards de dollars É.U. de 2005 pour la décennie 2011-2020 et entre 1 490 et

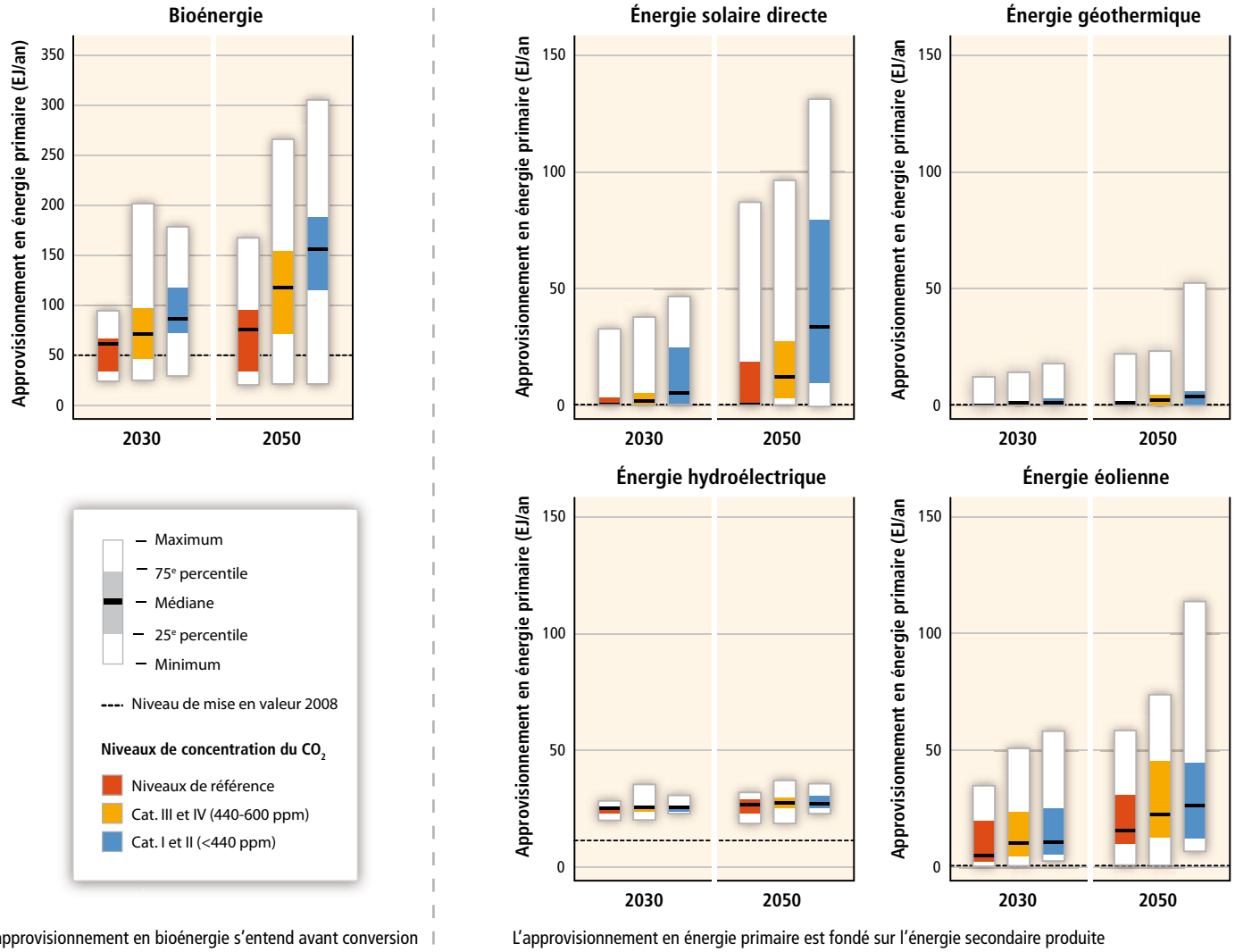


Figure SPM.11 | Approvisionnement mondial en énergie primaire (équivalent direct) issue de la bioénergie, de l'énergie éolienne, de l'énergie solaire directe, de l'énergie hydroélectrique et de l'énergie géothermique, regroupé selon diverses catégories de concentration de CO_2 dans l'atmosphère définies conformément aux catégories présentées dans la quatrième Rapport d'évaluation, selon 164 scénarios à long terme à l'horizon 2030 et 2050. Les traits noirs épais correspondent aux médianes, les segments de barres colorés, aux intervalles interquartiles (25e à 75e percentiles) et les extrémités de la partie blanche des barres, à la fourchette complète pour tous les scénarios étudiés. [Extrait de la figure 10.9, 10.2.2.5]

Note: On trouvera dans l'encadré SPM.2 des détails sur l'emploi de la méthode de l'«équivalent direct» pour déterminer l'approvisionnement en énergie primaire et sur le soin à apporter à l'interprétation des résultats issus des scénarios. Plus précisément, on peut considérer que les fourchettes de l'énergie secondaire émanant de la bioénergie, de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire directe sont d'une importance comparable dans les scénarios de pénétration les plus favorables pour 2050. L'énergie marine n'est pas présentée ici du fait que très peu de scénarios prennent en compte cette technologie. On notera que les catégories V et plus ne sont pas incluses et que la catégorie IV voit sa limite supérieure passer de 570 à 600 ppm du fait que tous les scénarios de stabilisation indiquent des valeurs inférieures à 600 ppm de CO_2 en 2100 et que les scénarios de référence les plus bas atteignent des niveaux de concentration légèrement supérieurs à 600 ppm en 2100.

7 180 milliards de dollars É.U. de 2005 pour la décennie 2021-2030. Les valeurs basses correspondent au scénario de référence présenté dans les Perspectives énergétiques mondiales de 2009 et les valeurs élevées à un scénario prévoyant la stabilisation de la teneur de l'atmosphère en CO_2 (uniquement) à 450 ppm. Les moyennes annuelles de ces besoins en investissements représentent moins de 1 % du produit intérieur brut (PIB) mondial. Au-delà des différences de conception des modèles utilisés pour étudier ces scénarios, l'écart entre les valeurs extrêmes s'explique principalement par des différences dans la concentration de GES évaluée et par les contraintes imposées sur l'ensemble des technologies d'atténuation envisageables. L'augmentation de la capacité installée des centrales utilisant des ÉR va réduire la quantité de combustibles fossiles et nucléaires qui serait autrement nécessaire pour faire face à une demande donnée d'électricité. Outre les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance et, le cas échéant, des matières premières pour les centrales faisant appel aux ÉR, il faut, pour toute évaluation de la charge économique globale associée à leur application, tenir compte des coûts des combustibles évités ainsi que des coûts d'investissement substitués. Même si l'on ne tient pas compte des coûts évités, la limite inférieure des investissements dans les ÉR évoqués ci-dessus est plus faible que le montant des investissements correspondants indiqués pour 2009. Quant aux valeurs supérieures de la moyenne annuelle des investissements réalisés dans le secteur des ÉR, elles correspondent à peu près à cinq fois la valeur des investissements mondiaux dans ce secteur déclarés pour 2009. [10.5, 11.2.2]

7. Politiques, mise en œuvre et financement

La mise en œuvre d'un nombre croissant de politiques très diverses au sujet des ÉR, motivées par de nombreux facteurs, ont entraîné un développement intensif des technologies ÉR ces dernières années. [1.4, 11.2, 11.5, 11.6] Les politiques gouvernementales jouent un rôle essentiel dans l'accélération de la mise en valeur de ces technologies. L'accès à l'énergie et le développement économique et social ont été les principaux éléments moteurs dans la plupart des pays en développement, alors que la sûreté des approvisionnements en énergie et les préoccupations environnementales ont joué un rôle primordial dans les pays développés. [9.3, 11.3] Les politiques, axées essentiellement au départ sur l'électricité produite au moyen d'ÉR, englobent désormais le chauffage, le refroidissement et les transports à base d'ÉR. [11.2, 11.5]

Les politiques mises en œuvre en matière de recherche, de développement, de démonstration et de mise en valeur pour les énergies renouvelables permettent d'homogénéiser les règles pour l'ensemble des ÉR. Certaines d'entre elles sont d'ordre réglementaire, comme les tarifs d'alimentation, les quotas, l'accès prioritaire au réseau, les mandats en matière de construction, les exigences de panachage des biocombustibles et les critères de viabilité de la bioénergie. [2.4.5.2, 2.ES, TS.2.8.1] Parmi les autres catégories de politiques figurent les incitations fiscales telles que les politiques fiscales ou les versements publics directs (rabais, subventions, etc.) et les mécanismes de financement publics tels que les prêts et garanties. Des politiques plus générales visant à réduire les émissions de GES, comme les mécanismes de tarification du carbone, peuvent être également favorables aux ÉR.

Les politiques peuvent être axées sur des secteurs d'activité particuliers, être mises en œuvre aux niveaux local, provincial (ou des États), national et, dans certains cas, régional et être complétées par une coopération bilatérale, régionale ou internationale. [11.5]

Les politiques ont favorisé la multiplication des installations augmentant la capacité des ÉR en contribuant à éliminer divers obstacles. [1.4, 11.1, 11.4, 11.5, 11.6] Les obstacles à la mise en valeur des ÉR sont les suivants:

- Obstacles institutionnels et stratégiques relatifs à l'industrie, à l'infrastructure et à la réglementation du système énergétique existantes;
- Défaillances du marché, y compris la non-internalisation des coûts pour l'environnement et la santé, le cas échéant;
- Manque d'informations générales et d'accès aux données concernant la mise en valeur des ÉR et insuffisance des capacités sur le plan technique et sur celui des connaissances;
- Obstacles liés aux valeurs sociétales et personnelles affectant la perception et l'acceptation des technologies ÉR. [1.4, 9.5.1, 9.5.2.1]

Les investissements publics dans la recherche-développement sont particulièrement efficaces lorsqu'ils sont complétés par d'autres instruments stratégiques, et notamment par des politiques de mise en valeur qui accroissent simultanément la demande de nouvelles technologies. Prises dans leur ensemble, la recherche-développement et les politiques de mise en valeur créent un cycle de rétroaction positive, qui favorise les investissements du secteur privé. La mise en œuvre rapide de politiques de mise en valeur lors du développement d'une technologie donnée peut accélérer l'apprentissage en stimulant la recherche-développement privée, qui à son tour réduit encore les coûts et incite encore plus à utiliser cette technologie. [11.5.2]

Il est avéré que certaines politiques ont effectivement la capacité d'accélérer la mise en valeur des ÉR. Cependant, il n'existe pas de politique unique convenant dans tous les cas. L'expérience montre que différentes politiques ou combinaisons de politiques peuvent être plus efficaces et efficientes selon des facteurs tels que le niveau de maturité technique, les disponibilités en capitaux, la facilité d'intégration dans le système existant et la base locale et nationale de ressources énergétiques renouvelables. [11.5]

- Selon plusieurs études, certains tarifs d'alimentation ont permis de promouvoir l'électricité issue d'ÉR, principalement grâce à la combinaison de prix fixes à long terme ou du versement de primes, de connexions au réseau et de l'achat garanti de toute la production d'électricité à partir d'ÉR. Les politiques de quotas peuvent être efficaces si elles sont conçues de façon à réduire les risques, par exemple grâce à des contrats à long terme. [11.5.4]
- Les gouvernements sont de plus en plus nombreux à recourir à des incitations fiscales pour le chauffage et le refroidissement à partir d'ÉR. L'obligation d'utiliser des moyens de chauffage à partir d'ÉR attire l'attention du fait de sa capacité potentielle d'encourager la croissance indépendamment d'un soutien financier public. [11.5.5]
- Dans le secteur des transports, les mandats concernant les carburants produits à partir d'ÉR et les exigences en matière de mélange sont des facteurs clés du développement de la plupart des entreprises modernes de production de biocarburants. D'autres politiques incluent des versements publics directs ou des réductions d'impôts. Ces politiques ont influé sur le développement des échanges internationaux de biocarburants. [11.5.6]

Il importe de disposer d'une certaine souplesse permettant d'apporter les corrections nécessaires à mesure que les technologies, les marchés et autres facteurs évoluent. Les modalités de la conception et de la mise en œuvre jouent un rôle essentiel dans l'efficacité et l'efficience d'une politique. [11.5] Des cadres réglementaires généraux transparents et dynamiques permettent de réduire les risques liés aux investissements et facilitent la mise en valeur des ÉR et l'évolution des applications à faible coût. [11.5, 11.6]

Les politiques de «facilitation» favorisent le développement et la mise en valeur des ÉR. On peut créer un environnement favorable aux ÉR en tenant compte des interactions possibles d'une politique donnée avec d'autres politiques relatives aux ÉR et avec des politiques énergétiques et non énergétiques (concernant par exemple l'agriculture, les transports, la gestion des ressources en eau et l'urbanisme); en permettant à ceux qui développent les ÉR d'obtenir plus facilement les crédits nécessaires et d'implanter sans difficulté leurs projets; en éliminant les obstacles qui s'opposent à l'accès aux réseaux et aux marchés pour les installations et la production d'ÉR; en améliorant l'éducation et la sensibilisation grâce à des initiatives ciblées en matière de communication et de dialogue; et en assurant un transfert de technologie. Par ailleurs, l'existence d'un environnement «facilitant» peut accroître l'efficacité et l'efficience des politiques de promotion des ÉR. [9.5.1.1, 11.6]

Deux défaillances distinctes du marché justifient un soutien complémentaire des technologies ÉR innovantes à fort potentiel de développement technologique, même s'il existe un marché des émissions (ou une politique générale de tarification des GES). La première de ces défaillances porte sur le coût externe des émissions de GES. La deuxième concerne le secteur de l'innovation: si des entreprises sous-estiment les avantages futurs des investissements dans l'apprentissage des technologies ÉR ou si elles ne peuvent pas se procurer ces avantages, elles feront des investissements qui ne seront pas optimaux d'un point de vue macroéconomique. Outre les politiques de tarification des GES, les politiques propres aux ÉR peuvent être opportunes d'un point de vue économique si l'on tient compte des possibilités connexes de développement technologique (ou si l'on s'est fixé d'autres objectifs que l'atténuation des effets du climat). Des conséquences potentiellement négatives telles que le blocage, les «fuites» de carbone et les effets de rebond devraient être prises en compte lors de la conception d'un ensemble de politiques. [11.1.1, 11.5.7.3]

La documentation existante indique que les objectifs à long terme pour les ÉR et la souplesse permettant de tirer les enseignements voulus de l'expérience acquise sont essentiels pour assurer une percée marquée et peu coûteuse des ÉR. Il faut pour cela concevoir systématiquement des cadres réglementaires généraux qui réduisent les risques et procurent des rendements intéressants pour assurer la stabilité sur une période de temps correspondant aux investissements. Une combinaison appropriée et fiable des moyens d'action, y compris des politiques d'amélioration du rendement énergétique, est encore plus importante si l'infrastructure énergétique est encore en cours de développement et qu'on prévoie que la demande d'énergie augmentera à l'avenir. [11.5, 11.6, 11.7]

8. Progrès des connaissances concernant les énergies renouvelables

Les progrès des connaissances scientifiques et techniques devraient conduire à des améliorations des résultats et à des réductions du coût des technologies ÉR. D'autres connaissances concernant les ÉR et leur rôle dans la diminution des émissions de GES doivent être encore acquises dans un certain nombre de secteurs d'envergure, dont les secteurs suivants [pour plus de précisions, voir le tableau 1.1]:

- Coût et calendrier à venir de la mise en valeur des ÉR;
- Potentiel technique réalisable pour les ÉR à toutes les échelles géographiques;
- Problèmes techniques et institutionnels et coût de l'intégration des diverses technologies ÉR dans les systèmes énergétiques et sur les marchés de l'énergie;
- Évaluations d'ensemble des aspects socioéconomiques et environnementaux des technologies ÉR et des autres technologies énergétiques;
- Possibilités de répondre aux besoins des pays en développement grâce à des services viables relatifs aux ÉR;
- Mécanismes réglementaires, institutionnels et financiers permettant la mise en valeur à bas coût des ÉR dans des contextes très divers.

Les connaissances concernant les ÉR et leur potentiel d'atténuation des effets des changements climatiques continuent à progresser. Les connaissances scientifiques actuelles sont importantes et peuvent faciliter le processus de décision [1.1.8].

TS

Résumé technique

Auteurs principaux:

Dan Arvizu (États-Unis d'Amérique), Thomas Bruckner (Allemagne), Helena Chum (États-Unis d'Amérique/Brésil), Ottmar Edenhofer (Allemagne), Segen Estefen (Brésil), Andre Faaij (Pays-Bas), Manfred Fischedick (Allemagne), Gerrit Hansen (Allemagne), Gerardo Hiriart (Mexique), Olav Hohmeyer (Allemagne), K. G. Terry Hollands (Canada), John Huckerby (Nouvelle-Zélande), Susanne Kadner (Allemagne), Ånund Killingtveit (Norvège), Arun Kumar (Inde), Anthony Lewis (Irlande), Oswaldo Lucon (Brésil), Patrick Matschoss (Allemagne), Lourdes Maurice (États-Unis d'Amérique), Monirul Mirza (Canada/Bangladesh), Catherine Mitchell (Royaume-Uni), William Moomaw (États-Unis d'Amérique), José Moreira (Brésil), Lars J. Nilsson (Suède), John Nyboer (Canada), Ramon Pichs-Madruga (Cuba), Jayant Sathaye (États-Unis d'Amérique), Janet L. Sawin (États-Unis d'Amérique), Roberto Schaeffer (Brésil), Tormod A. Schei (Norvège), Steffen Schlömer (Allemagne), Kristin Seyboth (Allemagne/États-Unis d'Amérique), Ralph Sims (Nouvelle-Zélande), Graham Sinden (Royaume-Uni/Australie), Youba Sokona (Éthiopie/Mali), Christoph von Stechow (Allemagne), Jan Steckel (Allemagne), Aviel Verbruggen (Belgique), Ryan Wiser (États-Unis d'Amérique), Francis Yamba (Zambie) et Timm Zwickel (Allemagne)

Éditeurs-réviseurs:

Leonidas O. Girardin (Argentine) et Mattia Romani (Royaume-Uni/Italie)

Conseiller spécial:

Jeffrey Logan (États-Unis d'Amérique)

Le présent Résumé technique doit être cité ainsi:

Arvizu, D., T. Bruckner, O. Edenhofer, S. Estefen, A. Faaij, M. Fischedick, G. Hiriart, O. Hohmeyer, K. G. T. Hollands, J. Huckerby, S. Kadner, Å. Killingtveit, A. Kumar, A. Lewis, O. Lucon, P. Matschoss, L. Maurice, M. Mirza, C. Mitchell, W. Moomaw, J. Moreira, L. J. Nilsson, J. Nyboer, R. Pichs-Madruga, J. Sathaye, J. Sawin, R. Schaeffer, T. Schei, S. Schlömer, K. Seyboth, R. Sims, G. Sinden, Y. Sokona, C. von Stechow, J. Steckel, A. Verbruggen, R. Wiser, F. Yamba et T. Zwickel, 2011: Résumé technique. In: Rapport spécial du GIEC sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation des effets des changements climatiques [sous la direction de O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer et C. von Stechow], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique

Sommaire

1. Vue d'ensemble des changements climatiques et des énergies renouvelables 33

1.1 Contexte 33

1.2 Résumé concernant les ressources énergétiques renouvelables et leur potentiel 37

1.3 Satisfaction des besoins en matière de services énergétiques et situation actuelle 40

1.4 Opportunités, obstacles et problèmes 40

1.5 Rôle des politiques, de la recherche-développement, de la mise en valeur et des stratégies de mise en œuvre 44

2. La bioénergie 46

2.1 Introduction à la biomasse et à la bioénergie 46

2.2 Potentiel des ressources en bioénergie 46

2.3 Technologies et applications de la bioénergie 48

2.4 Situation mondiale et régionale des marchés et de la mise en valeur à l'échelon industriel 49

2.5 Incidences environnementales et sociales 50

2.6 Perspectives d'amélioration et d'intégration des technologies 53

2.7 Coûts actuels et tendances 54

2.8 Niveaux de mise en valeur potentiels 56

3. Énergie solaire directe 60

3.1 Introduction 60

3.2 Potentiel de la ressource 60

3.3 Technologies et applications 60

3.4 Situation du marché mondial et régional et utilisation industrielle 63

3.5 Intégration dans un système énergétique élargi 65

3.6 Impacts environnementaux et sociaux 66

3.7 Perspectives en matière d'améliorations technologiques et d'innovations 67
3.8 Tendances en matière de coûts 68
3.9 Mise en valeur potentielle 71

4. L'énergie géothermique 73

4.1 Introduction 73
4.2 Potentiel de la ressource 73
4.3 Technologies et applications 74
4.4 Situation du marché mondial et régional et évolution de l'industrie 74
4.5 Impacts environnementaux et sociaux 76
4.6 Perspectives en matière d'amélioration, d'innovation et d'intégration des technologies 77
4.7 Tendances en matière de coûts 78
4.8 Potentiel de mise en valeur 80

5. L'énergie hydroélectrique 80

5.1 Introduction 80
5.2 Potentiel des ressources 80
5.3 Technologie et applications 82
5.4 Situation mondiale et régionale du marché et développement de l'industrie 82
5.5 Intégration dans des systèmes énergétiques plus vastes 83
5.6 Incidences écologiques et sociales 84
5.7 Perspectives d'amélioration et d'innovation des technologies 85
5.8 Tendances en matière de coûts 86

5.9 Potentiel de mise en valeur 87

5.10 Intégration dans des systèmes de gestion des ressources en eau 87

6. L'énergie marine 88

6.1 Introduction 88

6.2 Potentiel énergétique 89

6.3 Technologies et applications 90

6.4 État du marché et développement du secteur à l'échelle mondiale et régionale 92

6.5 Incidences sur la société et l'environnement 93

6.6 Perspectives d'amélioration, d'innovation et d'intégration technologiques 94

6.7 Évolution des coûts 95

6.8 Potentiel de mise en valeur 95

7. L'énergie éolienne 95

7.1 Introduction 95

7.2 Potentiel 96

7.3 Technologie et applications 97

7.4 État du marché et développement du secteur à l'échelle mondiale et régionale 98

7.5 Problèmes à court terme concernant l'intégration au réseau 99

7.6 Conséquences environnementales et sociales 100

7.7 Perspectives d'améliorations et d'innovations technologiques 101

7.8 Évolution des coûts 103

7.9 Potentiel de mise en valeur 104

8. Intégration des énergies renouvelables dans les systèmes énergétiques actuels et à venir .. 104

8.1 Introduction 104

8.2 Intégration des énergies renouvelables dans les systèmes d'alimentation électrique 107

8.3 Intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de chauffage et de refroidissement 111

8.4 Intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution de gaz 112

8.5 Intégration des énergies renouvelables dans les combustibles liquides 113

8.6 Intégration des énergies renouvelables dans les systèmes autonomes 113

8.7 Les secteurs d'utilisation finale: éléments stratégiques pour trouver des voies de transition 114

9. Les énergies renouvelables dans le contexte d'un développement durable 120

9.1 Introduction 120

9.2 Interactions du développement durable et des énergies renouvelables 120

9.3 Incidences sociales, environnementales et économiques: évaluation mondiale et régionale 120

9.4 Incidences des voies de développement durable sur les énergies renouvelables 127

9.5 Obstacles aux énergies renouvelables et possibilités offertes par ces énergies dans le cadre d'un développement durable ... 129

9.6 Synthèse, lacunes dans les connaissances et besoins futurs en matière de recherche 130

10. Potentiel et coûts des mesures d'atténuation 131

10.1 Introduction 131

10.2 Synthèse des scénarios d'atténuation pour différentes stratégies en matière d'énergies renouvelables 131

10.3 Évaluation de scénarios d'atténuation représentatifs pour différentes stratégies en matière d'énergies renouvelables ... 134

10.4 Courbes des coûts régionaux des mesures d'atténuation fondées sur la mise en valeur des sources d'énergie renouvelable . 138

10.5 Coûts de la commercialisation et de l'utilisation 141

10.6 Coûts et avantages sociaux et environnementaux 146

11. Politiques, financement et mise en œuvre 147

11.1 Introduction 147

11.2 Tendances actuelles sur le plan des politiques, du financement et des investissements 148

11.3 Éléments moteurs clés, opportunités et avantages 150

11.4 Obstacles à l'adoption de politiques en matière d'énergies renouvelables, à leur mise en œuvre et à leur financement 150

11.5 Expérience concernant les options en matière de politiques et évaluation 150

11.6 Conditions favorables et questions régionales 155

11.7 Évolution structurelle 158

1. Vue d'ensemble des changements climatiques et des énergies renouvelables

1.1 Contexte

Toutes les sociétés ont besoin de services énergétiques pour répondre aux besoins humains fondamentaux (éclairage, cuisson des aliments, confort des espaces, mobilité, communications, etc.) et pour assurer les processus de production. Aux fins d'un développement durable, la prestation de services énergétiques doit être assurée sans incidences néfastes sur l'environnement. Un développement économique et social durable exige un accès sûr et peu coûteux aux ressources énergétiques nécessaires pour fournir des services énergétiques essentiels et viables. Cela peut conduire à l'application de différentes stratégies à diverses étapes du développement économique. Pour ne pas nuire à l'environnement, les services énergétiques doivent avoir de faibles incidences sur le milieu et entraîner peu d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Toutefois, selon le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, les combustibles fossiles représentaient 85 %[1] de l'énergie primaire totale en 2004 tout comme en 2008. En outre, la combustion de combustibles fossiles était à l'origine de 56,6 % de l'ensemble des émissions de GES d'origine humaine ($éqCO_2$)[2] en 2004. [1.1.1, 9.2.1, 9.3.2, 9.6, 11.3]

Les sources d'énergie renouvelable (ÉR) jouent un rôle dans la prestation durable de services énergétiques et, en particulier, dans l'atténuation des effets du changement climatique. Le présent Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation des effets des changements climatiques étudie l'apport et le potentiel actuels des sources d'ÉR à la prestation de services énergétiques en vue d'un développement économique et social durable. Il inclut des évaluations des ressources et des technologies disponibles pour ce qui concerne les ÉR, des coûts et des avantages connexes, des obstacles qui s'opposent à leur application à grande échelle et des besoins en matière d'intégration, des scénarios futurs et des politiques envisageables. Il présente en particulier des informations à l'intention des décideurs, du secteur privé et de la société civile à propos des points suivants:

- Recensement des ressources énergétiques renouvelables et des technologies disponibles et incidences des changements climatiques sur ces ressources [chapitres 2 à 7];
- État actuel des technologies et du marché, perspectives et rythme prévu de mise en place [chapitres 2 à 7 et 10];
- Options et contraintes de l'intégration dans le système d'approvisionnement en énergie et d'autres marchés, y compris le stockage de l'énergie, les modes de transport, l'intégration dans les systèmes existants et autres options [chapitre 8];
- Liens entre la croissance des ÉR, les opportunités et le développement durable [chapitre 9];
- Répercussions sur la sûreté de l'approvisionnement énergétique [chapitre 9];
- Coûts, avantages, risques et incidences économiques et environnementaux de la mise en valeur des ÉR [chapitres 9 et 10];
- Potentiel d'atténuation des ressources énergétiques renouvelables [chapitre 10];
- Scénarios démontrant comment on peut accélérer la mise en valeur de façon durable [chapitre 10];
- Renforcement des capacités, transfert de technologie et financement [chapitre 11];
- Options stratégiques, résultats et conditions d'efficacité [chapitre 11].

Le Rapport comprend 11 chapitres. Le chapitre 1 présente les ÉR et les changements climatiques, les chapitres 2 à 7 donnent des informations sur six technologies faisant appel aux ÉR et les chapitres 8 à 11 portent sur des questions d'intégration (figure TS.1.1). Le Rapport indique le degré d'incertitude, le cas échéant[3]. Le présent Résumé technique donne un aperçu du Rapport, dont il résume les principales conclusions.

Le Résumé technique ayant à peu près la même structure que le Rapport complet, les références aux divers chapitres et sections concernés sont indiquées par les numéros des chapitres et sections correspondants placés entre crochets. On trouvera à l'annexe I une explication des termes, des abréviations et des symboles chimiques utilisés dans le présent résumé ; à l'annexe II, les conventions et les méthodes utilisées pour déterminer les coûts, l'énergie primaire et d'autres éléments à analyser ; et à l'annexe III, des informations sur le coût moyen actualisé des ÉR.

Les émissions de GES associées à la prestation de services énergétiques sont une cause majeure d'évolution du climat. Le quatrième Rapport d'évaluation a conclu que «la plus grande partie de l'augmentation observée de la température moyenne mondiale depuis la moitié du XXe siècle est très probablement imputable à l'accroissement observé de la concentration de GES d'origine humaine». Depuis la publication de ce rapport, cette concentration a continué de croître jusqu'à dépasser, fin 2010, 390 ppm de dioxyde de carbone (CO_2), soit 39 % au-dessus des niveaux préindustriels. Depuis 1850 environ, l'exploitation mondiale de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) a augmenté jusqu'à assurer l'essentiel de l'approvisionnement en énergie, ce qui a entraîné un accroissement rapide des émissions de CO_2 [figure 1.6]. La quantité de carbone présent dans les réserves et ressources de combustibles fossiles non encore brûlées [figure 1.7] a le potentiel, s'il est brûlé dans les siècles à venir, de rejeter de fortes quantités de CO_2 dans l'atmosphère qui dépasseraient les valeurs extrêmes de tous les scénarios envisagés dans le quatrième Rapport d'évaluation [figure 1.5] ou dans le chapitre 10 du présent Rapport. [1.1.3, 1.1.4]

Malgré l'important processus de décarbonisation associé, la grande majorité des projections en cas de non-intervention indiquent, pour 2100, des émissions beaucoup plus élevées qu'en 2000, donnant lieu à une concentration croissante de GES et, partant, à une augmentation de la température moyenne du globe. Pour éviter de telles répercussions défavorables des changements climatiques sur les ressources en eau, les écosystèmes, la sécurité alimentaire, la santé et

1 Le quatrième Rapport d'évaluation parle de 80 %, pourcentage qui a été converti par suite du remplacement de la méthode du contenu physique pour la comptabilité de l'énergie par la méthode de l'équivalent direct, qui est utilisée dans le présent rapport. On trouvera des détails sur la méthodologie employée dans la section 1.1.9 et l'annexe II (section A.II.4).

2 Les apports d'autres sources et/ou gaz sont les suivants: CO_2 émanant du déboisement, de la décomposition de la biomasse, etc. (17,3 %); CO_2 émanant d'autres sources (2,8 %); CH_4 (14,3 %); N_2O (7,9 %); et gaz fluorés (1,1 %).

3 Le Rapport prend en compte l'incertitude, par exemple en montrant les résultats d'analyses de sensibilité et en présentant quantitativement les fourchettes des coûts et des résultats des scénarios. Le Rapport n'emploie pas la terminologie officielle du GIEC concernant l'incertitude, car au moment de son approbation, les indications relatives à l'incertitude étaient en cours de révision.

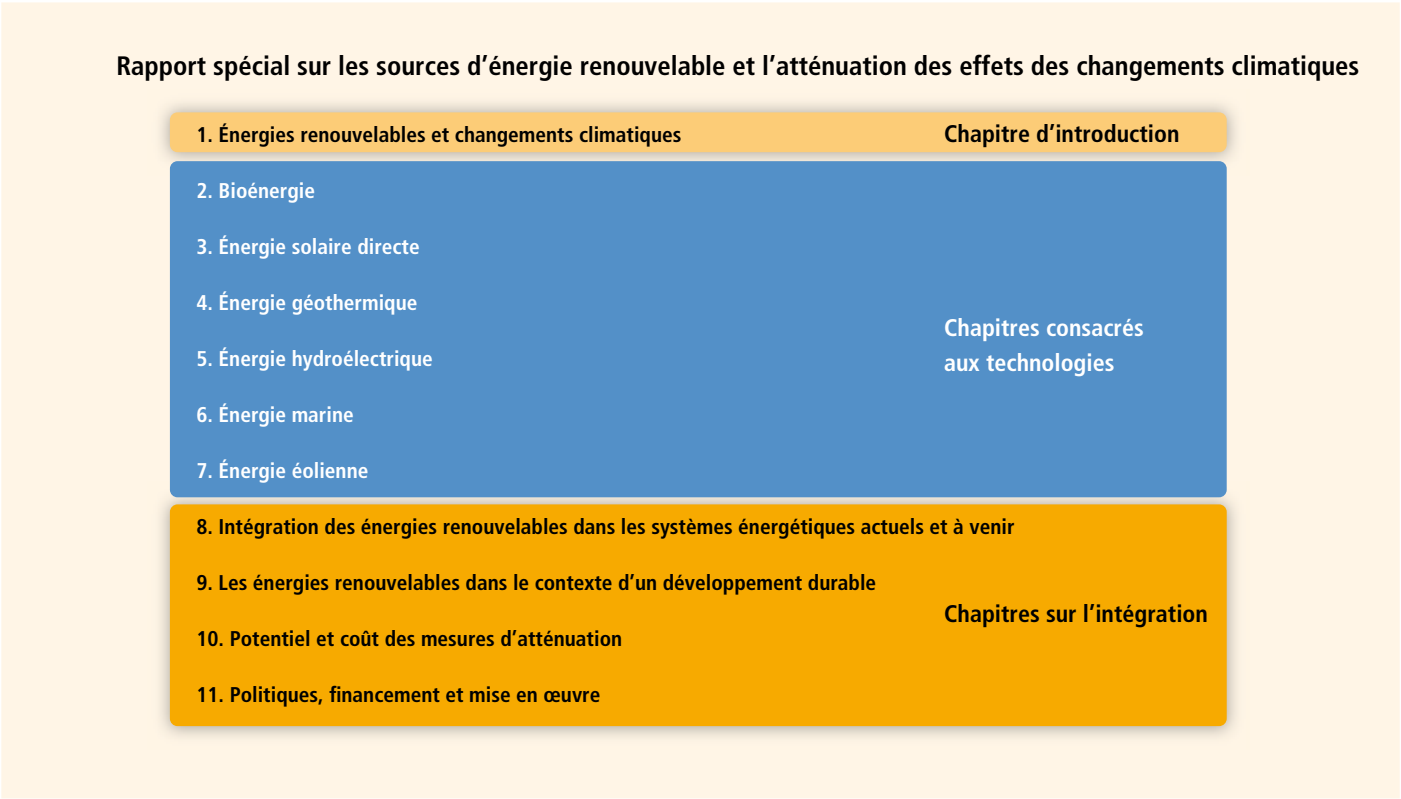


Figure TS.1.1 | Structure du Rapport. [Figure 1.1]

les populations côtières, avec des changements abrupts et potentiellement irréversibles pour le système climatique, les accords de Cancún préconisent une limitation de la hausse de la température moyenne à l'échelle du globe à un maximum de 2 °C au-dessus des valeurs préindustrielles et conviennent d'envisager de limiter cette hausse à 1,5 °C. Pour être sûr que la hausse de la température à l'équilibre n'excède pas 2 à 2,4 °C, la concentration de GES dans l'atmosphère devrait être stabilisée entre 445 et 490 ppm éqCO_2. Cela suppose que, d'ici 2050, les émissions mondiales de CO_2 diminuent de 50 à 85 % par rapport aux niveaux de 2000 et qu'elles commencent à décroître (au lieu de continuer à augmenter comme maintenant) en 2015 au plus tard. [1.1.3]

Afin de mettre au point des stratégies de réduction des émissions de CO_2, on peut employer l'équation de Kaya pour décomposer les émissions de CO_2 liées à l'énergie en quatre facteurs: 1) la population, 2) le produit intérieur brut (PIB) par habitant, 3) l'intensité énergétique (l'approvisionnement en énergie primaire total (AÉPT)) par rapport au PIB) et 4) l'intensité en carbone (émissions de CO_2 par rapport à l'AÉPT). [1.1.4]

Émissions de CO_2 = population x (PIB/population) x (AÉPT/PIB) x (CO_2/AÉPT)

L'évolution annuelle de ces quatre éléments est illustrée à la figure TS.1.2. [1.1.4]

Alors que le PIB par habitant et la croissance démographique sont les facteurs qui ont eu l'effet le plus important sur l'augmentation des émissions au cours des décennies précédentes, la diminution de l'intensité énergétique a sensiblement ralenti cette augmentation de 1971 à 2008. Par le passé, l'intensité en carbone a chuté grâce à l'amélioration du rendement énergétique, au passage du charbon au gaz naturel et au développement de l'énergie nucléaire dans les années 70 et 80, impulsé en particulier par les pays visés à l'annexe I[4]. Ces dernières années (2000 à 2007), l'augmentation de l'intensité en carbone a été due essentiellement à l'usage accru du charbon dans les pays développés et en développement, bien que l'emploi du charbon et du pétrole ait légèrement diminué depuis 2007. En 2008, cette tendance s'est inversée en raison de la crise financière. Depuis le début des années 2000, l'approvisionnement en énergie s'est caractérisé par une plus grande intensité en carbone, ce qui a amplifié l'augmentation résultant de la croissance du PIB par habitant. [1.1.4]

Sur le plan mondial, on estime que les ÉR ont représenté, en 2008, 12,9 % des 492 EJ correspondant à l'approvisionnement total en énergie primaire. La source d'ÉR la plus importante a été la biomasse (10,2 %), la majorité (environ 60 %) des combustibles issus de la biomasse ayant servi à des applications traditionnelles – cuisson des aliments et chauffage dans les pays en développement –, bien que l'utilisation de la biomasse moderne ait augmenté rapidement[5]. L'énergie hydroélectrique a représenté 2,3 % des ÉR, alors que les autres sources d'ÉR ont représenté 0,4 % (figure TS.1.3). En 2008, les ÉR ont contribué pour environ 19 % à l'approvisionnement mondial en électricité (énergie hydroélectrique: 16 %; autres sources d'ÉR: 3 %). [1.1.5]

La mise en valeur des ÉR a progressé rapidement ces dernières années. Dans la plupart des cas, l'augmentation de la part des ÉR dans l'éventail des sources d'énergie va exiger des politiques destinées à stimuler cette évolution du

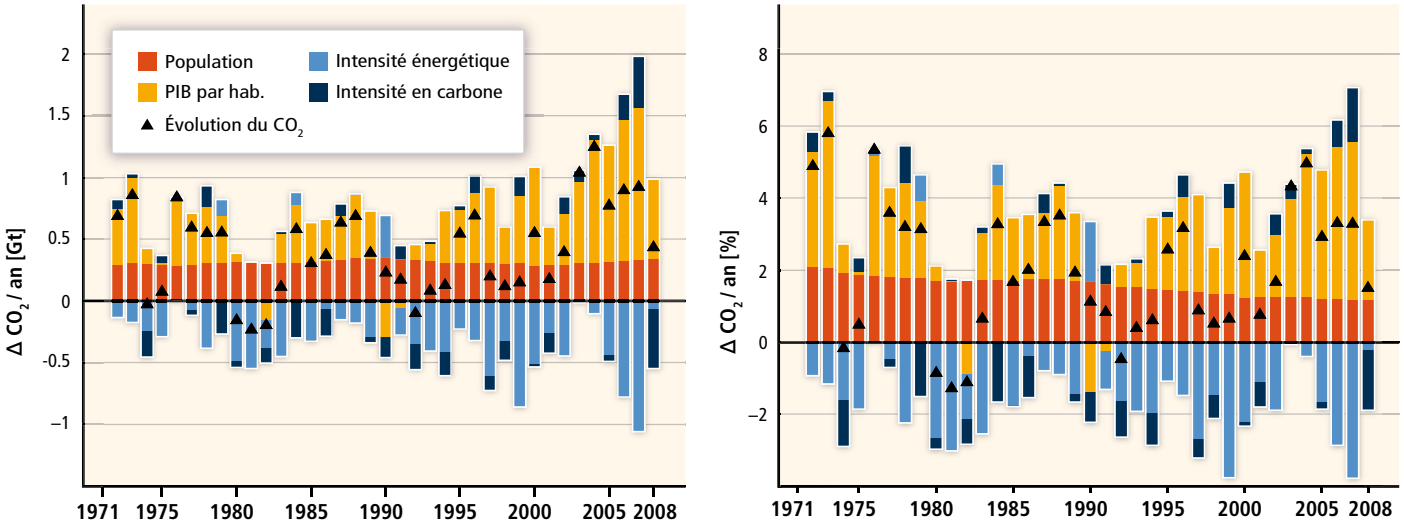


Figure TS.1.2 | Décomposition de l'évolution annuelle absolue (à gauche) et du taux annuel de croissance (à droite) des émissions mondiales de CO_2 liées à l'énergie selon les facteurs de l'équation de Kaya: population (rouge), PIB par habitant (orange), intensité énergétique (bleu clair) et intensité en carbone (bleu foncé) de 1971 à 2008. Les couleurs indiquent les changements qui se produiraient sous l'effet de chaque facteur pris isolément, les autres facteurs restant constants. Les changements annuels totaux sont indiqués par un triangle noir. [Figure 1.8]

système énergétique. Les politiques gouvernementales, la diminution du coût de nombreuses technologies concernant les énergies renouvelables (ou technologies ÉR), l'évolution du prix des combustibles fossiles et d'autres facteurs ont contribué à l'augmentation continue de l'emploi des ÉR. Si la part des ÉR reste relativement modeste, leur développement s'est accéléré au cours des dernières années, comme l'indique la figure TS.1.4. En 2009, malgré les problèmes financiers mondiaux, la capacité en matière d'ÉR a continué de croître rapidement: énergie éolienne (32 %, 38 GW de plus), énergie hydroélectrique (3 %, 31 GW de plus), énergie photovoltaïque reliée au réseau (53 %, 7,5 GW de plus), énergie géothermique (4 %, 0,4 GW de plus) et énergie solaire pour la production d'eau chaude et le chauffage (21 %, 31 GW_{th} de plus). Les biocarburants ont représenté 2 % de la demande mondiale de carburants pour les transports routiers en 2008 et près de 3 % en 2009. La production annuelle d'éthanol est passée à 1,6 EJ (76 milliards de litres) fin 2009 et la production de biogazole à 0,6 EJ (17 milliards de litres). Sur les 300 GW environ de capacité supplémentaire de production d'électricité relevée mondialement de 2008 à 2009, 140 GW environ provenaient des ÉR. Collectivement, les pays en développement disposent de 53 % de la capacité mondiale de production d'électricité provenant d'ÉR (y compris toutes les formes d'énergie hydroélectrique), la Chine ayant accru davantage sa capacité de production d'ÉR que tout autre pays en 2009. Les États-Unis d'Amérique et le Brésil

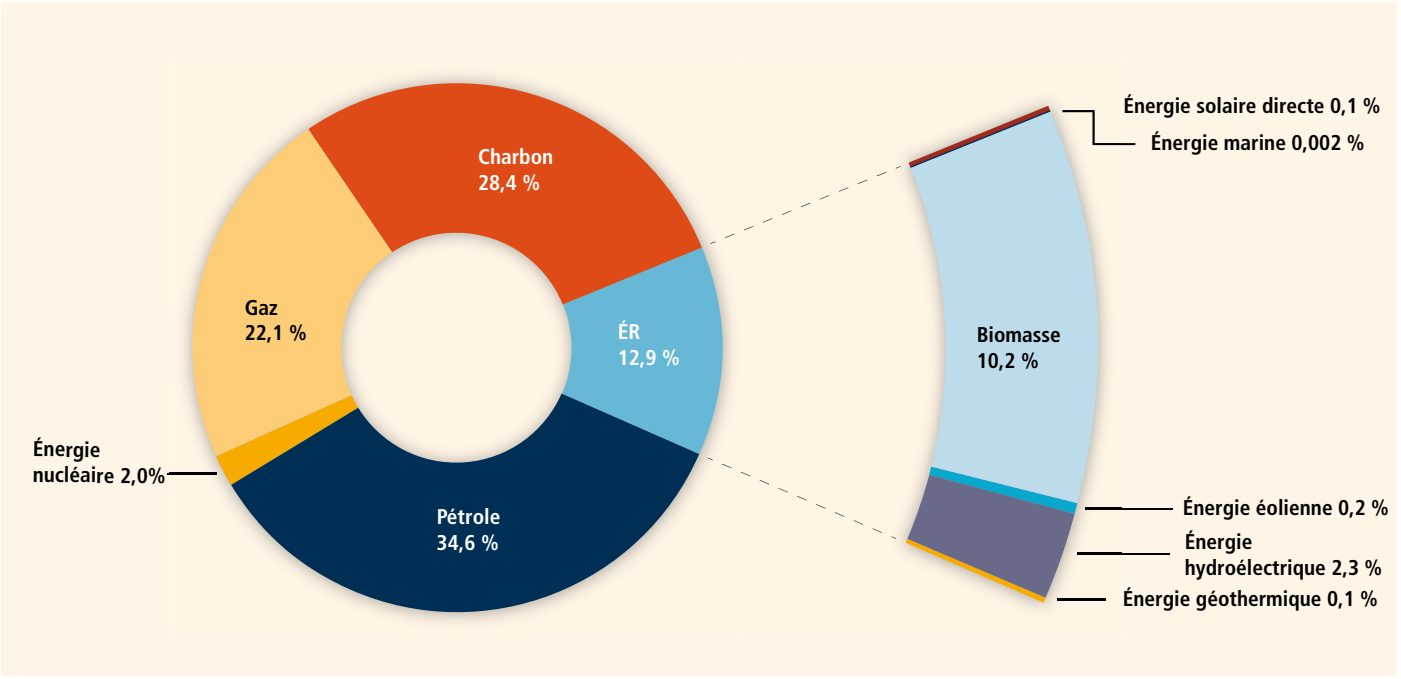


Figure TS.1.3 | Proportion des diverses sources d'énergie dans l'approvisionnement mondial total en énergie primaire en 2008 (492 EJ). La biomasse moderne représente 38 % de la part totale de la biomasse. [Figure 1.10]

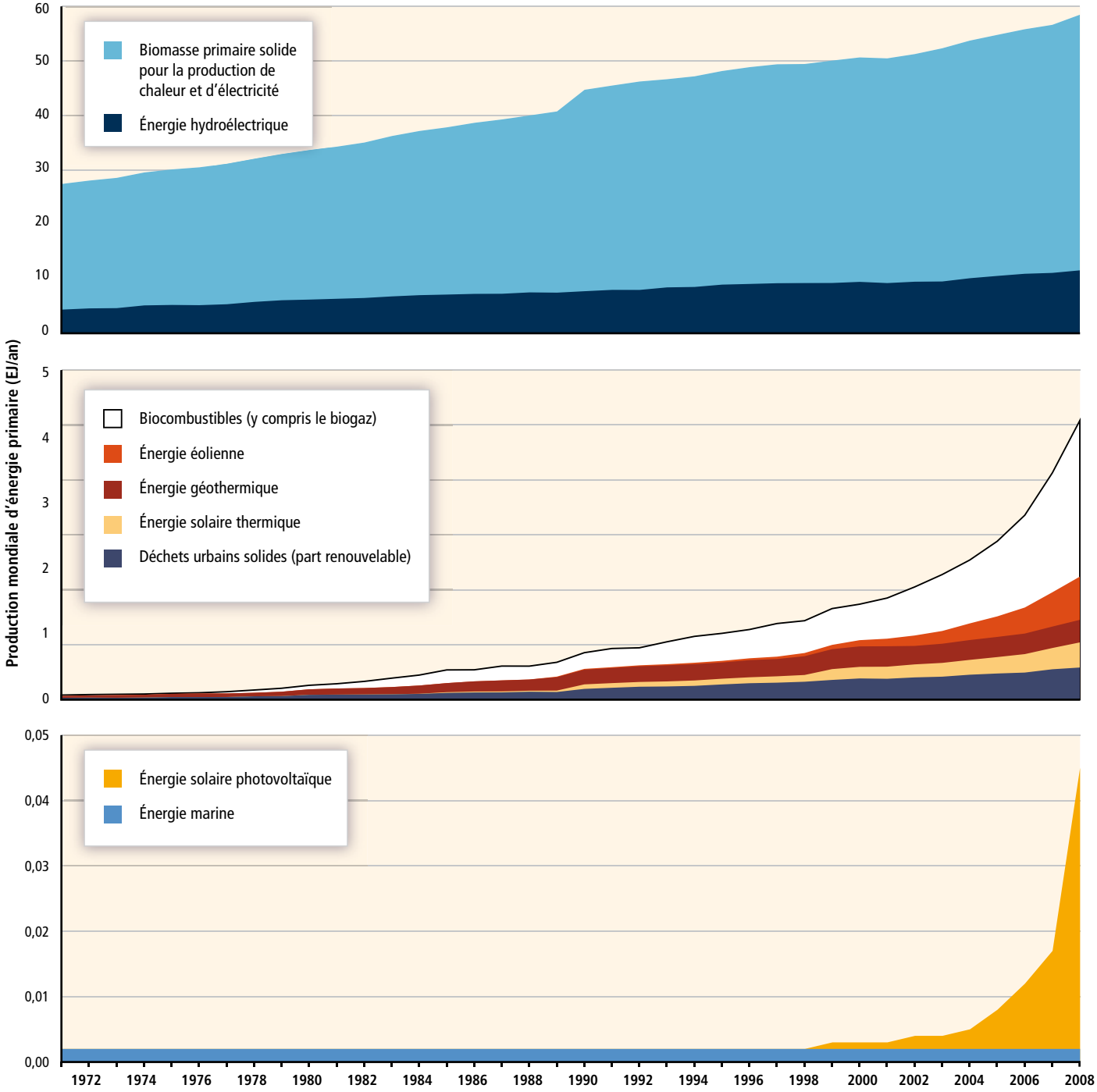


Figure TS.1.4 | Évolution historique de la production mondiale d'énergie primaire émanant de sources d'énergie renouvelable de 1971 à 2008. [Figure 1.12]

Note: Les technologies renvoient à des unités verticales distinctes à des fins de présentation uniquement. Les données sous-jacentes à la figure ont été converties selon la méthode de l'«équivalent direct» pour prendre en compte la production d'énergie primaire [1.1.9, annexe II.4], sauf que le contenu énergétique des biocombustibles est indiqué selon l'énergie secondaire (la biomasse primaire utilisée pour produire des biocombustibles étant plus élevée en raison de pertes lors de la conversion) [2.3, 2.4].

ont produit respectivement 54 et 35 % du bioéthanol produit mondialement en 2009, alors que la Chine occupait la première place en matière d'utilisation d'eau chaude solaire. Fin 2009, les ÉR utilisées pour la production d'eau chaude et le chauffage incluaient la biomasse moderne (270 GW_{th}), l'énergie solaire (180 GW_{th}) et l'énergie géothermique (60 GW_{th}). L'emploi des ÉR (à l'exclusion de la biomasse traditionnelle) pour répondre aux besoins en énergie des zones rurales a également augmenté, incluant des centrales hydroélectriques à petite échelle, diverses solutions faisant appel à la biomasse moderne et des systèmes photovoltaïques, éoliens ou hybrides associant de multiples technologies au niveau des ménages ou des villages. [1.1.5]

Il existe de nombreux moyens de réduire les émissions de GES émanant du système énergétique tout en fournissant les services énergétiques souhaités. On a recensé, dans le quatrième Rapport d'évaluation, diverses façons de diminuer les émissions émanant de sources d'énergie qui retiennent la chaleur tout en fournissant des services énergétiques requis [1.1.6]:

- Améliorer l'efficacité de la conversion, du transport et de la distribution de l'énergie côté offre, notamment en combinant production de chaleur et d'électricité;
- Améliorer l'efficacité côté demande dans les secteurs et applications appropriés (bâtiments, procédés industriels et agricoles, transports, chauffage, refroidissement, éclairage, etc.);
- Passer des vecteurs énergétiques gros producteurs de GES tels que le charbon et le pétrole à des vecteurs énergétiques faibles producteurs de GES tels que le gaz naturel, les combustibles nucléaires et les sources d'ÉR;
- Recourir au captage et au stockage du carbone pour éviter que le CO_2 issu de la postcombustion ou de procédés industriels se propage dans l'atmosphère, cette technologie offrant la possibilité d'éliminer le CO_2 de l'atmosphère lorsque la biomasse est traitée, par exemple par combustion ou fermentation;
- Changer de comportement de façon à mieux gérer l'exploitation de l'énergie ou à utiliser moins de biens et de services à forte intensité de carbone et d'énergie.

À l'avenir, la part des applications des ÉR va dépendre fortement des objectifs en matière d'atténuation des effets des changements climatiques, de l'importance des services énergétiques nécessaires et des besoins résultants en matière d'énergie, ainsi que de leurs avantages relatifs dans l'éventail des technologies peu ou pas gourmandes en carbone (figure TS.1.5). Une évaluation globale de l'ensemble des mesures d'atténuation envisageables nécessiterait une évaluation de leur potentiel d'atténuation respectif, des risques associés, de leur coût et de leur contribution à un développement durable. [1.1.6]

Pour établir un objectif de protection du climat sous forme d'évolution admissible de la température moyenne à la surface du globe, il faut en gros définir une limite correspondante de la concentration de GES avec un bilan associé du CO_2 et la trajectoire ultérieure des émissions en fonction du temps, ce qui permet alors de définir la quantité admissible de combustibles fossiles rejetant librement des émissions. La contribution complémentaire d'énergies à émission de carbone faible ou nulle à l'approvisionnement en énergie primaire subit l'influence de l'«échelle» des services énergétiques requis. [1.1.6]

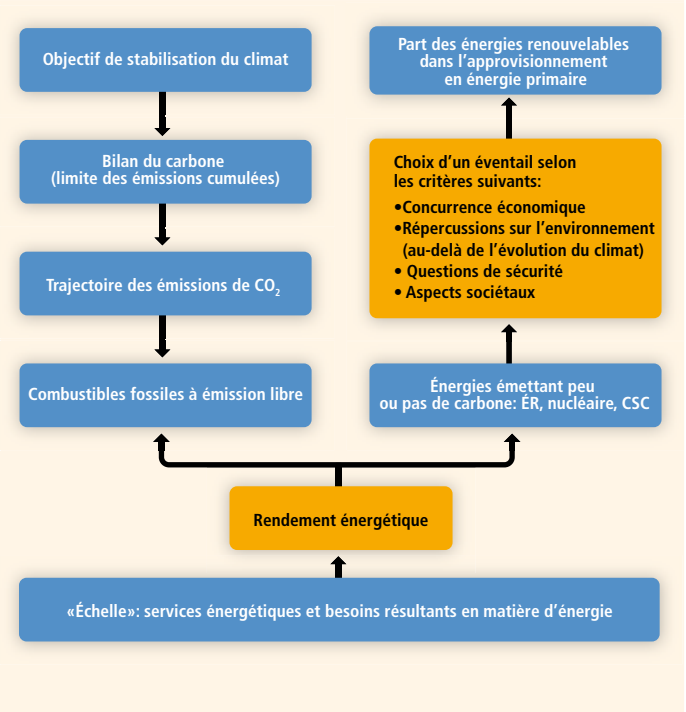


Figure TS.1.5 | Rôle des énergies renouvelables dans l'éventail des options d'atténuation émettant peu ou pas de carbone (description qualitative). [Figure 1.14]

Comme de nombreuses solutions à bas prix visant à améliorer le rendement énergétique global sont déjà intégrées dans les scénarios ne supposant aucune intervention, les possibilités supplémentaires de réduire l'intensité énergétique afin d'atténuer les effets des changements climatiques sont limitées. Pour qu'on atteigne des objectifs ambitieux en matière de protection du climat, les seules améliorations du rendement énergétique ne suffisent pas, et il faut mettre en œuvre d'autres technologies émettant peu ou pas de carbone. La part des ÉR dans cet éventail des technologies à faible émission de carbone dépend largement de la concurrence économique entre ces technologies, d'une comparaison de la charge environnementale relative (au-delà de l'évolution du climat) qui leur est associée ainsi que des questions de sécurité et des aspects sociétaux (figure TS.1.5). [1.1.6]

Il existe déjà un vaste ensemble de connaissances scientifiques concernant les ÉR et leur contribution possible aux objectifs de réduction des émissions de GES, qui sont réunies et évaluées dans le présent rapport. Toutefois, compte tenu notamment de la variabilité des ÉR selon l'endroit considéré, de la diversité des technologies ÉR, des besoins multiples en matière de services énergétiques que ces technologies peuvent satisfaire au stade de l'utilisation finale, de l'ensemble des marchés et dispositions réglementaires régissant leur intégration et de la complexité des changements de système énergétique, les connaissances concernant les ÉR et leur potentiel d'atténuation des effets des changements climatiques continuent de progresser. D'autres connaissances concernant les ÉR et leur rôle possible dans la réduction des émissions de GES doivent être encore acquises dans un certain nombre de secteurs d'envergure [1.1.8]:

- Coût et calendrier à venir de la mise en valeur des ÉR;
- Potentiel technique réalisable pour les ÉR à toutes les échelles géographiques;
- Problèmes techniques et institutionnels et coût de l'intégration des diverses technologies ÉR dans les systèmes énergétiques et sur les marchés de l'énergie;
- Évaluations d'ensemble des aspects socioéconomiques et environnementaux des technologies ÉR et des autres technologies énergétiques;
- Possibilités de répondre aux besoins des pays en développement grâce à des services viables concernant les ÉR;
- Mécanismes réglementaires, institutionnels et financiers permettant la mise en valeur à bas coût des ÉR dans des contextes très divers.

Bien qu'on en sache déjà beaucoup dans chacun de ces secteurs, comme en fait état le présent rapport, des recherches et une expérience complémentaires permettraient de réduire encore les incertitudes et de faciliter ainsi la prise de décision concernant l'emploi des ÉR pour atténuer les effets du changement climatique. [1.1.6]

1.2 Résumé concernant les ressources énergétiques renouvelables et leur potentiel

Par énergie renouvelable, on entend toute forme d'énergie d'origine solaire, géophysique ou biologique qui se reconstitue par des processus naturels à un rythme

égal ou supérieur à son taux d'utilisation. L'énergie renouvelable est obtenue à partir des flux d'énergie continus ou répétitifs qui se produisent dans le milieu naturel et comprend des ressources telles que la biomasse, l'énergie solaire, l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique, les marées et les vagues, l'énergie thermique des océans et l'énergie éolienne. Il est possible toutefois d'exploiter la biomasse plus vite qu'elle ne se renouvelle ou d'extraire de la chaleur d'un gisement géothermique plus vite que les flux de chaleur ne peuvent le reconstituer. Par ailleurs, le taux d'utilisation de l'énergie solaire directe n'a aucune incidence sur le rythme auquel elle atteint la Terre. Les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) ne répondent pas à cette définition du fait qu'ils ne se renouvellent pas dans un délai suffisamment court par rapport à leur taux d'utilisation. [1.2.1]

Il existe un processus en plusieurs étapes par lequel l'énergie primaire est convertie en vecteur d'énergie, puis en service énergétique. Les technologies ÉR sont diverses et peuvent répondre à l'ensemble des besoins en matière de services énergétiques. Divers types d'ÉR peuvent fournir de l'électricité, de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique et produire des combustibles susceptibles de satisfaire de nombreux besoins en matière de services énergétiques. La figure TS.1.6 illustre les processus de transformation en plusieurs étapes. [1.2.1]

Comme c'est de services énergétiques et non d'énergie dont ont besoin les populations, le processus devrait être géré d'une façon efficace, ce qui exige une moindre consommation d'énergie primaire grâce à des technologies à faible intensité de carbone qui réduisent au minimum les émissions de CO_2. Les procédés de conversion thermique permettant de produire de l'électricité (notamment à partir de la biomasse et de l'énergie géothermique) connaissent des pertes de 40 à 90 % environ, et la production de l'énergie mécanique nécessaire aux transports au moyen de moteurs à combustion interne occasionne des pertes de 80 % environ. Ces pertes dues à la conversion augmentent la part de l'énergie primaire issue des combustibles fossiles pour produire de l'électricité et de l'énergie mécanique à partir de chaleur. La conversion directe en électricité de l'énergie issue du photovoltaïque solaire, de l'énergie hydroélectrique, de l'énergie marine et de l'énergie éolienne n'entraîne pas de pertes dues au cycle thermodynamique (transformation de la chaleur en travail), bien qu'elle souffre d'autres manques d'efficacité liés à l'extraction de l'énergie nécessaire des flux naturels d'énergie, lesquels manques peuvent être aussi relativement importants et irréductibles (chapitres 2-7). [1.2.1]

Certaines technologies ÉR peuvent être mises en œuvre à l'endroit où elles sont utilisées (technologies décentralisées), en milieu rural ou urbain, alors que d'autres sont employées surtout dans de grands réseaux d'énergie (technologies centralisées). Bien que de nombreuses technologies ÉR soient maîtrisées sur le plan technique et mises en valeur à grande échelle, d'autres en sont à une étape moins avancée de maturité technique et de mise en valeur commerciale. [1.2.1]

Le potentiel théorique des ÉR est de loin supérieur à la demande mondiale d'énergie actuelle et anticipée, mais le défi consiste à maîtriser et exploiter une part assez importante de ce potentiel pour offrir les services énergétiques voulus de façon rentable et sans porter atteinte à l'environnement. [1.2.2]

Le potentiel technique mondial des sources d'ÉR ne va pas limiter la croissance continue du marché. Si un grand nombre d'estimations ont été publiées, des

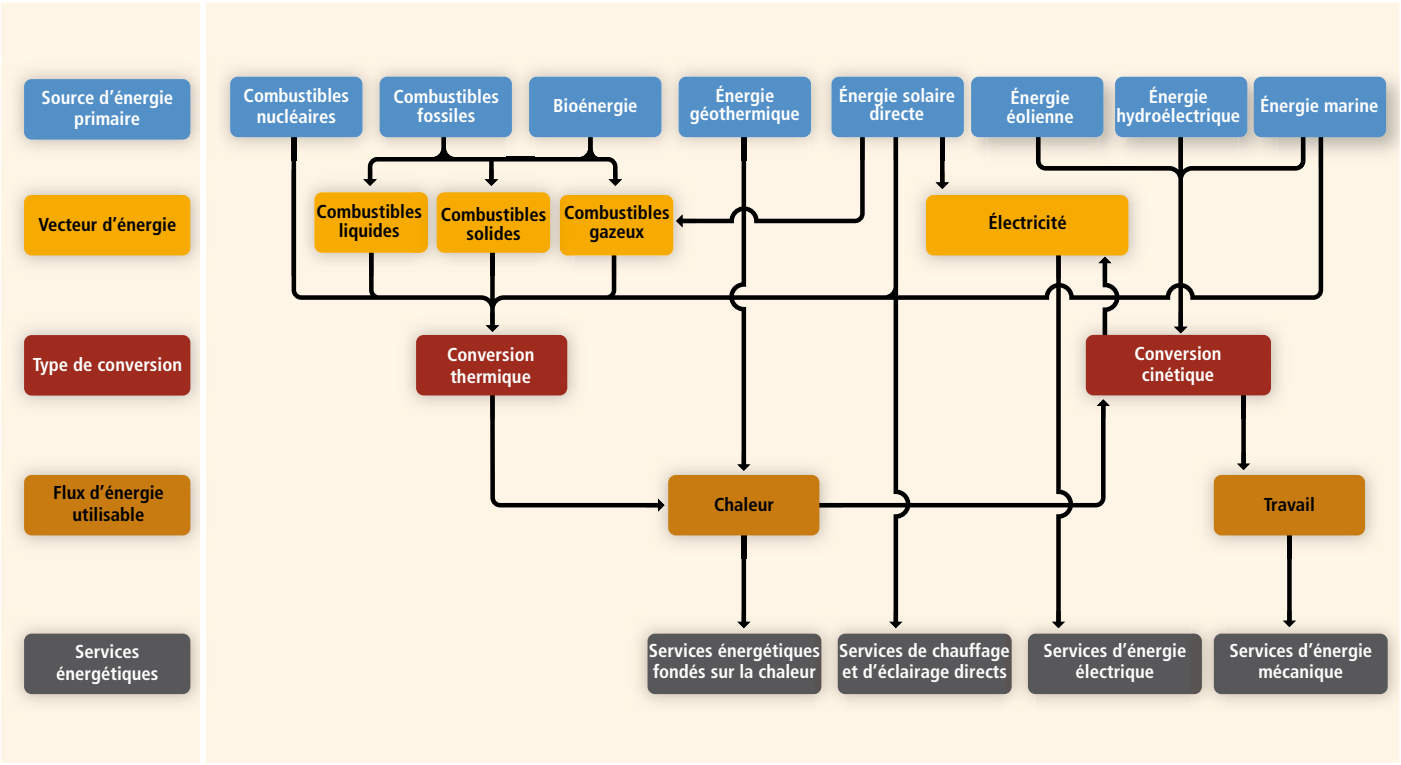


Figure TS.1.6 | Illustration du cheminement de l'énergie depuis la source jusqu'aux services. Toutes les connexions indiquent les filières énergétiques possibles. Les services énergétiques proposés aux utilisateurs peuvent être assurés au moyen de quantités différentes d'énergie pour utilisation finale. Cette énergie peut être fournie au moyen de quantités plus ou moins grandes d'énergie primaire de diverses sources et avec des émissions différentes de CO_2 et différents effets sur l'environnement. [Figure 1.16]

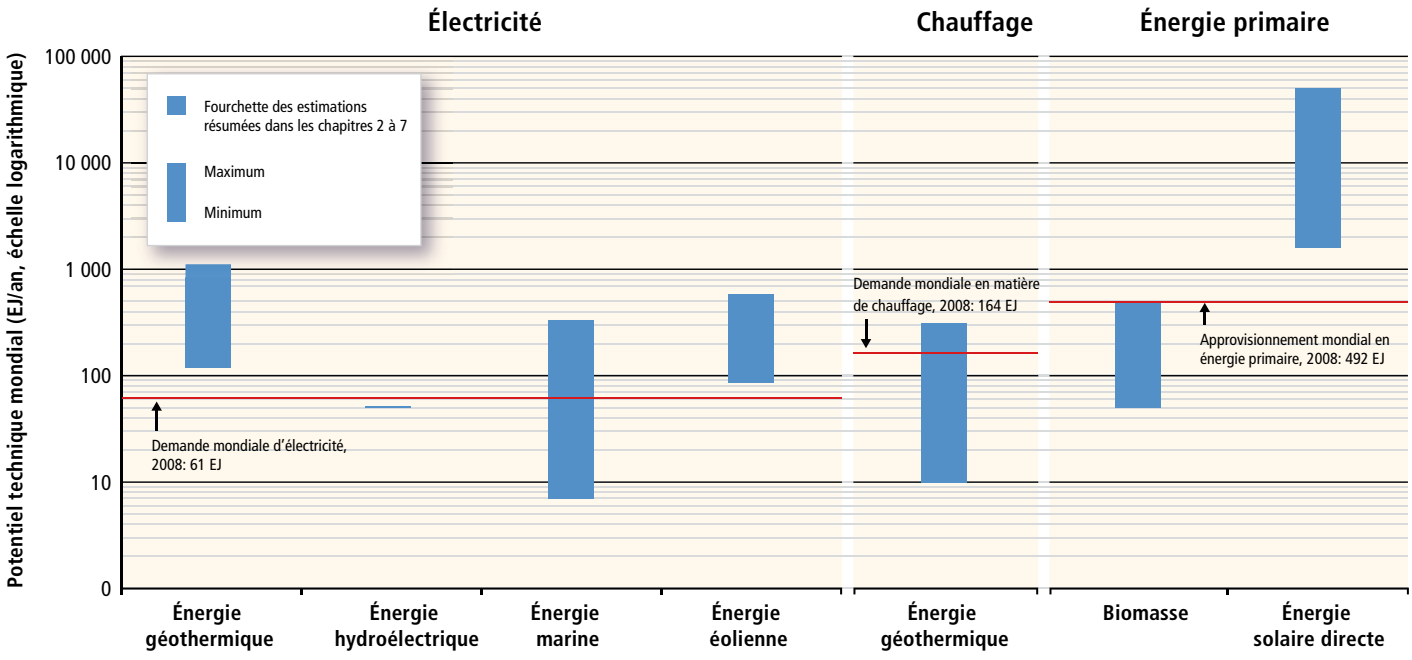
études ont régulièrement montré que le potentiel technique mondial total des ÉR est nettement plus élevé que la demande mondiale actuelle et prévue d'énergie. Le potentiel technique de l'énergie solaire est le plus élevé parmi les sources d'ÉR, mais il existe un potentiel technique important pour toutes les formes d'ÉR. L'importance absolue du potentiel technique mondial des ÉR dans leur ensemble est peu susceptible de limiter la mise en valeur de ces énergies. [1.2.3]

La figure TS.1.7 montre qu'en 2008, le potentiel technique[6] dépassait très largement la demande mondiale d'électricité et de chaleur ainsi que de l'approvisionnement mondial en énergie primaire. Cette figure permet au lecteur de se faire une idée précise de l'importance relative des ressources énergétiques renouvelables dans le contexte de la demande et de l'offre actuelles d'énergie, mais on notera que les potentiels techniques sont très incertains. Le tableau A.1.1 de l'annexe du chapitre 1 présente des notes et des explications plus détaillées. [1.2.3]

Les ÉR peuvent être intégrées dans tous les types de systèmes électriques, depuis les vastes réseaux interconnectés d'échelle continentale jusqu'à de petits bâtiments autonomes. Qu'elle serve à la production d'électricité, au chauffage, au refroidissement ou à la production de combustibles gazeux ou liquides, l'intégration des ÉR est contextuelle, propre aux sites et complexe. L'énergie éolienne et l'énergie solaire, qui sont partiellement répartissables, peuvent être plus difficiles à intégrer que l'énergie hydroélectrique, la bioénergie et l'énergie géothermique, qui sont entièrement répartissables. À mesure que la pénétration de l'électricité issue d'ÉR partiellement répartissables augmente, il devient plus difficile et plus coûteux de maintenir la fiabilité des systèmes. Un éventail de solutions pour réduire au minimum les risques et les coûts d'intégration des ÉR peut inclure le développement d'une production complémentaire souple, le renforcement et l'élargissement de l'infrastructure et des interconnexions des réseaux, une demande d'électricité susceptible d'évoluer selon l'offre disponible, la mise en œuvre de techniques de stockage de l'énergie (y compris l'énergie hydroélectrique à base de réservoirs) et la modification des dispositions institutionnelles, y compris les mécanismes de réglementation et les mécanismes du marché. À mesure que le niveau de pénétration des ÉR augmente, il devient nécessaire de mettre en place un ensemble de systèmes et de technologies de communication peu coûteux et efficaces, ainsi que des compteurs intelligents. [1.2.4]

Les services énergétiques sont les tâches accomplies au moyen de l'énergie. Un service énergétique donné peut être assuré de nombreuses façons et peut donc être caractérisé par un rendement énergétique élevé ou faible, donnant lieu à l'émission d'une quantité relativement minime ou importante de CO_2 (selon une répartition donnée des sources d'énergie). Réduire les besoins en énergie au stade de la prestation des services énergétiques par le biais du rendement énergétique est un moyen important de réduire la demande d'énergie primaire. Cela est particulièrement important pour les sources d'ÉR, qui ont habituellement une densité

6 On trouvera une définition complète de «potentiel technique» à l'annexe I.



Fourchette des estimations des potentiels techniques mondiaux

Max. (EJ/an)	**1 109**	**52**	**331**	**580**	**312**	**500**	**49 837**
Min. (EJ/an)	**118**	**50**	**7**	**85**	**10**	**50**	**1 575**

Figure TS.1.7 | Fourchettes des potentiels techniques mondiaux des sources d'ÉR selon des études présentées dans les chapitres 2 à 7. La biomasse et l'énergie solaire sont classées parmi les énergies primaires en raison de leurs usages multiples. On notera que la figure est présentée à l'échelle logarithmique en raison de l'écart important des données évaluées. [Figure 1.17]

Note: Les potentiels techniques évoqués ici représentent les potentiels mondiaux de la production annuelle d'ÉR. On n'en déduit aucun potentiel déjà comptabilisé. On notera que les sources d'électricité renouvelable peuvent également être utilisées pour le chauffage, alors que la biomasse et les ressources solaires ne sont classées que parmi les énergies primaires mais peuvent être utilisées pour répondre à divers besoins en matière de services énergétiques. Les fourchettes, déterminées selon diverses méthodes, s'appliquent à diverses années à venir. C'est pourquoi elles ne sont pas strictement comparables selon les technologies. Pour les données de la figure et des notes supplémentaires pertinentes, voir le tableau A.1.1 (ainsi que les chapitres sous-jacents).

de puissance plus faible que les combustibles fossiles ou nucléaires. Les mesures d'amélioration du rendement sont souvent les solutions les moins chères pour réduire la demande d'énergie pour utilisation finale. Le présent rapport donne des définitions précises de diverses dimensions de l'efficacité énergétique. [1.2.5]

Les économies d'énergie résultant de mesures d'amélioration du rendement ne sont pas toujours pleinement réalisées dans la pratique. Il peut y avoir un effet rebond, une partie d'une mesure étant alors neutralisée du fait que le coût total plus faible de l'énergie (dû à son utilisation moindre) nécessaire pour fournir un service énergétique donné peut conduire à une utilisation accrue de ce service. On estime que l'effet rebond est sans doute limité par des effets de saturation variant de 10 à 30 % pour le chauffage des logements et l'emploi de véhicules dans les pays membres de l'Organisation pour la coopération économique et le développement (OCDE) et qu'il est très faible pour des appareils plus efficaces et le chauffage de l'eau. Toutefois, toute mesure d'amélioration du rendement qui permet de réduire la demande d'énergie à l'échelle macroéconomique fait également baisser le prix de l'énergie, ce qui conduit à une diminution du prix de l'énergie au niveau macroéconomique et à des économies supplémentaires (prix plus faible et utilisation réduite de l'énergie). On prévoit que l'effet rebond sera peut-être plus important dans les pays en développement et parmi les consommateurs les plus pauvres. En ce qui concerne l'évolution du climat, la principale préoccupation suscitée par cet effet est son influence sur les émissions de CO_2. [1.2.5]

Le transfert d'émissions de carbone peut aussi réduire l'efficacité des politiques de réduction du carbone. Si ces politiques ne sont pas appliquées uniformément dans les divers secteurs et juridictions administratives, il est possible que les activités entraînant des émissions de carbone se déplacent vers un secteur ou un pays dépourvu de telles politiques. Toutefois, des recherches récentes montrent que les estimations concernant le transfert d'émissions de carbone sont trop élevées. [1.2.5]

1.3 Satisfaction des besoins en matière de services énergétiques et situation actuelle

Sur le plan mondial, les flux d'énergie renouvelable qui ont émané de l'énergie primaire et qui, par le biais de vecteurs, ont abouti à des utilisations finales et à des pertes en 2008 sont présentés à la figure TS.1.8. [1.3.1]

En 2008, au niveau mondial, 56 % environ des ÉR servaient à fournir de la chaleur à des ménages privés, au secteur public et au secteur tertiaire. Pour l'essentiel, il s'agissait de bois et de charbon, largement utilisés dans les pays en développement pour la cuisson des aliments. D'autre part, seule une faible quantité d'ÉR était utilisée dans le secteur des transports. La production d'électricité représentait 24 % de l'utilisation finale. Les biocarburants représentaient 2 % de la production mondiale de carburants pour les transports routiers et, globalement, la biomasse traditionnelle (17 %), la biomasse moderne (8 %) et l'énergie solaire thermique et l'énergie géothermique (2 %) répondaient à 27 % de la demande mondiale totale de chaleur. [1.3.1]

Alors que les ressources sont manifestement importantes et pourraient théoriquement répondre à tous les besoins en énergie pendant longtemps, le prix actualisé de l'énergie produite à l'aide de nombreuses technologies ÉR est actuellement plus élevé que le prix actuel de l'énergie, bien que, dans de nombreux cas, les ÉR soient déjà concurrentielles sur le plan économique. Les fourchettes des coûts actualisés de l'énergie récemment établis pour certaines technologies ÉR disponibles dans le commerce sont larges et dépendent de divers facteurs, dont les caractéristiques et l'importance de ces technologies, les variations régionales des coûts et des performances et les divers taux d'actualisation (figure TS.1.9). [1.3.2, 2.3, 2.7, 3.8, 4.8, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5, annexe III]

Le coût de la plupart des technologies ÉR a baissé, et d'autres progrès techniques attendus devraient accentuer encore cette tendance. Ces réductions de coût et la monétisation du coût externe de l'approvisionnement en énergie devraient améliorer la compétitivité relative des ÉR. Il en ira de même si les prix du marché augmentent pour d'autres raisons. [1.3.2, 2.6, 2.7, 3.7, 3.8, 4.6, 4.7, 5.3, 5.7, 5.8, 6.6, 6.7, 7.7, 7.8, 10.5]

La contribution des ÉR à l'approvisionnement en énergie primaire varie sensiblement selon les pays et les régions. La répartition géographique de la production, de l'exploitation et de l'exportation des ÉR est en cours de diversification depuis les pays développés vers des pays en développement, notamment en Asie, y compris la Chine. Pour ce qui est de la puissance installée renouvelable, la Chine est la première du monde, suivie des États-Unis d'Amérique, de l'Allemagne, de l'Espagne et de l'Inde. Les ÉR sont réparties plus uniformément que les combustibles fossiles, et il existe des pays et des régions particulièrement bien dotées en certaines ÉR. [1.3.3]

1.4 Opportunités, obstacles et problèmes

Les grands défis énergétiques mondiaux consistent à garantir l'approvisionnement en énergie pour répondre à l'accroissement de la demande, à offrir à tous l'accès aux services énergétiques et à réduire le rôle de l'énergie dans l'évolution du climat. Dans les pays en développement, et notamment les plus pauvres d'entre eux, il faut de l'énergie pour stimuler la production, l'obtention de revenus et le développement social et pour atténuer les graves problèmes de santé dus à l'utilisation de bois de chauffage, de charbon de bois, de déjections animales et de déchets agricoles. Dans les pays industrialisés, les principales raisons d'encourager l'utilisation des ÉR sont les réductions des émissions pour atténuer les effets des changements climatiques, les préoccupations concernant la sûreté des approvisionnements en énergie et la création d'emplois. Les ÉR peuvent donner la possibilité de traiter ces problèmes multiples sur le plan de l'environnement et du développement socioéconomique, y compris l'adaptation aux changements climatiques. [1.4, 1.4.1]

Certains types de ressources renouvelables sont disponibles dans le monde entier, par exemple le rayonnement solaire, le vent, l'eau en mouvement, les vagues, les marées, la chaleur stockée dans les océans et la chaleur issue de la Terre. Il existe en outre des technologies permettant de maîtriser ces formes d'énergie. Bien que les opportunités [1.4.1] semblent excellentes, il existe cependant des obstacles [1.4.2] et des problèmes [1.4.3] qui ralentissent la mise en valeur des ÉR dans les économies contemporaines. [1.4]

On peut définir les opportunités comme des circonstances favorables à l'action avec un élément de hasard. Dans un contexte de politique générale, il peut s'agir de l'anticipation d'avantages supplémentaires pouvant aller de pair avec la mise

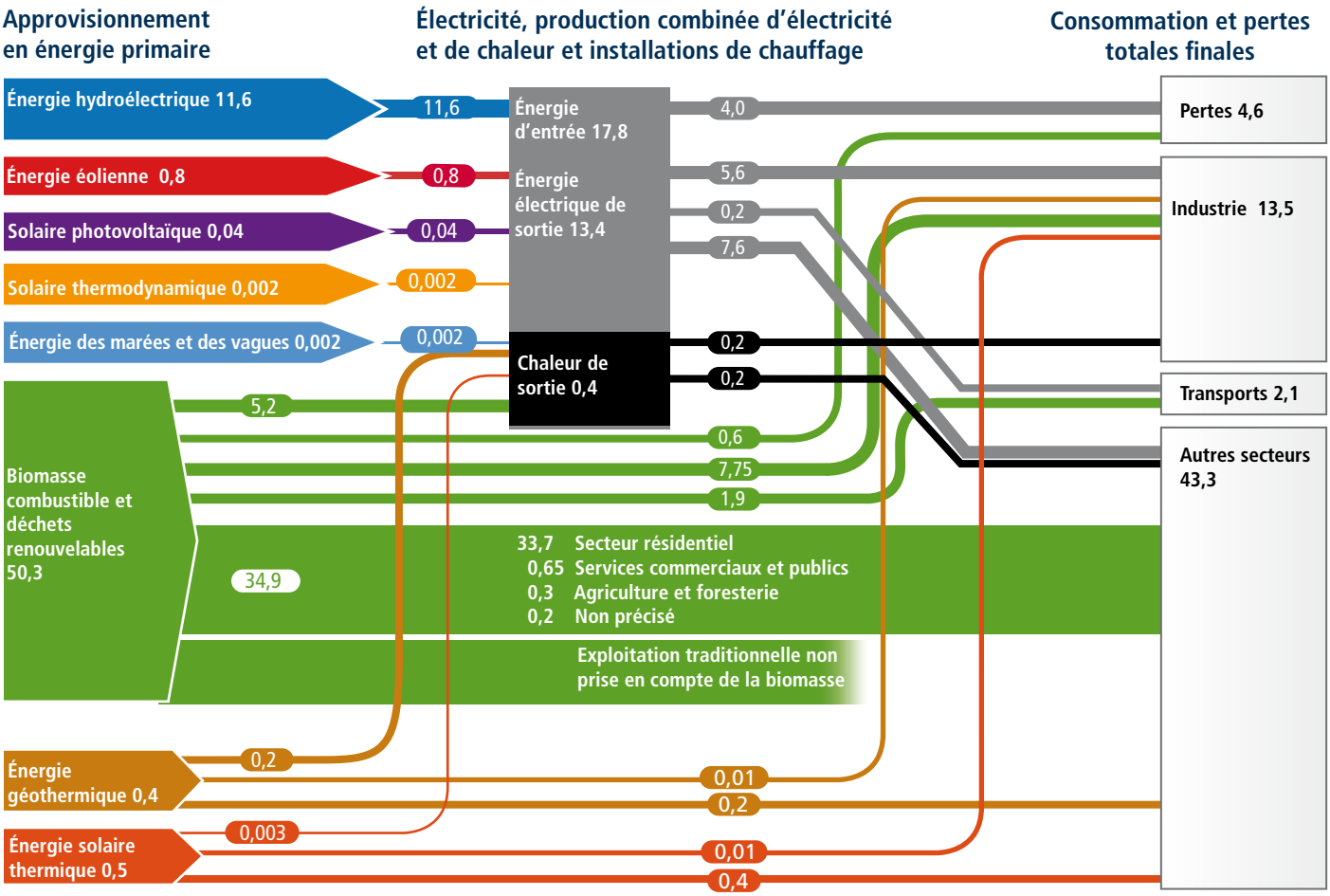


Figure TS.1.8 | Flux mondiaux d'énergie (EJ) en 2008 émanant d'énergies primaires renouvelables et qui, par le biais de vecteurs, aboutissent à des utilisations finales et à des pertes (selon les données de l'Agence internationale de l'énergie (AIÉ)). Les «autres secteurs» comprennent l'agriculture, les édifices commerciaux et résidentiels, les services publics et d'autres secteurs non précisés. Le «secteur des transports» comprend les transports routiers, l'aviation internationale et les soutes maritimes internationales. [Figure 1.18]

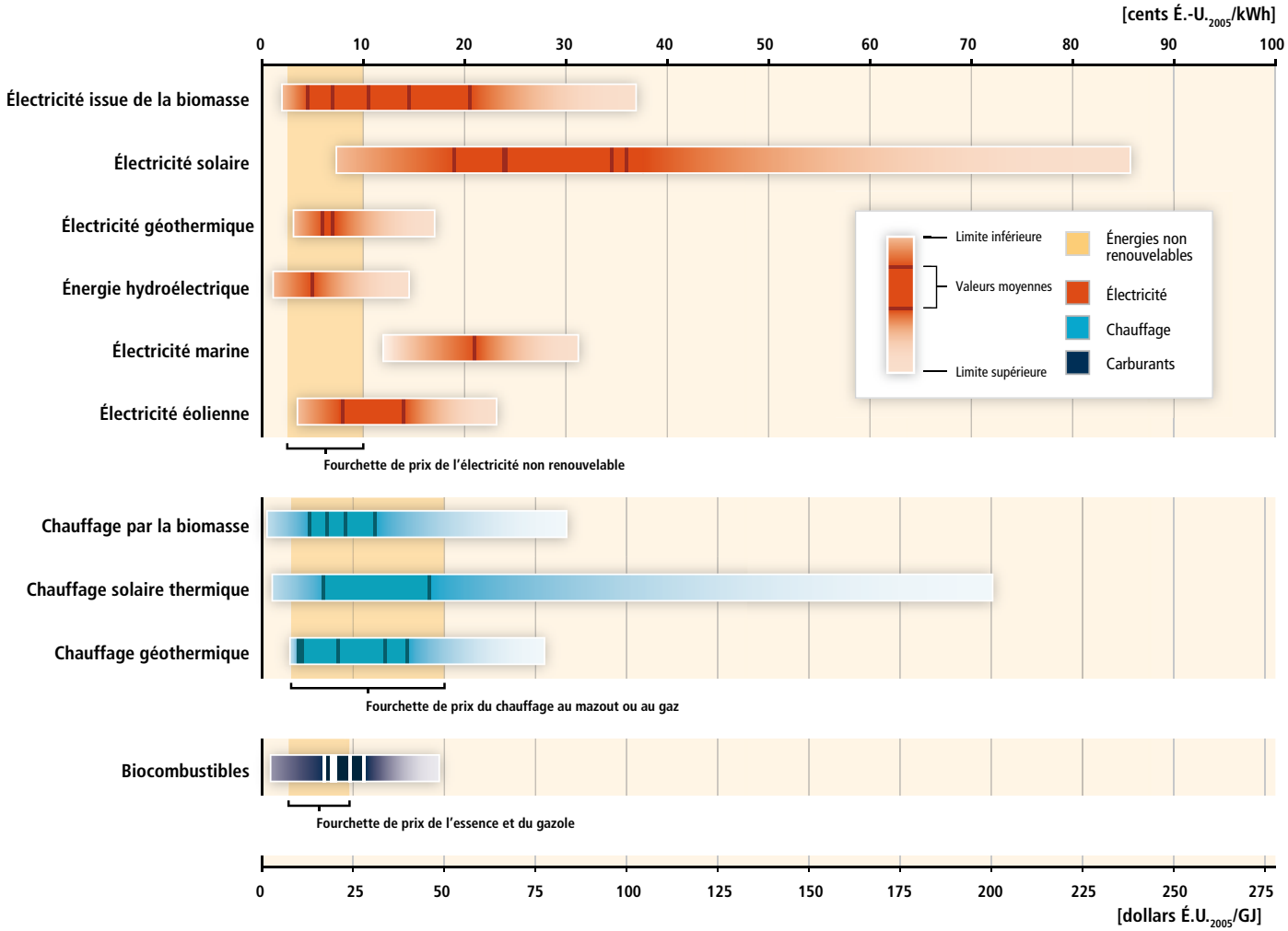
en valeur des ÉR, sans que ces avantages soient intentionnellement ciblés. Ces opportunités se présentent dans quatre grands domaines: développement économique et social; accès à l'énergie; sécurité énergétique; atténuation des effets des changements climatiques et réduction des incidences sur l'environnement et la santé. [1.4.1, 9.2–9.4]

Sur le plan mondial, le revenu par habitant et des indicateurs de portée plus large tels que l'indicateur du développement humain (IDH) sont corrélés positivement avec l'utilisation d'énergie par habitant, et la croissance économique peut être considérée comme le facteur le plus pertinent de l'augmentation de la consommation d'énergie depuis quelques décennies. Le développement économique a été associé à un passage de la combustion directe de combustibles à l'utilisation d'une électricité de plus haute qualité. [1.4.1, 9.3.1]

Dans les pays en développement en particulier, le lien entre le développement économique et social et le besoin de services énergétiques modernes est manifeste. L'accès à une énergie propre et fiable est une condition préalable importante pour les déterminants fondamentaux du développement humain, qui contribue notamment à l'activité économique, à l'obtention de revenus, à la réduction de la pauvreté, à la santé, à l'éducation et à l'égalité entre les sexes. Du fait de leur caractère décentralisé, les technologies ÉR peuvent jouer un rôle important de stimulation du développement rural. La création de (nouvelles) possibilités d'emploi est considérée comme un effet positif à long terme des ÉR, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. [1.4.1, 9.3.1.4, 11.3.4]

L'accès à des services énergétiques modernes peut être amélioré par les ÉR. En 2008, 1,4 milliard de personnes n'avaient pas l'électricité, dont 85 % environ se trouvaient dans des zones rurales, et l'on estimait à 2,7 milliards le nombre de personnes qui avaient recours à la biomasse traditionnelle pour la cuisson des aliments. En particulier, le recours aux ÉR dans les applications rurales, l'emploi de la bioénergie produite localement pour obtenir de l'électricité et l'accès à des installations propres pour la cuisson vont contribuer à la concrétisation d'un accès universel aux services énergétiques modernes. L'accès à une énergie moderne suppose que l'on gravisse les échelons de l'échelle énergétique et que l'on passe des appareils et combustibles traditionnels à des appareils et combustibles plus modernes qui soient moins dommageables pour l'environnement et qui aient moins de répercussions négatives sur la santé. Cette évolution dépend du niveau des revenus. [1.4.1, 9.3.2]

La sécurité énergétique, qu'on peut caractériser par la disponibilité et la répartition des ressources ainsi que par la variabilité et la fiabilité de l'approvisionnement en énergie, peut aussi être améliorée par la mise en valeur des ÉR. Les technologies ÉR, qui permettent de diversifier l'éventail des sources



Note: Les valeurs moyennes sont indiquées pour les sous-catégories suivantes, présentées dans l'ordre où apparaissent dans les fourchettes correspondantes (de gauche à droite):

Électricité

Biomasse:
1. Cocombustion
2. Production combinée à petite échelle de chaleur et d'électricité (moteur à combustion interne alimenté par gazéification)
3. Chargeur direct spécialisé et production combinée
4. Production combinée à petite échelle de chaleur et d'électricité (turbine à vapeur)
5. Production combinée à petite échelle de chaleur et d'électricité (cycle organique de Rankine)

Électricité solaire:
1. Solaire thermodynamique
2. Système photovoltaïque à fins commerciales (un seul axe et panneaux fixes)
3. Système photovoltaïque commercial pour toiture
4. Système photovoltaïque résidentiel pour toiture

Électricité géothermique:
1. Centrale flash à condensation
2. Centrale à cycle binaire

Énergie hydro-électrique:
1. Tous types

Électricité marine:
1. Usine marémotrice

Électricité éolienne:
1. Terrestre
2. Au large des côtes

Chauffage

Chauffage par la biomasse:
1. Production combinée de chaleur et d'électricité à partir de déchets urbains solides
2. Production combinée de chaleur et d'électricité par digestion anaérobie
3. Production combinée de chaleur et d'électricité par turbine à vapeur
4. Système de chauffage par granulés

Chauffage solaire thermique:
1. Systèmes de production d'eau chaude dans les foyers chinois
2. Chauffage de l'eau et des espaces

Chauffage géothermique:
1. Serres
2. Bassins d'aquaculture non couverts
3. Chauffage urbain
4. Pompes à chaleur géothermiques
5. Chauffage géothermique d'immeubles

Carburants

Biocarburants:
1. Éthanol de maïs
2. Biogazole de soja
3. Éthanol de blé
4. Éthanol de canne à sucre
5. Biogazole d'huile de palme

La limite supérieure du coût moyen actualisé de l'énergie pour chaque technologie ÉR est fondée sur une combinaison des valeurs d'entrée les plus favorables, alors que la limite inférieure est fondée sur une combinaison des valeurs d'entrée les moins favorables. Les fourchettes de référence présentées à l'arrière-plan de la figure pour les sources d'électricité non renouvelable indiquent le coût moyen actualisé de la production centralisée d'électricité non renouvelable. Les fourchettes de référence pour le chauffage correspondent aux technologies de production de chaleur selon les prix récemment déterminés du pétrole et du gaz. Les fourchettes de référence pour les carburants sont fondées sur le prix au comptant récemment déterminé du pétrole brut, qui s'établit entre 40 et 130 dollars É.-U. le baril, et sur le prix hors taxes correspondant du gazole et de l'essence.

Figure TS.1.9 | Fourchette des prix normalisés de l'énergie déterminés récemment pour certaines technologies ÉR disponibles dans le commerce par rapport aux prix des énergies non renouvelables déterminés récemment. Les sous-catégories de technologies et les taux d'actualisation ont été regroupés pour cette figure. On trouvera des figures connexes avec moins de regroupements ou sans regroupement dans [1.3.2, 10.5, annexe III]. On trouvera en outre dans [10.5] d'autres informations concernant le coût des solutions envisageables pour l'approvisionnement en énergies non renouvelables. [Figure 10.28]

d'énergie, de réduire la vulnérabilité de l'économie à la volatilité des prix et de rediriger les flux de devises en réduisant les importations d'énergie, diminuent les inégalités sociales en matière d'approvisionnement en énergie. Actuellement, les approvisionnements en énergie font la part belle aux combustibles fossiles (pétrole et gaz naturel), dont les prix sont instables, ce qui a eu d'importantes répercussions sur la viabilité économique, sociale et environnementale au cours des dernières décennies, surtout dans les pays en développement et dans ceux qui importent beaucoup de combustibles. [1.4.1, 9.2.2, 9.3.3, 9.4.3]

L'atténuation des effets du changement climatique est l'un des éléments majeurs de l'accroissement de la demande de technologies ÉR. Outre qu'elles réduisent les émissions de GES, ces technologies peuvent aussi offrir des avantages en ce qui concerne la pollution de l'air et la santé par rapport aux combustibles fossiles. Cependant, pour évaluer la charge globale du système énergétique sur l'environnement et la société et déterminer les compromis et les synergies possibles, il faut aussi tenir compte des incidences sur l'environnement, à part les émissions et les catégories de GES. En outre, les ressources peuvent être affectées par l'évolution du climat. Les évaluations du cycle de vie facilitent la comparaison quantitative du cycle complet des émissions selon les diverses technologies énergétiques. La figure TS.1.10 illustre l'analyse de la structure du cycle de vie des émissions de CO_2 et indique qualitativement les incidences rela-

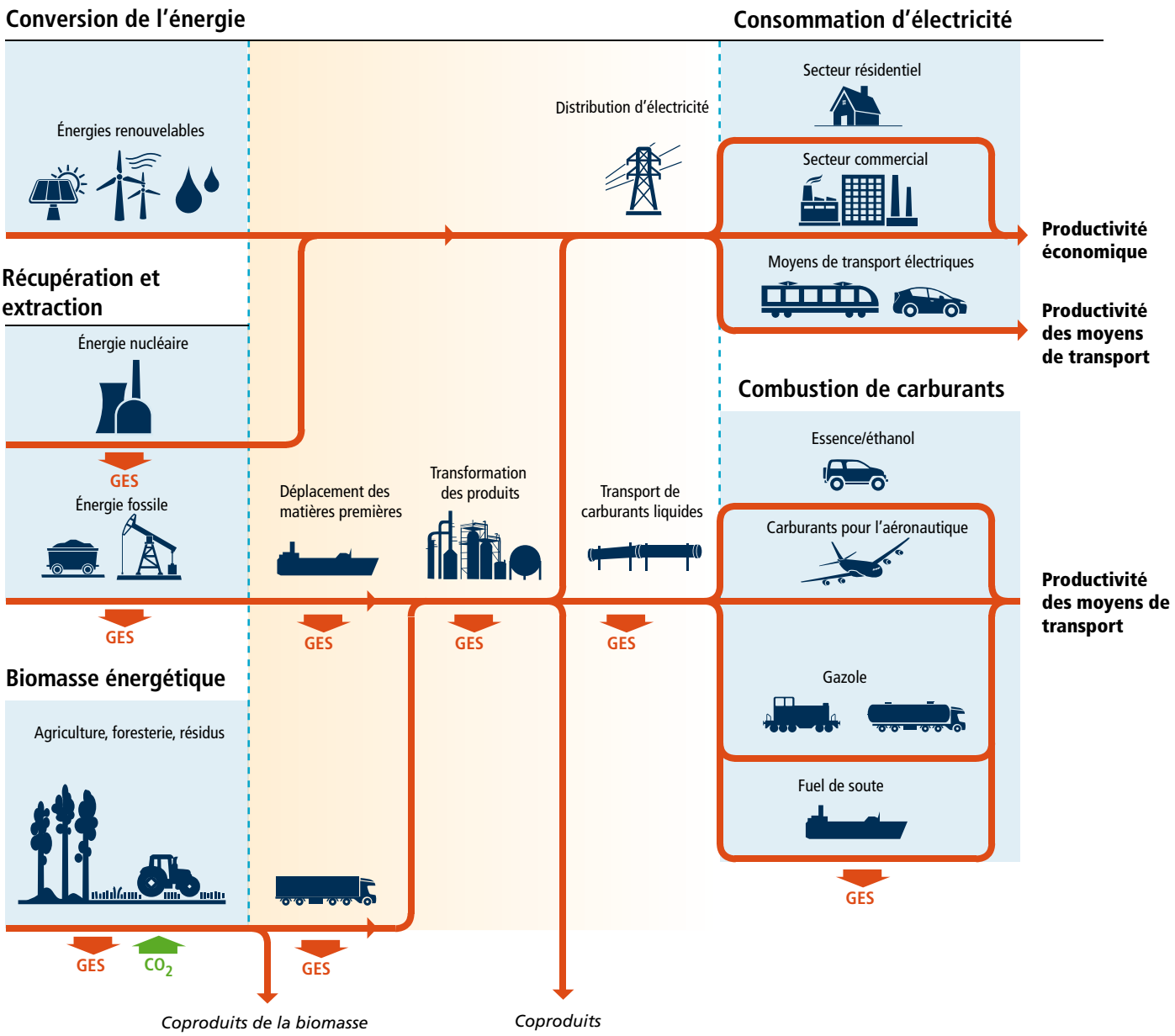


Figure TS.1.10 | Système de production et d'exploitation d'énergie illustrant le rôle des ÉR ainsi que d'autres possibilités de production. Il faut faire appel à une approche systémique pour évaluer le cycle de vie. [Figure 1.22]

tives des GES sur les ÉR, l'énergie nucléaire et les combustibles fossiles. [1.4.1, 9.2.2, 9.3.4, 11.3.1]
Le recours à la biomasse traditionnelle a des effets sur la santé du fait de la concentration élevée de particules en suspension et de monoxyde de carbone, entre autres polluants. Dans ce contexte, les technologies ÉR de production d'énergie sans combustion ont la capacité de réduire sensiblement la pollution locale et régionale de l'air et d'atténuer les incidences associées sur la santé par comparaison avec la production d'énergie à partir de combustibles fossiles. Améliorer l'utilisation de la biomasse traditionnelle peut réduire les répercussions négatives sur le développement durable, y compris pour ce qui concerne la pollution de l'air locale et intérieure, les émissions de GES, le déboisement et la dégradation des forêts. [1.4.1, 2.5.4, 9.3.4, 9.3.4, 9.4.2]

Les incidences des systèmes énergétiques sur les ressources en eau dépendent fortement du choix des technologies et des conditions locales. Par exemple, la production d'électricité à partir du vent et du photovoltaïque solaire exige très peu d'eau par comparaison avec les technologies de conversion thermique et n'a aucune incidence sur la qualité de l'eau et de l'air. Des disponibilités en eau limitées pour refroidir les centrales thermiques en réduit l'efficacité, ce qui risque d'affecter les centrales fonctionnant au charbon, à la biomasse, au gaz, à l'énergie nucléaire et au solaire thermodynamique. Ces dernières années, on a pu observer une réduction sensible de l'énergie issue des centrales nucléaires et au charbon lors des épisodes de sécheresse qui se sont produits aux États-Unis et en France. En particulier, le charbon extrait dans des mines à ciel ouvert entraîne des altérations majeures des sols; les mines de charbon risquent en effet de créer un drainage acide dans les mines, et le stockage de cendres de houille risque de contaminer les eaux souterraines et de surface. La production et le transport de pétrole ont entraîné des déversements importants sur terre et en mer. La plupart des technologies ÉR produisent moins de polluants traditionnels de l'air et de l'eau que les combustibles fossiles, mais elles nécessitent parfois l'occupation de vastes territoires, comme par exemple la production d'énergie hydroélectrique au moyen de réservoirs, l'énergie éolienne et les biocombustibles. Comme un certain degré de changement climatique est désormais inévitable, l'adaptation à ce changement est aussi une composante essentielle du développement durable. [1.4.1, 9.3.4]

Les obstacles sont définis dans le quatrième Rapport d'évaluation comme «tout obstacle empêchant la réalisation d'un objectif, d'une mesure d'adaptation ou d'un potentiel d'atténuation, qui peut être éliminé ou atténué par un programme ou une mesure stratégique». Les divers obstacles qui s'opposent à l'utilisation des ÉR peuvent être classés en défaillances du marché et obstacles économiques, obstacles en matière d'information et de sensibilisation, obstacles socioculturels et obstacles institutionnels et réglementaires. Les politiques et les mécanismes de financement permettant d'éliminer ces obstacles sont évalués de façon approfondie dans le chapitre 11. Lorsqu'un obstacle a un rapport particulièrement étroit avec une technologie donnée, il est étudié dans le chapitre du présent rapport concernant cette technologie [chapitres 2 à 7]. Le tableau 1.5 du chapitre 1 présente un résumé des obstacles et des moyens d'action envisageables pour les éliminer. Les défaillances du marché sont souvent dues à des effets extérieurs, qui ont pour origine une activité humaine lorsque les responsables de cette activité ne tiennent pas pleinement compte de ses incidences sur d'autres plans. Une autre défaillance du marché est l'appropriation de la rente par des monopoles. Dans le cas de la mise en valeur des ÉR, ces défaillances peuvent être dues à un investissement insuffisant dans l'invention et l'innovation en matière de technologies ÉR, à des incidences sur l'environnement non chiffrées, aux risques liés à l'utilisation de l'énergie et à l'existence de monopoles (un seul vendeur) ou de monopsones (un seul acheteur) sur les marchés de l'énergie. D'autres obstacles économiques sont le coût d'investissement en amont et les risques financiers, ces derniers étant parfois dus à l'imperfection des technologies. [1.4.2, 1.5, 11.4]

Les obstacles liés à l'information et à la sensibilisation peuvent consister en une insuffisance des données sur les ressources naturelles, souvent en raison de la spécificité des sites (régimes des vents locaux, par exemple), en un manque de ressources humaines qualifiées (capacités), surtout dans les zones rurales des pays en développement, et en un manque de sensibilisation publique et institutionnelle. Les obstacles socioculturels sont liés intrinsèquement aux valeurs et aux normes sociétales et individuelles qui influent sur la perception et l'acceptation des ÉR et qui peuvent mettre du temps à évoluer. Les obstacles institutionnels et réglementaires incluent la réglementation actuelle de l'industrie, de l'infrastructure et du marché de l'énergie. Malgré la libéralisation du marché de l'énergie dans plusieurs pays au cours des années 90, les structures actuelles de l'industrie sont encore très concentrées et, dans de nombreux pays, les règlements régissant les entreprises du secteur énergétique sont toujours conçus en fonction de fournisseurs monopolistiques ou quasi monopolistiques. La règlementation et les normes techniques ont évolué selon l'hypothèse que les systèmes énergétiques sont vastes et centralisés et qu'ils se caractérisent par une densité de puissance et/ou une tension élevées. Les droits de propriété intellectuelle, les droits de douane appliqués aux échanges internationaux et le manque de soutien financier de la part des gouvernements peuvent également constituer des obstacles. [1.4.2]

Les problèmes ne peuvent pas toujours être résolus par des politiques ou des programmes. Un problème peut résulter du fait qu'une ressource est trop restreinte pour être utile à un endroit ou pour un but donné. Certaines ressources renouvelables telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire sont variables et ne peuvent pas toujours être réparties selon les besoins. En outre, la densité énergétique de nombre de sources d'énergie renouvelable étant relativement faible, leur niveau de puissance risque d'être insuffisant en soi pour certaines utilisations telles que les établissements industriels à très grande échelle. [1.4.3]

1.5 Rôle des politiques, de la recherche-développement, de la mise en valeur et des stratégies de mise en œuvre

La mise en œuvre de politiques de plus en plus nombreuses et variées concernant les ÉR, motivées par différents facteurs, a entraîné un développement accéléré des technologies ÉR ces dernières années. Pour les décideurs qui souhaitent favoriser la conception et la mise en œuvre de ces technologies en vue d'atténuer les effets des changements climatiques, il est indispensable de prendre en compte la capacité des ÉR à réduire les émissions sur l'ensemble du cycle de vie, comme il est indiqué dans tous les chapitres du présent rapport consacrés aux diverses technologies. On a élaboré différentes politiques pour chacune des phases du processus de mise au point – recherche-développement, essais, mise en valeur, commercialisation, préparation du marché, pénétration du marché, maintenance et contrôle – ainsi que pour l'intégration dans le système existant. [1.4.1, 1.4.2, 9.3.4, 11.1.1, 11.2, 11.4, 11.5]

En général, deux défaillances principales du marché sont prises en compte: 1) les coûts externes des émissions de GES ne sont pas chiffrés à un niveau approprié;

2) la mise en valeur de technologies à faible émission de carbone telles que les technologies ÉR procure à la société des avantages autres que ceux dont bénéficient les innovateurs, d'où l'insuffisance des investissements consentis dans ce domaine. [1.4, 1.5, 11.1, 11.4]

Les décideurs envisagent le marché de plusieurs façons différentes. Il n'existe aucune liste convenue sur le plan mondial des possibilités d'action ou des groupements au sujet des ÉR. Dans le présent rapport, par souci de simplification, les politiques de recherche-développement et de mise en valeur ont été classées dans les catégories suivantes [1.5.1, 11.5]:

- **Incitations fiscales:** les acteurs (particuliers, ménages, entreprises) obtiennent une réduction de leur contribution au trésor public au titre de leur impôt sur le revenu ou d'autres impôts et taxes;
- **Finances publiques:** soutien public au titre duquel un rendement financier est attendu (prêts, participation) ou des engagements financiers sont conclus (garantie);
- **Réglementation:** règle guidant ou contrôlant la conduite de ceux auxquels elle s'applique.

La recherche-développement, l'innovation, la diffusion et la mise en valeur de nouvelles technologies à faible intensité de carbone procurent à la société des avantages autres que ceux dont bénéficient les innovateurs, ce qui entraîne des investissements insuffisants dans ces domaines. Ainsi, la recherche-développement du secteur public peut jouer un rôle important en faisant progresser les technologies ÉR. Les investissements dans la recherche-développement publique sont particulièrement efficaces lorsqu'ils s'accompagnent d'autres moyens d'action, et en particulier de politiques de mise en valeur des ÉR qui accroissent simultanément la demande de nouvelles technologies ÉR. [1.5.1, 11.5.2]

Il est démontré que certaines politiques sont plus efficaces dans le cas d'une mise en valeur accélérée des ÉR, mais il n'existe pas de solution unique valable dans tous les cas. L'expérience montre que diverses politiques ou combinaisons de politiques peuvent être plus efficaces et efficientes en fonction de facteurs tels que le niveau de maturité technique, la facilité d'obtention de capitaux, la facilité d'intégration dans le système existant et la base de ressources énergétiques renouvelables aux niveaux local et national.

- Plusieurs études ont conclu que certains tarifs de distribution avaient efficacement assuré la promotion de l'électricité issue d'ÉR, en raison principalement de l'association de prix fixes à long terme ou du versement de primes, de connexions au réseau et de l'achat garanti de toute l'électricité produite à partir d'ÉR. Les politiques de quotas peuvent être efficaces si elles sont conçues pour réduire les risques, par exemple grâce à des contrats à long terme.
- Les gouvernements sont de plus en plus nombreux à adopter des incitations fiscales pour le chauffage et le refroidissement à partir d'ÉR. L'obligation de recourir à un système de chauffage à partir d'ÉR attire l'attention en raison de sa capacité de favoriser un développement qui soit indépendant du soutien financier public.
- Dans le secteur des transports, les mandats en carburant renouvelable ou l'obligation d'utiliser des mélanges comprenant des carburants renouvelables sont des éléments essentiels du développement de la plupart des industries modernes des biocarburants. Parmi les autres politiques, on peut citer les versements directs par les gouvernements et les réductions d'impôts. Ces politiques ont influé sur le développement des échanges internationaux de biocarburants et de granulés.

Il importera de veiller à ce que les politiques de tarification des ÉR et du carbone s'influencent mutuellement et qu'elles puissent donc tirer profit des synergies plutôt que de se neutraliser. À long terme, le soutien à l'acquisition des connaissances techniques en matière d'ÉR pourra contribuer à réduire le coût des mesures d'atténuation, et la fixation du prix du carbone pourra accroître la compétitivité des ÉR. [1.5.1, 11.1, 11.4, 11.5.7]

Les technologies ÉR peuvent jouer un rôle plus important si elles sont mises en œuvre parallèlement à des politiques «facilitantes». Un environnement favorable – ou «facilitant» – pour les ÉR peut être créé en tenant compte des interactions possibles d'une politique donnée avec d'autres politiques relatives aux ÉR ainsi qu'avec d'autres politiques ne concernant pas les ÉR. De fait, l'existence d'un environnement facilitant peut accroître l'efficacité des politiques de promotion des ÉR. Comme toutes les formes de captage et de production d'ÉR sont fondées sur des considérations d'ordre spatial, il importe que les politiques tiennent compte de l'utilisation des sols, de l'emploi, des transports, de la sécurité agricole, hydrique et alimentaire et des préoccupations commerciales, de l'infrastructure existante et d'autres particularités sectorielles. Des politiques gouvernementales complémentaires les unes des autres ont plus de chances d'être fructueuses. [1.5.2, 11.6]

Les progrès des technologies ÉR dans le secteur de l'énergie électrique, par exemple, exigent des politiques prévoyant leur intégration dans les systèmes de transmission et de distribution sur le plan technique [chapitre 8] comme sur le plan institutionnel [chapitre 11]. Le réseau doit pouvoir absorber aussi bien la production traditionnelle, souvent plus centralisée, que la production moderne à partir d'ÉR, souvent variable et répartie. [1.5.2, 11.6.5]

Dans le secteur des transports, il faut répondre aux besoins en matière d'infrastructure pour les biocarburants et pour les véhicules électriques rechargés à l'hydrogène, équipés de batteries ou hybrides qui sont alimentés par le réseau électrique ou par une production d'électricité renouvelable en dehors du réseau.

Si les décideurs ont l'intention d'accroître la part des ÉR tout en atteignant des objectifs ambitieux en matière d'atténuation des effets du climat, des engagements à long terme et une souplesse suffisante pour tirer les enseignements de l'expérience acquise seront essentiels. Pour atteindre, sur le plan international, un niveau de stabilisation de la concentration de GES qui intègre une part importante d'ÉR, il faudra apporter une modification structurelle aux systèmes énergétiques actuels dans les quelques décennies qui viennent. Le délai imparti n'est que de quelques dizaines d'années, et les ÉR doivent être développées et intégrées au sein d'un système édifié dans le contexte d'une structure énergétique existante très différente de ce qui pourrait être nécessaire à l'avenir en cas de pénétration plus élevée des ÉR. [1.5.3, 11.7]

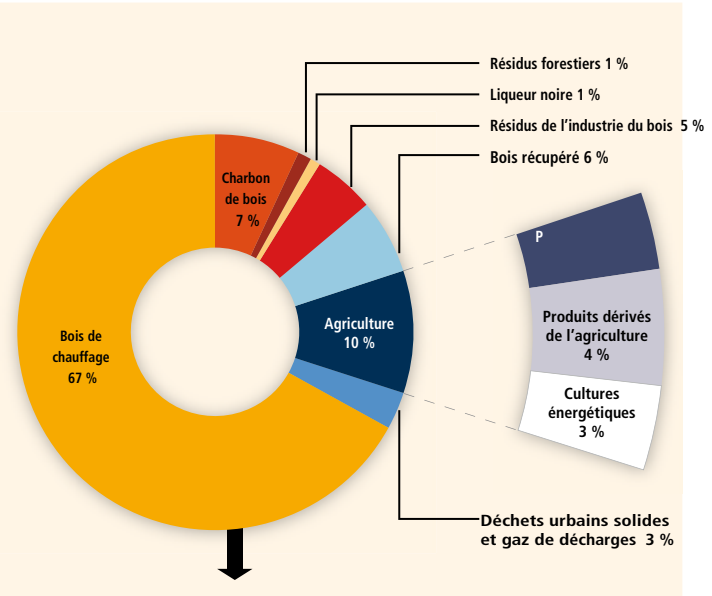
Une transition structurelle vers un système énergétique mondial essentiellement fondé sur les ÉR pourrait commencer par l'octroi d'un rôle important au rendement énergétique en association avec les ÉR. Il faut de nouvelles politiques allant au-delà de la recherche-développement pour favoriser la mise en valeur des technologies, la création d'un environnement facilitant incluant l'éducation et la sensibilisation et la mise au point systématique de politiques d'intégration englobant des secteurs plus vastes, y compris l'agriculture, les transports, la gestion des ressources en eau et l'urbanisme. Une association appropriée et fiable d'instruments divers est encore plus importante si l'infrastructure énergétique n'est pas encore développée et qu'on prévoie une forte augmentation de la demande d'énergie à l'avenir. [1.2.5, 1.5.3, 11.7, 11.6, 11.7]

2. La bioénergie

2.1 Introduction à la biomasse et à la bioénergie

La bioénergie est intégrée de façon complexe dans les systèmes mondiaux de biomasse servant à la production de denrées alimentaires, de fourrage, de fibres et de produits forestiers et dans la gestion de déchets et de résidus. Et surtout, la bioénergie joue un rôle intime et essentiel dans la vie quotidienne de milliards d'habitants des pays en développement. La figure TS.2.1 indique les types de biomasse utilisés pour obtenir de la bioénergie dans les pays en développement et les pays développés. L'accroissement de la production de bioénergie va nécessiter une gestion particulièrement efficace des modes d'utilisation des sols et des ressources en eau; une augmentation de la productivité mondiale des matières premières destinées à produire des denrées alimentaires, du fourrage, des fibres, des produits forestiers et de l'énergie; une amélioration considérable des technologies de conversion; et une meilleure compréhension des interactions sociales, énergétiques et environnementales complexes qui sont associées à la production et à l'exploitation de la bioénergie.

a)



b)

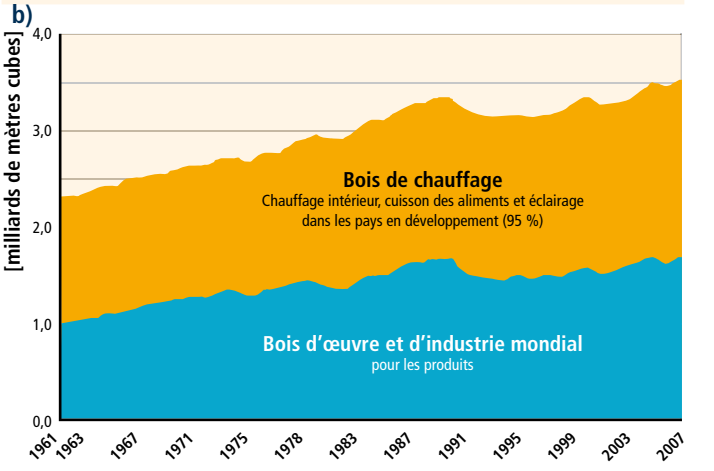


Figure TS.2.1 | a) Parts respectives des sources de biomasse primaire pour la production d'énergie; b) bois de chauffage employé dans les pays en développement parallèlement aux niveaux de production de bois d'œuvre et d'industrie à l'échelle du globe. [Figure 2.1]

Note: 1. Le bois d'œuvre et d'industrie comprend les billes de sciage et les grumes de tranchage destinées à l'industrie des produits forestiers ainsi que les copeaux de bois utilisés pour obtenir du bois à pâte pour la fabrication de papier, de papier journal et de papier kraft. En 2009, en raison du ralentissement de l'économie, on a observé une chute stabilisée à 3,25 milliards de mètres cubes (au total) et à 1,25 milliard de mètres cubes (industrie).

En 2008, la biomasse représentait environ 10 % (50,3 EJ/an) de la production mondiale d'énergie primaire (voir le tableau TS.2.1). Les principales utilisations de la biomasse comprennent deux grandes catégories:

- La biomasse traditionnelle[7] à faible efficacité telle que le bois, la paille, les déjections animales et le fumier est utilisée pour la cuisson des aliments, l'éclairage et le chauffage, en général par les populations pauvres des pays en développement. Cette biomasse est surtout brûlée, ce qui a des incidences très néfastes sur la santé et les conditions de vie. Le charbon de bois devient de plus en plus un vecteur d'énergie secondaire dans les zones rurales, avec des possibilités de création de chaînes productives. La figure TS.2.1 b), qui indique l'importance de l'utilisation de la biomasse traditionnelle, montre que l'approvisionnement mondial en énergie primaire émanant de la biomasse traditionnelle évolue de la même façon que la production mondiale de bois d'industrie. [2.5.4, 2.3, 2.3.2.2, 2.4.2, 2.5.7]
- La bioénergie moderne à haute efficacité recourt à des solides, des liquides et des gaz plus commodes comme vecteurs d'énergie secondaire en vue de produire de la chaleur, de l'électricité, de la chaleur et de l'électricité combinées et des carburants pour divers secteurs. Les biocombustibles liquides comprennent l'éthanol et le biogazole, qui servent aux transports routiers dans le monde entier et à certains secteurs industriels. Les gaz dérivés de la biomasse – et surtout le méthane – émanant de la digestion anaérobie de résidus agricoles et de déchets urbains solides servent à produire de l'électricité, de la chaleur ou les deux. L'apport le plus important à ces services énergétiques est fondé sur des combustibles solides tels que les copeaux, les granulés, le bois de récupération et autres produits. Le chauffage inclut le chauffage des espaces et de l'eau, comme dans les systèmes de chauffage urbain. On estime que l'approvisionnement total estimé en biomasse primaire pour ce qui concerne la bioénergie moderne est de 11,3 EJ/an et que l'énergie secondaire d'utilisation finale est d'environ 6,6 EJ/an. [2.3.2, 2.4, 2.4.6, 2.6.2]

En outre, des secteurs industriels tels que l'industrie des pâtes et des papiers, la foresterie et l'industrie alimentaire consomment environ 7,7 EJ/an de biomasse, qui sert surtout de source de vapeur à usage industriel. [2.7.2, 8.3.4]

2.2 Potentiel des ressources en bioénergie

La complexité inhérente aux ressources en biomasse rend controversée et difficile à caractériser l'évaluation de leur potentiel technique d'ensemble. Les évaluations présentées dans la documentation existante vont d'un potentiel technique

7 La biomasse traditionnelle se définit comme la consommation de biomasse dans le secteur résidentiel des pays en développement et désigne l'emploi souvent non durable de bois, de charbon de bois, de résidus agricoles et de déjections animales pour la cuisson des aliments et le chauffage. Toutes les autres utilisations de la biomasse se définissent comme la biomasse moderne. Dans le présent rapport, nous établissons aussi une distinction entre la bioénergie moderne hautement efficace et les applications industrielles de la bioénergie avec divers degrés d'efficacité [annexe I]. Le caractère renouvelable et durable du recours à la biomasse est abordé essentiellement dans les sections 2.5.4 et 2.5.5 respectivement (voir aussi la section 1.2.1 et l'annexe I).

Tableau TS.2.1 | Exemples de flux d'énergie issue de la biomasse traditionnelle et de certaines sources de biomasse moderne en 2008. On trouvera au tableau 2.1 des notes sur les flux spécifiques et les problèmes de comptabilisation. [Tableau 2.1]

Type	Énergie primaire approximative (EJ/an)	Efficacité moyenne approximative (%)	Énergie secondaire approximative (EJ/an)
Biomasse traditionnelle			
Prise en compte dans les statistiques sur le bilan énergétique établies par l'AIE	30,7	10–20	3–6
Évaluée pour les secteurs informels (charbon de bois, par ex.) [2.1]	6–12		0,6–2,4
Biomasse traditionnelle totale	37–43		3,6–8,4
Bioénergie moderne			
Production d'électricité et production combinée de chaleur et d'électricité à partir de biomasse, de déchets urbains solides et de biogaz	4,0	32	1,3
Chauffage des bâtiments résidentiels, publics et commerciaux à l'aide de biomasse solide et de biogaz	4,2	80	3,4
Carburants pour les transports routiers (éthanol et biogazole)	3,1	60	1,9
Bioénergie moderne totale	11,3	58	6,6

nul (aucune biomasse disponible pour la production d'énergie) à un potentiel théorique maximal d'environ 1 500 EJ, selon les modèles mondiaux. La figure TS.2.2 présente un résumé des potentiels techniques déterminés dans de grandes études, y compris les données émanant de l'analyse des scénarios du chapitre 10. Pour mettre en perspective le potentiel technique énergétique de la biomasse, la biomasse mondiale utilisée pour la production d'énergie se chiffre actuellement à environ 50 EJ/an, et l'ensemble de la biomasse récoltée pour l'obtention de denrées alimentaires, de fourrage et de fibres, exprimée en équivalent calorique, est d'environ 219 EJ/an (données de 2000). La presque totalité de la biomasse mondiale actuellement récoltée serait nécessaire pour obtenir un niveau de mise en valeur de la bioénergie de 150 EJ/an d'ici 2050. [2.2.1]

Selon une évaluation du potentiel technique fondée sur une analyse de la documentation disponible en 2007 et d'études de modélisation supplémentaires, la limite supérieure du potentiel technique pourrait être d'environ 500 EJ en 2050, comme le montre le graphique cumulé de la figure TS.2.2. Dans cette évaluation, on suppose l'existence de cadres réglementaires qui assurent une bonne gouvernance de l'utilisation des terres et des améliorations majeures de la gestion de l'agriculture et l'on tient compte du caractère limité des ressources en eau, de la protection de la biodiversité, de la dégradation des sols et de la concurrence avec les produits alimentaires. Les résidus émanant de la foresterie, de l'agriculture et des déchets organiques (y compris la part organique des déchets urbains solides, les déjections animales, les résidus industriels, etc.) sont évalués à 40 à

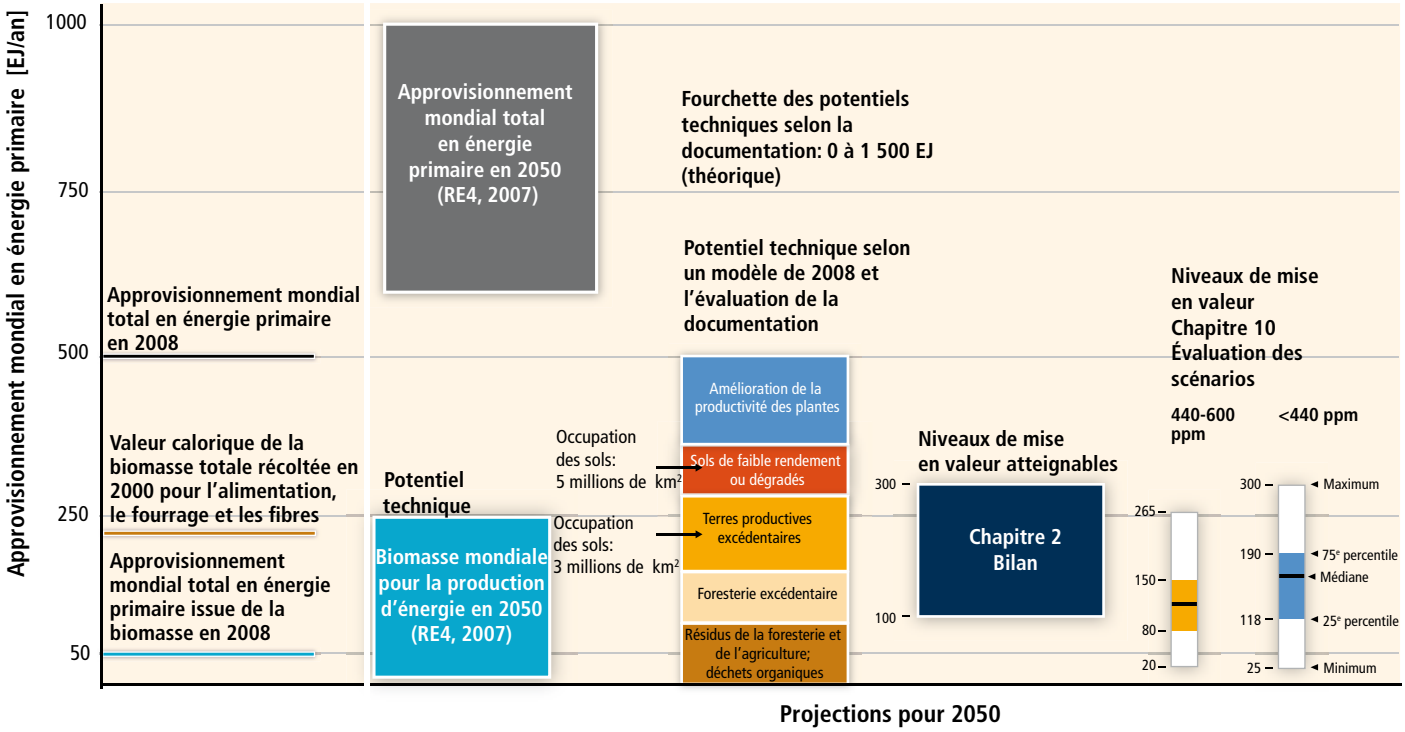


Figure TS.2.2 | Résumé des principales projections pour 2050 du potentiel technique de la biomasse terrestre mondiale à des fins énergétiques et niveaux de mise en valeur atteignables par rapport à l'approvisionnement mondial total en énergie primaire et en biomasse en 2008 ainsi qu'à l'équivalent-énergie de la biomasse mondiale totale récoltée. [Figure 2.25]

170 EJ/an, avec une moyenne estimée d'environ 100 EJ/an. Cette partie du potentiel technique est relativement certaine, mais la concurrence d'autres applications pourrait entraîner la disponibilité nette des applications énergétiques vers le bas de la fourchette. Les produits excédentaires de la foresterie autres que les résidus forestiers ont un potentiel technique supplémentaire d'environ 60 à 100 EJ/an. Une estimation basse de la production de cultures énergétiques sur un éventuel excédent de terres agricoles ou de pâturages de bonne qualité est de 120 EJ/an. La contribution des terres peu arrosées, marginales ou dégradées pourrait être de 70 EJ/an de plus. Cela englobe une vaste zone où la pénurie d'eau impose des limites et où la dégradation des sols est plus marquée. Si l'on suppose un apprentissage intensif des techniques agricoles destinées à améliorer la gestion des cultures et de l'élevage, on peut ajouter 140 EJ/an. Selon cette analyse, les trois catégories prises dans leur ensemble donnent un potentiel technique pouvant atteindre environ 500 EJ/an (figure TS.2.2).

Le développement de ce potentiel technique nécessiterait des efforts majeurs sur le plan des politiques, et il est donc probable que la mise en valeur réelle sera de moindre ampleur et que la base de ressources de la biomasse se limitera à une partie des résidus et des déchets organiques, à la production de cultures bioénergétiques sur des terres dégradées ou marginales et à certaines régions où la biomasse assure un approvisionnement en énergie plus avantageux que les principales options de référence (comme la production d'éthanol à partir de canne à sucre). [2.2.2, 2.2.5, 2.8.3]

Les conclusions de l'étude réalisée par des experts sur la base de la documentation scientifique existante sont les suivantes: [2.2.2–2.2.4]

- Au nombre des facteurs importants figurent 1) la croissance démographique et le développement économique et technologique, la demande de denrées alimentaires, de fourrage et de fibres (y compris pour l'alimentation) et les avancées en matière d'agriculture et de foresterie; 2) les incidences du changement climatique sur l'utilisation des terres à l'avenir, y compris leur capacité d'adaptation; 3) l'importance de la dégradation des sols, de la pénurie d'eau et des exigences en matière de biodiversité et de protection de la nature.
- Les flux de résidus de l'agriculture et de la foresterie et les terres agricoles non exploitées (ou surexploitées et devenant donc marginales ou dégradées) sont des sources importantes pour le développement de la production de biomasse à vocation énergétique, tant à court qu'à long terme. Le maintien de la biodiversité et la nécessité d'assurer la protection des écosystèmes et d'empêcher la dégradation des sols imposent des limites à l'extraction de résidus dans l'agriculture et la foresterie.
- La culture de plantes appropriées (plantes vivaces ou espèces ligneuses, par exemple) peut permettre d'obtenir des potentiels techniques plus élevés en rendant possible la production de bioénergie sur des terres peu adaptées aux cultures vivrières traditionnelles, notamment si l'on considère que les cultures traditionnelles sur ce genre de terres peuvent donner lieu à des émissions de carbone du sol.
- Des modes d'utilisation des terres multifonctionnels avec production de bioénergie intégrée dans l'agriculture et la sylviculture pourraient contribuer au maintien de la biodiversité et permettre de restaurer ou de maintenir la productivité des sols et la viabilité des écosystèmes.
- Les régions où l'eau est rare peuvent avoir une production limitée. Il faut tenir compte du fait que la reconversion des terres en plantations de biomasse peut réduire les disponibilités en eau en aval. Le recours à des cultures énergétiques convenables résistant à la sécheresse peut contribuer à l'adaptation aux conditions de pénurie d'eau. Lors de l'évaluation du potentiel des ressources en biomasse, il faut analyser soigneusement les contraintes et les opportunités compte tenu des disponibilités en eau et des usages concurrents.

Compte tenu des restrictions indiquées ci-dessus, l'étude d'experts a conclu que les niveaux de mise en valeur de la biomasse énergétique d'ici 2050 pourrait être de l'ordre de 100 à 300 EJ. Toutefois, ce potentiel présente de grandes incertitudes, notamment pour ce qui concerne la situation du marché et des politiques mises en œuvre, et est fortement dépendant du rythme des améliorations apportées dans le secteur agricole en ce qui concerne la production de denrées alimentaires, de fourrage, de fibres et les produits forestiers. Selon un exemple tiré de la documentation, la bioénergie pourrait passer d'environ 100 EJ/an en 2020 à 130 EJ/an en 2030 et atteindre 184 EJ/an en 2050. [2.2.1, 2.2.2, 2.2.5]

Pour atteindre la limite supérieure du niveau de mise en valeur de 300 EJ/an mentionnée par l'étude d'experts (voir la figure TS.2.2), il faudrait déployer d'importants efforts sur le plan des politiques, centrés en particulier sur des améliorations et une efficacité accrue dans le secteur agricole et sur une bonne gouvernance de l'utilisation des terres, par exemple par le zonage.

2.3 Technologies et applications de la bioénergie

Les applications commerciales des technologies bioénergétiques incluent la production de chaleur (à des échelles allant de la cuisson familiale des aliments sur des cuisinières à de vastes systèmes de chauffage urbain); la production d'énergie à partir de la biomasse par combustion, production combinée de chaleur et d'électricité ou cocombustion de biomasse et de combustibles fossiles; et la production de biocombustibles liquides de première génération à partir de cultures d'oléagineux (biogazole) et de plantes destinées à la production de sucre et d'amidon (éthanol), comme le montrent les traits pleins de la figure TS.2.3. Cette figure indique aussi les matières premières (comme la biomasse aquatique), les modes de conversion et les produits en cours d'élaboration[8]. [2.3, 2.6, 2.7, 2.8]

La section 2.3 porte sur des questions essentielles relatives à la production de biomasse et à la logistique de la fourniture de matières premières aux usagers (particuliers pour la biomasse traditionnelle et moderne, entreprises qui utilisent et produisent des produits de l'énergie secondaire ou, de plus en plus, un secteur informel de production et de distribution de charbon de bois). Les technologies de conversion qui permettent de transformer la biomasse en vecteurs pratiques d'énergie secondaire sont fondées sur des procédés thermochimiques, chimiques ou biochimiques et sont résumées dans les sections 2.3.1 à 2.3.3 et 2.6.1 à 2.6.3. Le chapitre 8 porte sur l'intégration des produits énergétiques dans les systèmes énergétiques actuels et en cours d'élaboration. [2.3.1–2.3.3, 2.6.1–2.6.3]

8 Les biocombustibles produits par de nouveaux procédés, comme les produits lignocellulosiques, sont également appelés biocombustibles perfectionnés ou de nouvelle génération.

2.4 Situation mondiale et régionale des marchés et de la mise en valeur à l'échelon industriel

Une étude des marchés et des politiques concernant la biomasse montre que la bioénergie a connu une évolution rapide ces dernières années, comme dans le cas de l'utilisation de la biomasse moderne pour obtenir des vecteurs d'énergie liquides et gazeux (augmentation de 37 % entre 2006 et 2009). Des projections de l'AIE, notamment, prévoient que la biomasse va contribuer à un accroissement substantiel de la part des ÉR, déterminé dans certains cas par des objectifs nationaux. Le commerce international de la biomasse et des biocombustibles a également pris beaucoup plus d'importance ces dernières années, avec environ 6 % (et jusqu'à 9 % en 2008) de biocombustibles (éthanol et biogazole uniquement) échangés sur le plan international et un tiers de la production totale de granulés à vocation énergétique en 2009. Cette production a d'ailleurs favorisé l'utilisation de la biomasse dans des régions où les approvisionnements étaient limités et a mobilisé des ressources provenant de régions où la demande était insuffisante. Néanmoins, il reste de nombreux obstacles au développement d'un négoce efficace de la biomasse et des biocombustibles qui réponde en même temps à des critères de durabilité. [2.4.1, 2.4.4]

Dans de nombreux pays, le cadre d'action pour la bioénergie et, en particulier, les biocombustibles a évolué rapidement et de façon spectaculaire ces dernières années. Le débat sur la biomasse dans le contexte de la concurrence entre denrées alimentaires et combustibles et les préoccupations croissantes à propos d'autres conflits a entraîné un fort mouvement en faveur de l'élaboration et de la mise en œuvre de critères et de cadres de durabilité et de la modification des niveaux et du calendrier fixés pour la bioénergie et les biocombustibles. En outre, le soutien en faveur d'un bioraffinage perfectionné et de solutions de prochaine génération pour les biocombustibles[9] incite à une mise en place plus durable de la bioénergie. [2.4.5]

Un soutien constant et stable des politiques mises en œuvre a grandement contribué au renforcement de la capacité de production de biomasse et des marchés connexes, ce qui a nécessité des infrastructures et une capacité de conversion qui est devenue de plus en plus compétitive. Cette situation a conduit au succès du programme brésilien, au point que la production d'éthanol est maintenant moins chère que la production d'essence. La bagasse de fibre de canne à sucre sert à produire de la chaleur et de l'électricité, avec un éventail de sources d'énergie fondé essentiellement sur les ÉR et qui réduise au minimum les importations de pétrole. La Suède et la Finlande ont aussi connu un développement important de l'électricité renouvelable et de la gestion de ressources intégrées, qui a débouché progressivement sur des innovations telles que la symbiose d'entreprises industrielles coimplantées. Les États-Unis d'Amérique ont pu accroître rapidement leur

9 Les biocombustibles produits au moyen de nouveaux procédés (comme la biomasse lignocellulosique) sont également appelés biocombustibles perfectionnés.

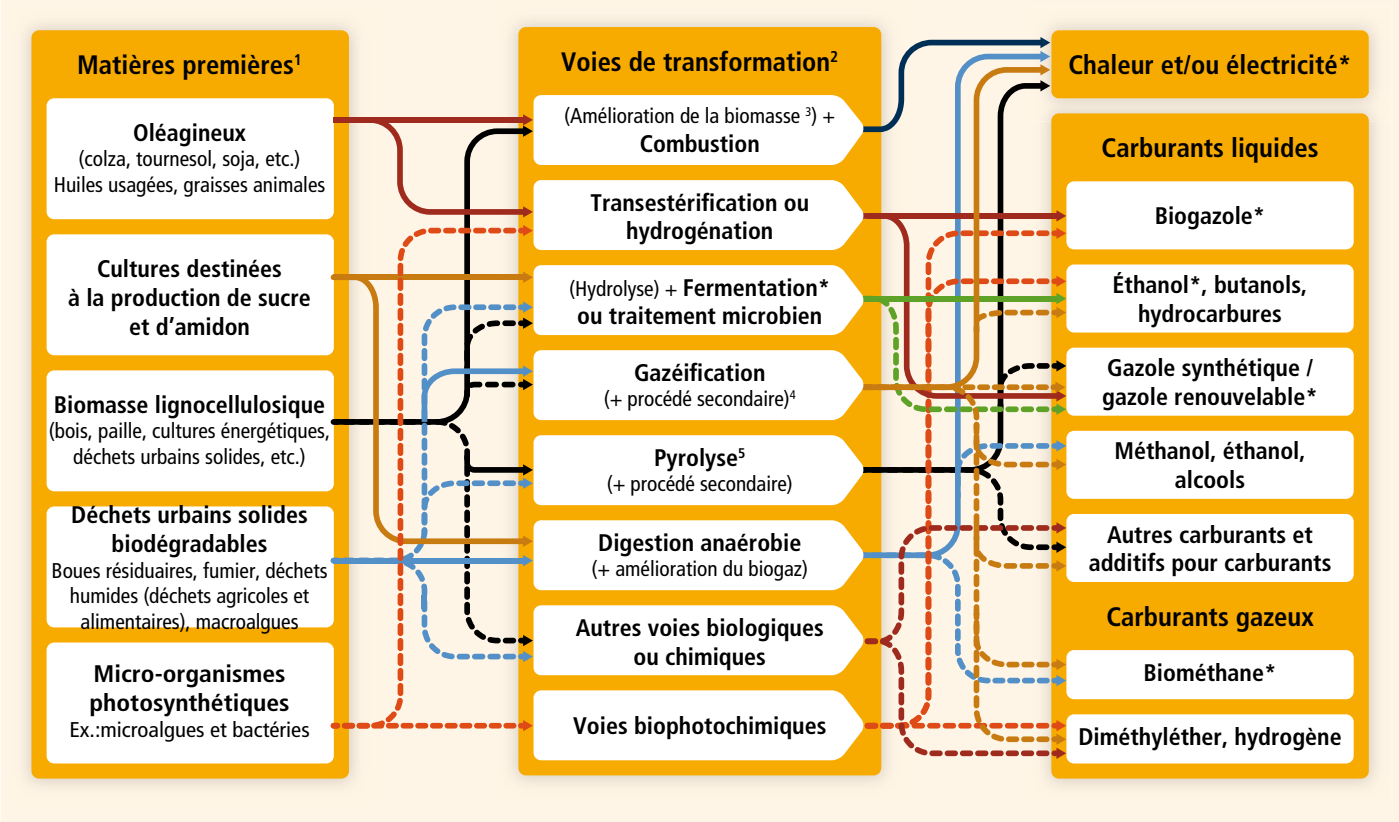


Figure TS.2.3 | Vue schématique des diverses voies bioénergétiques commercialisées (traits pleins) et en cours d'élaboration (pointillés) allant des matières premières de la biomasse à la chaleur, à l'électricité, à la production combinée de chaleur et d'électricité et aux combustibles liquides ou gazeux en passant par diverses voies de conversion thermochimiques, chimiques, biochimiques et biologiques. Les produits commercialisés sont signalés par un astérisque. [Figure 2.2, 2.1.1]

Notes: 1) Certaines parties de chaque matière première pourraient être utilisées selon d'autres voies. 2) Chaque voie peut aussi donner lieu à l'élaboration de coproduits. 3) L'amélioration de la biomasse inclut des procédés de densification (comme la pelletisation, la pyrolyse, la torréfaction, etc.). 4) Processus de digestion anaérobie de divers gaz pouvant être améliorés pour produire du biométhane, essentiellement du méthane, principale composante du gaz naturel. 5) Il pourrait y avoir d'autres voies de traitement thermique: voie hydrothermique, liquéfaction, etc. Parmi les autres voies chimiques figure la reformation en phase aqueuse.

production en harmonisant les politiques nationales et celles de leurs différents États pour ce qui concerne l'électricité dans les années 80 à 90 et les biocombustibles depuis les années 90 jusqu'à maintenant, alors que le prix du pétrole et l'instabilité ont augmenté dans les principaux pays producteurs, et favoriser ainsi le développement rural et la sûreté des approvisionnements en énergie. [2.4.5]

Les pays ont des priorités, des approches, des choix technologiques et des plans de soutien différents pour développer la bioénergie. La complexité des marchés et des politiques apparaît lorsque les pays cherchent à trouver le juste milieu entre les priorités définies en matière d'agriculture et d'utilisation des terres, de sécurité et de politiques énergétiques, de développement rural et de protection du milieu, tout en tenant compte de leur stade particulier de développement, de leur accès géographique aux ressources et de la disponibilité et du prix de ces ressources. [2.4.5, 2.4.7]

À mesure que les politiques relatives à la bioénergie et aux biocombustibles deviennent plus globales, on observe généralement que la durabilité devient un critère plus important au départ. Il en va ainsi dans l'Union européenne, aux États-Unis d'Amérique et en Chine, mais aussi dans de nombreux pays en développement tels que le Mozambique et la Tanzanie. Il s'agit d'une tendance positive, mais nullement stabilisée. Les 70 initiatives répertoriées à l'échelle du globe en 2009 en vue de concevoir et de mettre en œuvre des cadres pour la durabilité et des systèmes de certification concernant la bioénergie et les biocombustibles ainsi que l'agriculture et la foresterie pourraient aboutir à une fragmentation des efforts déployés. La nécessité d'une harmonisation ainsi que d'une collaboration et d'un dialogue aux niveaux international et multilatéral est largement soulignée. [2.4.6, 2.4.7]

2.5 Incidences environnementales et sociales

La production de bioénergie a des interactions complexes avec d'autres systèmes sociaux et environnementaux. Les préoccupations – qui vont de la santé et de la pauvreté à la biodiversité et à la rareté et à la qualité des ressources en eau – varient selon de nombreux facteurs, dont les conditions locales, le choix des technologies et des matières premières, la formulation des critères de durabilité et la conception et la mise en œuvre de projets précis. Le plus important, sans doute, est la gestion et la gouvernance globales de l'utilisation des terres lorsque la biomasse est produite à des fins énergétiques, en plus de la satisfaction des besoins alimentaires ou autres liés à la production agricole, animale et de fibres. [2.5]

Un changement direct d'affectation des terres se produit lorsque la production de matières premières bioénergétiques modifie un mode existant d'utilisation des terres, entraînant une modification des stocks de carbone au-dessus du sol et dans le sol. Un changement indirect d'affectation des terres a lieu lorsqu'une modification du niveau de production d'un produit agricole (par ex. une réduction de la production de denrées alimentaires ou d'aliments du bétail due à une reconversion des terres agricoles pour produire des matières premières bioénergétiques) entraîne un infléchissement par le biais du marché des activités de gestion des terres (un changement direct d'affectation des terres, par exemple) en dehors de la région d'extension de la production primaire. Un changement indirect d'affectation des terres n'est pas observable directement et est complexe à modéliser et difficile à attribuer à une seule cause, compte tenu de l'interaction dynamique des multiples acteurs, secteurs industriels, pays, politiques et marchés. [2.5.3, 9.3.4.1]

Si une augmentation de l'utilisation des terres due à la production de biomasse à des fins bioénergétiques s'accompagne d'une amélioration de la gestion agricole (par exemple d'une. augmentation de la production de plantes vivaces et de bétail sur des sols dégradés), les effets indésirables d'un changement indirect d'affectation des terres peuvent être évités. Faute d'une gestion appropriée, des conflits peuvent apparaître. Les performances globales des systèmes de production bioénergétique sont donc liées à la gestion des terres et à l'exploitation des ressources en eau. Un équilibre existe entre ces divers facteurs, qu'il convient de gérer au moyen de stratégies et de décisions appropriées (figure TS.2.4). [2.5.8]

La plupart des systèmes bioénergétiques peuvent contribuer à l'atténuation des effets du changement climatique s'ils remplacent des systèmes fondés sur les combustibles fossiles traditionnels et si les émissions émanant de la production de bioénergie restent faibles. De fortes émissions d'oxyde nitreux résultant de la production de matières premières et de l'emploi de combustibles fossiles (surtout de charbon) lors du processus de conversion de la biomasse peuvent avoir des incidences importantes sur l'atténuation des GES. Pour réduire les émissions de GES, plusieurs solutions sont envisageables, dont des pratiques exemplaires pour la gestion des engrais, l'intégration des processus en vue de réduire les pertes au minimum, l'utilisation de la chaleur excédentaire et l'emploi de la biomasse ou d'autres sources d'énergie à faible intensité de carbone comme combustibles industriels. Toutefois, l'efficacité de déplacement (rapport entre les émissions de GES et le carbone présent dans la biomasse) peut être faible si les matières premières supplémentaires de la biomasse sont employées pour obtenir une énergie à usage industriel dans le processus de conversion, sauf si l'énergie déplacée provient du charbon. Si les matières premières émanant de la biomasse servent à produire à la fois des combustibles liquides et de l'électricité, l'efficacité de déplacement peut être élevée. [2.5.1–2.5.3]

Il existe diverses méthodes d'évaluation des émissions de GES correspondant aux principales options en matière de biocombustibles de première et de deuxième génération. Des projets bioénergétiques bien administrés peuvent réduire sensiblement ces émissions par rapport aux procédés fondés sur des combustibles fossiles, surtout dans le cas de la biomasse lignocellulosique utilisée pour produire de l'électricité et de la chaleur et lorsque cette matière première est disponible dans le commerce. Des avantages peuvent être obtenus en utilisant de façon appropriée des résidus agricoles et des déchets organiques, principalement des résidus animaux. La plupart des systèmes actuels de production de biocombustibles permettent de réduire très nettement les émissions de GES par rapport aux combustibles fossiles déplacés, si l'on ne tient pas compte des effets des changements indirects d'affectation des terres. La figure T.S.2.5 donne un aperçu des fourchettes d'émissions de GES pendant leur cycle de vie associées à diverses technologies de production d'énergie à partir de la biomasse moderne par comparaison avec les systèmes de référence correspondants faisant appel aux combustibles fossiles qui sont utilisés couramment dans ces secteurs. Des chaînes à usage commercial telles que la production directe d'électricité à partir de la biomasse, la conversion des biogaz issus de la digestion anaérobie en électricité et les techniques de chauffage modernes très efficaces qui sont présentées à droite de la figure permettent de fortement réduire les émissions de GES par comparaison avec les technologies fondées sur les combustibles fossiles. On trouvera à la figure 2.11 davantage de détails sur la méta-analyse des GES, où sont comparées de multiples technologies de production d'électricité à partir de la biomasse et où l'on constate que la majorité des estimations des émissions de GES pendant leur cycle de vie se situent entre 16 et 74 g éqCO_2/kWh.

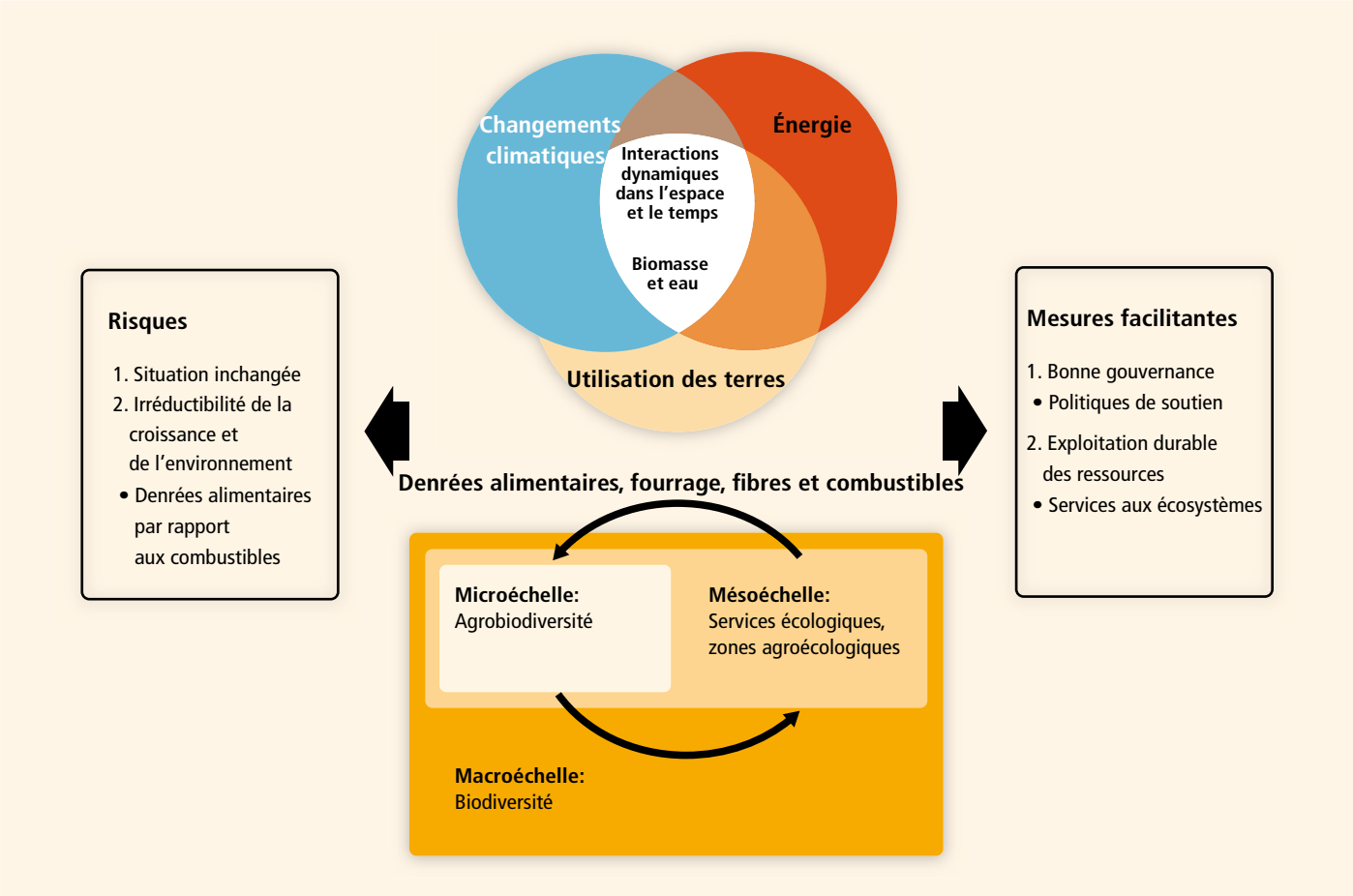


Figure TS.2.4 | Interactions dynamiques complexes entre la société, l'énergie et l'environnement liées à la bioénergie. Les méthodes fondées sur une production non coordonnée des denrées alimentaires et des combustibles qui prévalent en cas de mauvaise gouvernance des modes d'utilisation des terres sont des exemples de pratiques inchangées. [Figure 2.15]

Les techniques actuelles et à venir sont abordées pour ce qui concerne le secteur des transports. Pour les véhicules légers, la canne à sucre actuellement et les matières premières lignocellulosiques à moyen terme permettent de réduire sensiblement les émissions par rapport à l'essence. Dans le cas du gazole, la fourchette des émissions de GES dépendra de l'empreinte carbone des matières premières. Le biométhane issu de biogaz permet aussi de réduire les émissions (par rapport au gaz naturel) dans le secteur des transports. [2.5.2, 9.3.4.1]

Lorsque des sols à teneur élevée en carbone (notamment les forêts et surtout les forêts sur tourbe bien drainées) sont reconvertis dans la production de bioénergie, les émissions en amont peuvent engendrer un décalage de quelques décennies à plusieurs siècles avant qu'une réduction nette des émissions soit effective. En revanche, l'aménagement de plantations bioénergétiques sur des sols marginaux ou dégradés peut conduire à l'assimilation de CO_2 dans ces sols et dans la biomasse qui y pousse, laquelle, lorsqu'elle est récoltée aux fins de production d'énergie, remplacera des combustibles fossiles. Une bonne gouvernance du mode d'utilisation des terres (un zonage approprié, par exemple) et le choix des systèmes de production de biomasse sont des éléments essentiels pour obtenir de bonnes performances. L'emploi de déchets organiques de consommation et de sous-produits de l'agriculture et de la foresterie n'entraîne pas de changement d'affectation des terres si les sources de biomasse n'ont pas été utilisées à d'autres fins. [2.5.3]

Les matières premières lignocellulosiques destinées à la production de bioénergie peuvent réduire la pression qui s'exerce sur les terres cultivables de premier ordre. En favorisant une augmentation de la productivité de tous les modes d'utilisation des terres, on réduit les pressions associées à un changement d'affectation des sols. [2.2.4.2, 2.5.2]

La documentation disponible au sujet du changement indirect d'affectation des terres montre que les modèles initiaux avaient une résolution géographique insuffisante, ce qui a conduit à accorder une place trop importante au déboisement comme mode d'utilisation des terres. Bien qu'une étude de 2008 ait indiqué un facteur de changement indirect d'affectation des terres de 0,8 (perte de 0,8 ha de zones forestières par hectare de terres utilisées pour la bioénergie), des études ultérieures (2010) où l'on a couplé des modèles macroéconomiques et des modèles biophysiques ont indiqué une réduction jusqu'à une valeur comprise entre 0,15 et 0,3. Les principaux facteurs sont le taux d'amélioration de la gestion de l'agriculture et de l'élevage et le taux de mise en valeur de la production de bioénergie. Les conséquences de l'amélioration des modèles et des données sur la dynamique réelle de la distribution des sols dans les principaux pays producteurs de biocombustibles entraînent une réduction des incidences globales des changements d'affectation des terres, mais toujours avec de grandes incertitudes. Selon toutes les études, la gestion de l'utilisation des terres dans son ensemble est un facteur essentiel. La recherche visant à améliorer les méthodes d'évaluation des

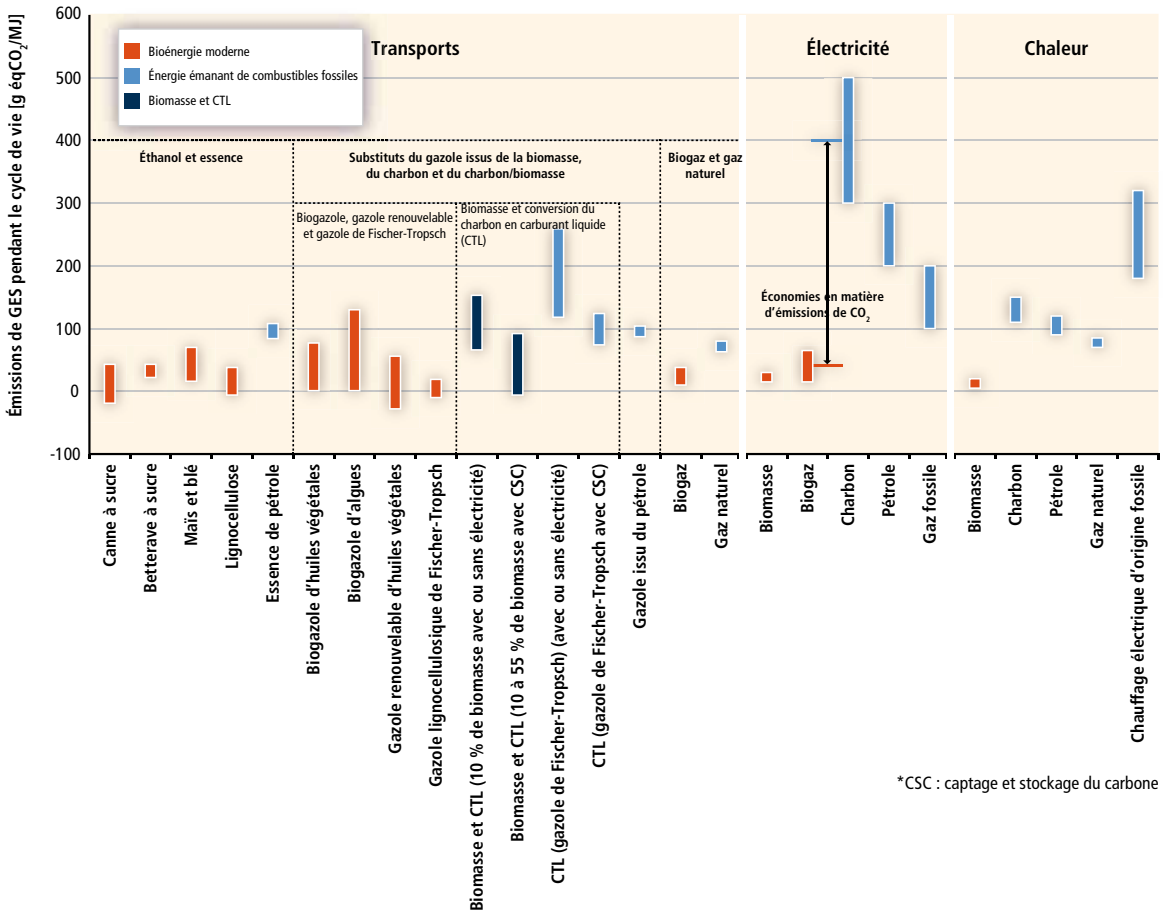


Figure TS.2.5 | Fourchettes des émissions de GES par unité de production d'énergie (MJ) émanant des principales chaînes de bioénergie moderne par rapport aux systèmes actuels et à certains systèmes perfectionnés de production d'énergie issue de combustibles fossiles (les variations nettes des stocks de carbone liés aux modes d'utilisation des terres et les incidences de la gestion des terres étant exclues). Les systèmes commerciaux et en cours d'élaboration (biocombustibles issus d'algues, gazole de Fischer-Tropsch, etc.) pour les technologies faisant appel à la biomasse et aux sources d'énergie fossiles sont illustrés. Lorsque des technologies de captage et de stockage du carbone sont mises au point, le captage et le stockage des émissions de carbone issues de la biomasse peuvent compenser les émissions dues à la production d'énergie à partir de combustibles fossiles. [Figure 2.10]

changements d'affectation des terres et à accroître la disponibilité et la qualité des informations concernant l'utilisation actuelle des sols, les produits issus de la bioénergie et d'autres facteurs potentiels importants des changements d'affectation des terres peut faciliter l'évaluation et offrir des outils permettant d'atténuer les risques de tels changements induits par la bioénergie. [2.5.3, 9.3.4.1]

Les effets de la bioénergie sur la pollution de l'air dépendent de la technologie bioénergétique employée (y compris les technologies de lutte contre la pollution) et de la technologie énergétique déplacée. Ainsi, pour ce qui concerne l'utilisation de la biomasse traditionnelle, l'amélioration des cuisinières fonctionnant à la biomasse peut permettre une atténuation substantielle et rentable des émissions de GES, avec des avantages connexes importants du point de vue de la santé et de la qualité de vie pour les 2,7 milliards de personnes qui ont recours à la biomasse traditionnelle pour la cuisson des aliments et le chauffage. [2.5.4, 2.5.5]

Faute d'une gestion correcte, l'accroissement de la production de biomasse pourrait entraîner une augmentation de la concurrence pour l'eau dans des zones critiques, ce qui est hautement indésirable. L'eau est un problème essentiel qu'il convient de mieux analyser au niveau régional pour comprendre toutes les conséquences de l'évolution de la végétation et de la gestion de l'utilisation des terres. Selon des études récentes, il est possible d'apporter des améliorations considérables à l'efficacité de l'exploitation des ressources en eau dans le cadre de l'agriculture traditionnelle, des cultures bioénergétiques et, selon l'endroit et le climat, des régimes de cultures pérennes, en améliorant la rétention d'eau et en réduisant l'évaporation directe des sols. [2.5.5, 2.5.5.1]

On peut faire des observations semblables en ce qui concerne la biodiversité, bien que l'incertitude scientifique soit plus importante en raison de débats en cours sur les méthodes d'évaluation des incidences sur la biodiversité. Il est clair que le développement des monocultures à grande échelle au détriment des zones naturelles est préjudiciable à la biodiversité, comme le souligne la Convention sur la diversité biologique de 2007. Cependant, l'intégration de diverses graminées vivaces et cultures ligneuses dans les pratiques agricoles peut aussi accroître la teneur des sols en carbone et leur productivité, réduire les glissements de terrain superficiels et les «crues soudaines» locales, créer des couloirs écologiques, atténuer l'érosion due au vent et à l'eau et réduire la quantité de sédiments et d'éléments nutritifs transportés dans les cours d'eau. La récolte de la biomasse forestière peut améliorer les conditions de replantation, accroître la productivité et la croissance des peuplements restants et réduire les risques pour les espèces sauvages. [2.5.5.3]

Les répercussions sociales d'une vaste augmentation de la production de bioénergie sont très complexes et difficiles à quantifier. La demande de biocombustibles, qui est un facteur déterminant de l'accroissement de la demande dans le secteur agricole et forestier, contribue à une augmentation mondiale du prix des denrées

alimentaires. Même si l'on tient compte de l'avantage d'une hausse des prix pour les agriculteurs pauvres, cette hausse du prix des denrées alimentaires influe négativement sur le niveau de pauvreté, la sécurité alimentaire et la malnutrition des enfants. D'autre part, les biocombustibles peuvent donner aux pays en voie de développement la possibilité de faire progresser le développement rural et la croissance de l'agriculture, surtout si cette croissance se révèle durable sur le plan économique. En outre, il est possible de réduire les dépenses en combustibles fossiles importés. Toutefois, la possibilité pour les agriculteurs de bénéficier de ces avantages dépend largement de la façon dont les chaînes de production sont organisées et dont l'utilisation des terres est gérée. [2.5.7.4–2.5.7.6, 9.3.4]

L'élaboration de cadres et de normes de durabilité peut réduire les incidences négatives éventuelles de la production de bioénergie et conduire à une efficacité plus grande que celle des systèmes actuels. Si la bioénergie peut contribuer à une atténuation des effets des changements climatiques, à une sûreté et à une diversité plus grandes des approvisionnements en énergie et au développement économique des pays développés et en développement, les effets de la bioénergie sur la durabilité de l'environnement peuvent être positifs ou négatifs selon les conditions locales, la façon dont les critères sont définis et la manière dont les projets sont conçus et mis en œuvre, entre autres nombreux facteurs. [2.4.5.2, 2.8.3, 2.5.8, 2.2.5, 9.3.4]

2.6 Perspectives d'amélioration et d'intégration des technologies

De nouvelles améliorations de la production de matières premières issues de la biomasse et des technologies de conversion sont possibles et nécessaires pour que la bioénergie puisse contribuer à l'approvisionnement mondial en énergie selon la valeur extrême supérieure de l'intervalle des niveaux de mise en valeur présentés à la figure TS.2.2. Accroître la productivité des terres, que ce soit à des fins alimentaires ou énergétiques, est une condition préalable essentielle à la mise en valeur à grande échelle de la biomasse énergétique, car cela libérerait davantage de terres pour la culture de biomasse et réduirait la demande associée de terres. En outre, des systèmes multifonctions d'exploitation des sols et des ressources en eau pourraient être mis en place, la bioénergie et les bioraffineries étant intégrées dans les systèmes agricoles et forestiers, ce qui contribuerait à la conservation de la biodiversité et au rétablissement ou au maintien de la productivité des sols et de la santé des écosystèmes. [2.6.1]

Les matières premières lignocellulosiques sont particulièrement prometteuses du fait 1) qu'elles ne concurrencent pas directement la production de denrées alimentaires, 2) qu'elles peuvent être cultivées spécifiquement à des fins énergétiques, ce qui contribuerait à augmenter la production par unité de surface et à élargir le marché des produits énergétiques, 3) qu'elles peuvent être récoltées en tant que résidus de la production végétale et d'autres systèmes qui augmentent l'efficacité de l'utilisation des terres et 4) qu'elles permettent l'intégration des activités de gestion des déchets avec diverses autres industries, ce qui offrent des perspectives de symbiose industrielle au niveau local. La documentation concernant les technologies de conversion et l'évolution des investissements dans ce secteur indique que l'industrie est prête à accroître la diversification des produits, comme l'a fait l'industrie pétrolière, en s'intéressant davantage aux carburants à haute densité énergétique pour le transport aérien, application pour laquelle d'autres carburants sans carbone n'ont pas été envisagés. [2.6.4]

Une nouvelle génération de matières premières aquatiques qui produisent des lipides algaux permettant d'obtenir du gazole, des carburéacteurs ou des produits à plus haute valeur issus du CO_2 et de l'eau avec la lumière du soleil peut donner lieu à des stratégies susceptibles de réduire les incidences en matière d'utilisation des terres, les algues pouvant pousser dans des eaux saumâtres, sur des terres impropres à la culture et dans des eaux contenant des déchets industriels. Les organismes algaux s'accommodent de l'obscurité et peuvent métaboliser des sucres pour fournir des combustibles et des produits chimiques. De nombreux microbes pourraient devenir des usines microscopiques produisant des produits, des combustibles et des matériaux spécifiques qui réduiraient la dépendance de la société par rapport aux sources d'énergie fossile. [2.6.1.2, 2.7.3]

Bien que des progrès techniques importants aient été réalisés, le traitement relativement complexe que doit subir la biomasse lignocellulosique solide et l'intégration de certaines nouvelles mesures prennent du temps et nécessitent un soutien pour franchir les étapes les plus périlleuses (la «vallée de la mort») du développement dans les usines de démonstration ou prototypes et pendant la phase de commercialisation précoce. Le coût prévu des biocombustibles issus d'un grand nombre de sources et procédés est très sensible au prix des matières premières et varie de 10 à 30 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ. Les académies nationales américaines prévoient, à l'horizon 2035, une diminution de 40 % des coûts d'exploitation pour ce qui est des voies biochimiques, qui se situeraient entre 12 et 15 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ. [2.6.3, 2.6.4]

Actuellement, la gazéification de la biomasse fournit environ 1,4 GW_{th} pour les applications industrielles, les applications thermiques et la cocombustion. Les systèmes de petite taille allant des cuisinières et des systèmes de digestion anaérobie aux petits gazogènes ont gagné en efficacité avec le temps. De nombreux acteurs sont particulièrement intéressés par les centrales à cycle combiné et gazéification intégrée (IGCC) utilisant la bioénergie comme matière première. S'il semble que ces centrales seront plus efficaces que les systèmes traditionnels à turbine à vapeur, elles n'ont cependant pas encore atteint le stade d'une commercialisation complète. Toutefois, on peut aussi les intégrer plus efficacement à des systèmes de captage et de stockage du carbone. Outre qu'il sert à produire de l'électricité, le gaz synthétique issu des unités de gazéification peut aussi servir à produire une vaste gamme de combustibles (méthanol, éthanol, butanols et gazole synthétique) ou à produire simultanément de l'électricité et des combustibles. Des problèmes techniques ont empêché jusqu'ici une mise en valeur rapide de cette technologie. La transformation de la biomasse en liquides fait appel à des technologies commerciales mises au point pour les combustibles fossiles. La figure TS.2.5 présente les prévisions concernant les émissions dues à la transformation du charbon en combustibles liquides et la compensation des émissions que peut assurer la biomasse en éliminant des GES de l'atmosphère lorsqu'on la couple avec des technologies de captage et de stockage du carbone. On prévoit que le coût de production des produits gazeux (hydrogène, méthane, gaz naturel synthétique), qui en sont au début de la phase de commercialisation, sera plus faible. [2.6.3, 2.6.4]

Les huiles pyrolytiques et hydrothermiques sont des huiles transportables à faible prix utilisées pour la production de chaleur ou pour la production combinée d'électricité et de chaleur, qui pourraient devenir une matière première utilisable dans des installations autonomes ou couplée à des raffineries pétrochimiques. [2.3.4, 2.6.3, 2.6.4, 2.7.1]

La production de biogaz émanant de divers flux de déchets et leur transformation en biométhane ont déjà de petits marchés pour des applications multiples, y compris les transports dans de petits réseaux en Suède et la production de chaleur et d'électricité dans des pays nordiques et européens. Un facteur essentiel est la combinaison des flux de déchets, y compris les résidus de l'agriculture. L'amélioration des technologies et la réduction des coûts sont à cet égard nécessaires. [2.6.3, 2.6.4]

De nombreuses filières faisant appel à la bioénergie et aux biocombustibles permettent de procéder au captage et au stockage du carbone en offrant d'importantes possibilités de réduction et de séquestration des émissions. À mesure que les technologies de captage et de stockage du carbone sont perfectionnées et vérifiées, le couplage de la fermentation avec des flux de CO_2 concentrés ou des systèmes à cycle combiné et gazéification intégrée offre la possibilité d'obtenir des combustibles neutres en carbone ou, dans certains cas, des émissions nettes négatives. La réalisation de cet objectif sera facilitée par des systèmes bien conçus englobant une sélection de la biomasse, un système d'approvisionnement en matières premières, la conversion en un vecteur d'énergie secondaire et l'intégration de ce vecteur dans les systèmes énergétiques actuels et à venir. [2.6.3, 2.6.4, 9.3.4]

2.7 Coûts actuels et tendances

La production de biomasse, la logistique de l'approvisionnement et les processus de conversion contribuent au coût des produits finals. [2.3, 2.6, 2.7]

L'économie et le rendement des matières premières varient beaucoup selon les régions du monde et les types de matières premières, les coûts allant de 0,9 à 16 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ (données de 2005 à 2007). La production de matières premières destinées à la bioénergie concurrence la foresterie et le secteur alimentaire, mais des systèmes intégrés de production tels que l'agroforesterie ou les cultures mixtes peuvent offrir des synergies parallèlement à d'autres services environnementaux. La manutention et le transport de la biomasse depuis les lieux de production jusqu'aux usines de transformation peuvent représenter 20 à 50 % du coût total de la production de bioénergie. Des facteurs tels que l'augmentation d'échelle et les innovations techniques augmentent la concurrence et contribuent à une baisse de plus de 50 % du coût économique et énergétique des chaînes d'approvisionnement. La densification par fabrication de granulés ou d'agglomérés est nécessaire pour le transport à des distances de plus de 50 km. [2.3.2, 2.6.2]

Actuellement, divers systèmes bioénergétiques importants, et en particulier les systèmes de production d'éthanol à partir de la canne à sucre et les systèmes de production de chaleur et d'électricité à partir de résidus et de déchets de la biomasse, peuvent être mis en valeur de façon compétitive. [Tableaux 2.6 et 2.7] Selon une méthode normalisée présentée à l'annexe II et d'après les données sur les coûts et les performances résumées à l'annexe III, les coûts de production estimatifs des systèmes bioénergétiques commerciaux à diverses échelles et selon les régions géographiques sont résumés à la figure TS.2.6. Les valeurs présentées sont le coût de production, le coût de la logistique pour l'approvisionnement et le coût de conversion. [1.3.2, 2.7.2, 10.5.1, annexe II, annexe III]

Les coûts varient selon les régions du monde, les types de matières premières, le coût de l'approvisionnement en matières premières, l'échelle de production de la bioénergie et l'époque de l'année, la production étant souvent saisonnière. On peut prendre des exemples de fourchettes des coûts moyens actualisés[10] estimatifs de la bioénergie commerciale: de 2 à 48 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ environ pour les biocombustibles liquides et gazeux; de 3,5 à 25 cents É.-U.$_{2005}$/kWh environ (10 à 50 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ) pour l'électricité et les systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité de plus de 2 MW environ (avec un prix des matières premières de 3 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ et un coût de l'énergie thermique de 5 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ pour la vapeur et de 12 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ pour l'eau chaude); et de 2 à 77 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ environ pour les systèmes de chauffage des habitations et de chauffage urbain avec un coût des matières premières de l'ordre de 0 à 20 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ environ (des déchets solides aux granulés de bois). Ces chiffres sont fondés sur des données de 2005 à 2008 et sont exprimés en dollars É.-U.$_{2005}$ avec un taux d'actualisation de 7 %. Les fourchettes de prix des biocombustibles indiquées à la figure TS.2.6 sont valables pour les Amériques, l'Inde, la Chine et les pays d'Europe. Pour les systèmes de chauffage, les prix sont essentiellement européens, et les prix de l'électricité et de la production combinée de chaleur et d'électricité correspondent essentiellement aux grands pays consommateurs. [2.3.1–2.3.3, 2.7.2, annexe III]

À moyen terme, les performances des technologies bioénergétiques actuelles peuvent encore être considérablement améliorées, alors que les nouvelles technologies offrent la perspective d'une mise en valeur plus efficace et plus compétitive de la biomasse à des fins énergétiques (et pour la production de matériaux). Les systèmes bioénergétiques, notamment aux fins de production d'éthanol et de bioélectricité, ont donné lieu à un apprentissage technique et à une réduction connexe des coûts, avec des taux d'apprentissage comparables à ceux d'autres technologies ÉR. Cela s'applique aux systèmes de culture (à la suite des progrès de la gestion de l'agriculture pour la canne à sucre et le maïs), aux systèmes d'approvisionnement et à la logistique (comme on l'a observé dans des pays nordiques et pour la logistique internationale) et à la conversion (production d'éthanol, d'électricité et de biogaz), comme l'indique le tableau TS.2.2.

Bien qu'on n'ait pas étudié en détail l'ensemble des possibilités de la bioénergie présentées au chapitre 2 pour ce qui est de l'apprentissage technique, on a constaté une réduction du coût et une amélioration des performances environnementales de plusieurs systèmes bioénergétiques importants. Toutefois, la plupart de ces systèmes nécessitent encore des subventions gouvernementales allouées pour soutenir le développement économique (par ex. la réduction de la pauvreté et la sûreté de l'approvisionnement en énergie) et pour d'autres motifs propres aux pays. Pour ce qui est de la biomasse traditionnelle, le charbon de bois issu de la biomasse est un combustible majeur dans les pays en développement et devrait bénéficier de l'adoption de fours plus efficaces. [2.3, 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3, 2.7.2, 10.4, 10.5]

La production concurrentielle de bioélectricité (issue du méthane ou de biocombustibles) dépend de l'intégration avec les systèmes d'utilisation finale, des performances d'autres sources telles que l'énergie éolienne ou solaire, du développement de technologies de captage et de stockage du carbone couplées avec la conversion du charbon et de l'énergie nucléaire. Une mise en valeur fructueuse du captage et du stockage du carbone en association avec la conversion de la

10 Comme pour la production d'électricité dans les systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité où, pour les calculs, on a attribué une valeur pour la chaleur coproduite en ce qui concerne les systèmes de production de biocombustibles, il y a des cas où l'on obtient deux coproduits, par exemple en transformant la canne à sucre en sucre, en éthanol et en électricité. Le revenu tiré des coproduits du sucre pourrait être d'environ 2,6 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ et modifierait d'autant le coût de l'éthanol.

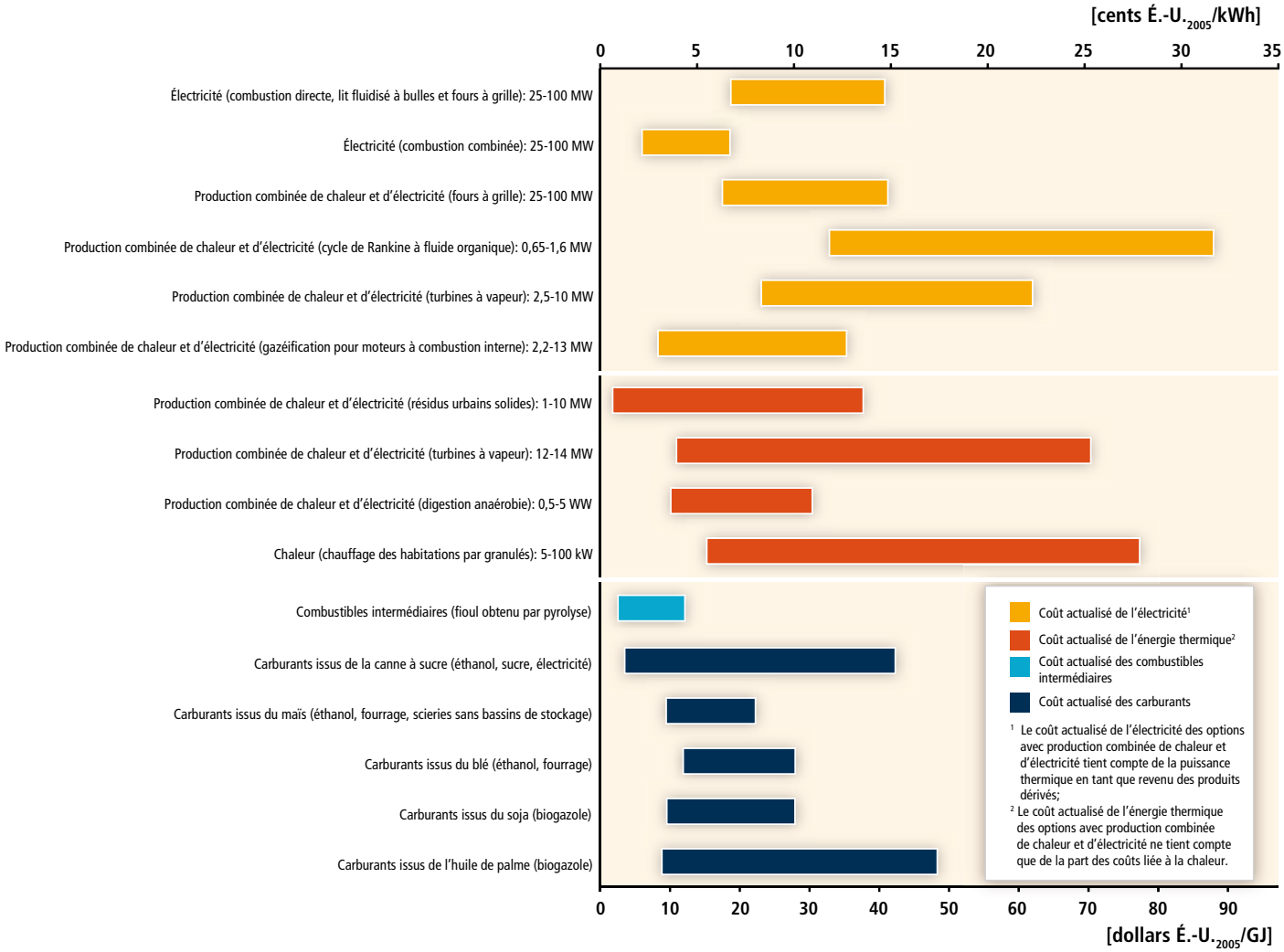


Figure TS.2.6 | Coût moyen actualisé récent type des services énergétiques émanant de systèmes bioénergétiques disponibles dans le commerce avec un taux d'actualisation de 7 %, calculé sur un an de coûts des matières premières, qui diffèrent selon les technologies. Ces coûts n'incluent pas les intérêts, les taxes, la dépréciation et l'amortissement [figure 2.18]. Pour les biocombustibles, la fourchette du coût actualisé des combustibles correspond à la production dans un grand nombre de pays, alors que le coût actualisé de l'électricité et de l'énergie thermique n'est donné que pour les marchés des grands utilisateurs des technologies pour lesquelles des données sont disponibles. Les calculs sont fondés sur un pouvoir calorifique élevé.

biomasse pourrait conduire à l'élimination de GES présents dans l'atmosphère et à des prix intéressants pour les mesures d'atténuation, mais à ce jour, cette technologie n'a reçu qu'une attention limitée. [2.6.3.3, 8.2.1, 8.2.3, 8.2.4, 8.3, 9.3.4]

Le tableau TS.2.3 indique que le coût de certaines technologies bioénergétiques clés devrait diminuer à court et à moyen terme. Des analyses récentes ont montré que le potentiel d'amélioration des biocombustibles lignocellulosiques est suffisamment important pour concurrencer le pétrole à des prix variant de 60 à 80 dollars É.-U.$_{2005}$ le baril (0,38 à 0,44 dollars É.-U.$_{2005}$ le litre). Les analyses de scénarios actuellement disponibles indiquent que si, à court terme, la recherche-développement et le soutien du marché sont suffisants, les progrès techniques pourraient permettre leur commercialisation vers 2020 (selon le prix du pétrole et du carbone). Selon certains scénarios, cela impliquerait un changement majeur dans la mise en valeur de la biomasse à des fins énergétiques, vu qu'une production concurrentielle permettrait de dissocier la mise en valeur des objectifs stratégiques (mandats) et que la demande de biomasse passerait des cultures vivrières aux résidus de la biomasse, à la biomasse forestière et à des systèmes de culture pérenne. À ce jour, on a peu étudié les conséquences de cette évolution (rapide). [2.8.4, 2.4.3, 2.4.5]

La mise au point de l'éthanol lignocellulosique et les démonstrations le concernant se poursuivent dans plusieurs pays. Une étape essentielle de cette mise au point est le prétraitement visant à surmonter le caractère récalcitrant des parois cellulaires des résidus ligneux, herbacés ou agricoles, afin que les polymères d'hydrates de carbone puissent subir une hydrolyse (par ex. au moyen d'enzymes) et une fermentation des sucres en vue d'obtenir de l'éthanol (ou du butanol) et de la lignine et de produire ensuite de la chaleur ou de l'électricité industrielle. On peut aussi combiner plusieurs étapes et procéder à un traitement biologique avec de multiples organismes en même temps. Selon une étude des progrès envisageables dans le domaine des enzymes, on peut s'attendre, à l'horizon 2030, à une réduction de 40 % des coûts grâce à l'amélioration des procédés, ce qui ferait baisser le coût estimatif de production d'un montant variant de 18 à 22 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ (données pilotes) à un montant variant de 12 à 15 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ, c'est-à-dire à une fourchette de prix compétitive. [2.6.3]

La pyrolyse de la biomasse et les principes hydrothermiques se développent aussi parallèlement à l'industrie du pétrole, et il est démontré sur le plan technique que l'amélioration des huiles pour obtenir de l'essence ou du gazole de base et même des carburéacteurs de qualité est possible. [2.6.3]

Tableau TS.2.2 | Courbes d'expérience des principales composantes des systèmes bioénergétiques et des vecteurs d'énergie finale, exprimées en tant que réduction (%) du coût (ou du prix) par doublement de la production cumulée. TAC: taux d'assimilation des connaissances (ou taux d'apprentissage); N: nombre de doublements de la production cumulée; R2: coefficient de corrélation des données statistiques; E&M: exploitation et maintenance [tableau 2.17]

Système d'apprentissage	TAC (%)	Période	Région	N	R^2
Production de matières premières					
Canne à sucre (tonnes)	32±1	1975–2005	Brésil	2,9	0,81
Maïs (tonnes)	45±1,6	1975–2005	États-Unis	1,6	0,87
Chaînes logistiques					
Copeaux de bois émanant de forêts (Suède)	15–12	1975–2003	Suède/Finlande	9	0,87–0,93
Investissements et coûts d'E&M					
Centrales de production combinée de chaleur et d'électricité	19-25	1983–2002	Suède	2,3	0,17–0,18
Centrales de production de biogaz	12	1984–1998		6	0,69
Production d'éthanol à partir de canne à sucre	19±0,5	1975–2003	Brésil	4,6	0,80
Production d'éthanol à partir de maïs (coûts d'E&M uniquement)	13±0,15	1983–2005	États-Unis	6,4	0,88
Vecteurs d'énergie finale					
Éthanol issu de canne à sucre	7	1970–1985	Brésil		
	29	1985–2002		~6,1	n.d.
Éthanol issu de canne à sucre	20±0,5	1975–2003	Brésil	4,6	0,84
Éthanol issu de maïs	18±0,2	1983–2005	États-Unis	6,4	0,96
Électricité issue de la production combinée de chaleur et d'électricité à partir de biomasse	9-8	1990–2002	Suède	~9	0,85–0,88
Électricité issue de biomasse	15	Inconnue	OCDE	n.d.	n.d.
Biogaz	0–15	1984–2001	Danemark	~10	0,97

Tableau TS.2.3 | Fourchettes des coûts de production prévus pour des technologies en cours d'élaboration [tableau 2.18]

Technologies bioénergétiques sélectionnées	Secteur énergétique (électricité, énergie thermique, transports)[6]	Coûts de production projetés pour 2020-2030 (dollars É.-U.$_{2005}$/GJ)
Cycle combiné à gazéification intégrée[1]	Électricité et/ou transports	12,8–19,1 (4,6–6,9 cents/kWh)
Gazole et carburéacteurs renouvelables provenant d'oléagineux	Transports et électricité	15–30
Biocarburants lignocellulosiques provenant de sucres[2]	Transports	6–30
Biocarburants lignocellulosiques provenant de gaz synthétique[3]		12–25
Biocarburants lignocellulosiques obtenus par pyrolyse[4]		14–24 (composants de mélanges de carburants)
Biocombustibles et biocarburants gazeux[5]	Énergie thermique et transports	6–12
Carburants et produits chimiques provenant de plantes aquatiques	Transports	30–140

Notes: 1) Prix des aliments pour animaux: 3,1 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ, cycle combiné à gazéification intégrée (à l'avenir): 30 à 300 MW, durée de vie: 20 ans, taux d'actualisation: 10 %; 2) éthanol, butanols, hydrocarbures microbiens et hydrocarbures microbiens provenant de cultures destinées à la production de sucre ou d'amidon ou de sucres lignocellulosiques; 3) gazole synthétique, méthanol et essence, etc.; voies de fermentation de gaz synthétique pour obtenir de l'éthanol; 4) pyrolyse et amélioration catalytique de la biomasse pour obtenir des constituants de l'essence et des mélanges diesel ou des carburéacteurs; 5) combustibles synthétiques pour obtenir du gaz naturel synthétique, du méthane, de l'oxyde de méthyle, de l'hydrogène provenant de la digestion thermochimique et anaérobie de la biomasse (à plus grande échelle). 6) Plusieurs applications peuvent être couplées avec le captage et le stockage du carbone lorsque ces technologies, y compris le CSC, sont parvenues à maturité et sont donc susceptibles d'éliminer des GES de l'atmosphère.

Des organismes photosynthétiques tels que les algues produisent biologiquement – à partir de CO_2, d'eau et de la lumière solaire – divers hydrates de carbone et lipides qui peuvent être utilisés directement ou pour obtenir des biocombustibles. Ces techniques ont un potentiel important à long terme du fait que l'efficacité photosynthétique des algues est beaucoup plus élevée que celle des cultures d'oléagineux. Les approvisionnements potentiels en bioénergie issue des plantes sont très incertains, mais du fait qu'on peut utiliser des eaux saumâtres et des sols très salins pour leur exploitation, leur utilisation relève d'une stratégie visant à réduire les incidences liées aux changements d'affectation des terres. [2.6.2, 3.3.5, 3.7.6]

On dispose de peu de données sur la production de biomatériaux, les estimations du coût des produits chimiques issus de la biomasse sont rares dans la documentation validée par les milieux scientifiques et les projections pour l'avenir et les taux d'apprentissage le sont encore plus. Cette situation est liée en partie au fait que des produits intéressants d'origine biologique pénètrent le marché soit en tant que constituants partiels de produits d'origine fossile pour l'essentiel, soit en tant que nouveaux polymères entièrement synthétiques tels que les polyactides issus de l'acide lactique obtenu par fermentation du sucre. Outre la production de biomatériaux pour remplacer les combustibles fossiles, des analyses indiquent que l'emploi en cascade de biomatériaux et l'utilisation subséquente des déchets pour produire de l'énergie peuvent assurer une atténuation plus efficace et plus importante par hectare ou par tonne de biomasse utilisée. [2.6.3.5]

2.8 Niveaux de mise en valeur potentiels

Entre 1990 et 2008, l'emploi de la bioénergie a augmenté à un rythme annuel moyen de 1,5 % pour la biomasse solide, tandis que l'utilisation de la biomasse moderne pour des vecteurs d'énergie secondaire sous la forme liquide ou gazeuse a augmenté de 12,1 et de 15,4 % respectivement. Ainsi, la part des biocarburants pour les transports routiers mondiaux a été de 2 % en 2008. La production d'éthanol et de biogazole a augmenté de 10 et de 9 % respectivement en 2009 pour

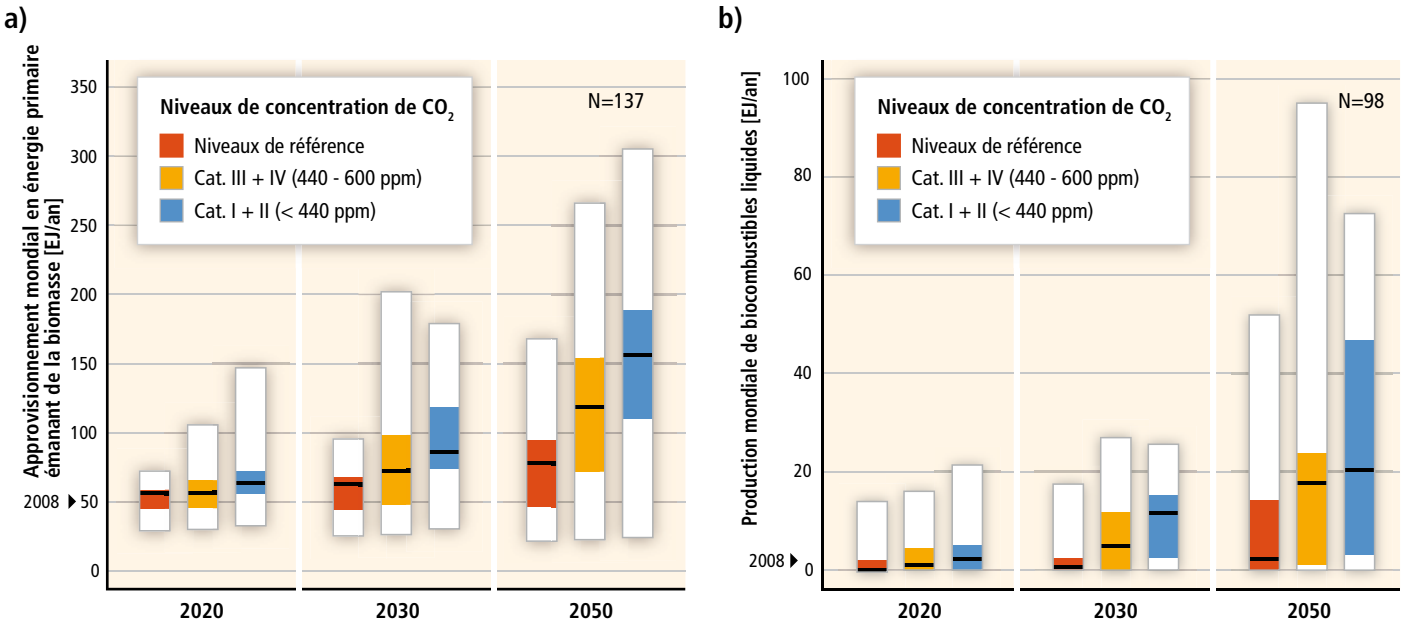


Figure TS.2.7 | a) Approvisionnement mondial en énergie primaire émanant de la biomasse selon divers scénarios à long terme concernant l'électricité, la chaleur et les biocombustibles, tous considérés comme des formes d'énergie primaire; b) production mondiale de biocombustibles selon divers scénarios à long terme, considérés comme des formes d'énergie secondaire. À titre de comparaison, les niveaux historiques de 2008 sont indiqués par les petites flèches noires situées sur l'axe de gauche. [Figure 2.23]

atteindre 90 milliards de litres, et les biocarburants ont assuré près de 3 % des transports routiers mondiaux en 2009, alors que la demande de pétrole diminuait pour la première fois depuis 1980. Les politiques gouvernementales de divers pays ont conduit à une multiplication par cinq de la production mondiale de biocombustibles entre 2000 et 2008. La production d'électricité à partir de la biomasse et de déchets renouvelables a été de 259 TWh (0,93 EJ) en 2007 et de 267 TWh (0,96 EJ) en 2009, ce qui correspond à 1 % de l'électricité mondiale et à un doublement de la production depuis 1990 (131 TWh (0,47 EJ) à cette date). [2.4]

Le niveau prévu de mise en valeur continue de la biomasse à des fins énergétiques entre 2020 et 2050 varie considérablement selon les études. D'après l'analyse des données disponibles, la mise en valeur à grande échelle de la biomasse dépend largement du développement durable de la base de ressources, de la gouvernance en matière d'utilisation des terres, du développement des infrastructures et de la réduction du coût des principales technologies, comme dans le cas de l'exploitation efficace et complète de la biomasse primaire à des fins énergétiques à partir des matières premières de première génération les plus prometteuses et de la biomasse lignocellulosique de nouvelle génération. [2.4.3, 2.8]

Les résultats des scénarios résumés à la figure TS.2.7 sont fondés sur les données fournies par un grand nombre d'équipes de modélisation et sur une vaste gamme d'hypothèses concernant en particulier la croissance de la demande d'énergie, le coût et la disponibilité des technologies concurrentes à faible intensité de carbone et le coût et la disponibilité des technologies ÉR. On prévoit dans la plupart des scénarios que le recours à la biomasse traditionnelle va se réduire tandis que l'utilisation de biocombustibles liquides, de biogaz et d'électricité et d'hydrogène produits à partir de la biomasse aura tendance à augmenter. Les résultats de ces scénarios pour la mise en valeur de la biomasse à des fins énergétiques en 2020, 2030 et 2050 sont présentés pour trois intervalles de stabilisation des GES fondés sur le quatrième Rapport d'évaluation: catégories III et IV (440-600 ppm de CO_2), catégories I et II (< 440 ppm de CO_2) et scénarios de référence (> 600 ppm de CO_2), tous à l'horizon 2100. [10.1–10.3]

On prévoit que la mise en valeur mondiale de la biomasse à des fins énergétiques devrait augmenter avec des niveaux plus ambitieux de stabilisation de la concentration de GES, ce qui indique le rôle à long terme de la biomasse dans la réduction des émissions mondiales de GES. Les niveaux médians sont de 75 à 85 EJ et de 120 à 155 EJ pour les deux scénarios d'atténuation à l'horizon 2030 et 2050 respectivement, soit près de deux et trois fois plus que le niveau de mise en valeur en 2008 (50 EJ). Ces niveaux sont semblables aux niveaux moyens de l'étude d'experts pour 2050. La production mondiale de biocombustibles indiquée à la figure TS.2.7 b) pour 2020 et 2030 est relativement faible, mais la plupart des modèles sont dépourvus d'une description détaillée des divers moyens de conversion et du potentiel d'apprentissage connexe [2.7.3]. Pour le scénario d'atténuation inférieur à 440 ppm, la production de biocombustibles est six fois (2030) et dix fois (2050) plus élevée que la valeur réelle de 2008, égale à 2 EJ. [2.2.5, 2.8.2, 2.5.8, 2.8.3]

La meilleure façon d'expliquer la pénétration de la bioénergie par secteur est de faire appel à un seul modèle offrant une représentation détaillée du secteur des transports, comme celui utilisé par l'AIE dans ses Perspectives énergétiques mondiales (WEO) pour 2010, qui modélise aussi les applications de la biomasse traditionnelle et moderne et qui tient compte des investissements et des objectifs prévus de l'industrie et des gouvernements. Ce modèle prévoit une augmentation très sensible du recours à la bioénergie moderne et une diminution de la biomasse traditionnelle. Ces projections correspondent qualitativement aux résultats présentés dans le chapitre 10. À l'horizon 2030, selon le scénario WEO d'atténuation à 450 ppm, l'AIE prévoit que, sur le plan mondial, 11 % des carburants seront des biocarburants, les biocarburants de deuxième génération représentant 60 % des 12 EJ prévus et la moitié de cette quantité devant être produite en poursuivant les politiques actuellement en vigueur. La biomasse et les déchets renouvelables fourniraient 5 % de l'électricité mondiale, soit 1 380 TWh/an (5 EJ/an), dont 555 TWh/an (2 EJ/an) résulteraient d'une stratégie rigoureuse concernant l'atténuation des effets du climat. Le chauffage industriel à partir de la biomasse pour la vapeur à usage industriel et le chauffage des espaces et de l'eau dans les bâtiments (3,3 EJ en 2008) doubleraient en valeur absolue par rapport aux niveaux de

2008. Cependant, la demande totale de chauffage devrait diminuer en raison de la réduction prévue de la biomasse traditionnelle. Le chauffage est considéré comme un secteur clé pour la poursuite de la croissance de la bioénergie moderne. D'ici 2030, les biocarburants devraient réduire de 17 % les émissions dues aux transports routiers et de 3 % les émissions dues aux transports aériens. [2.8.3]

2.8.1 Conclusions concernant la mise en valeur: messages importants relatifs à la bioénergie

Les scénarios à long terme étudiés dans le chapitre 10 font état d'une augmentation de l'approvisionnement en bioénergie avec des niveaux de plus en plus ambitieux de stabilisation de la concentration de GES, ce qui indique que la bioénergie pourrait jouer un rôle majeur à long terme dans la réduction des émissions mondiales de GES. [2.8.3]

La bioénergie, qui est actuellement la source la plus importante d'ÉR, devrait rester l'une des principales sources d'ÉR pendant la première moitié de notre siècle. Son potentiel de croissance est considérable, mais va exiger un développement actif. [2.8.3]

- Des évaluations présentées dans la documentation récente montrent que le potentiel technique de la biomasse à des fins énergétiques pourrait atteindre 500 EJ/an d'ici 2050. Il existe toutefois de grandes incertitudes à propos de facteurs importants qui influent sur ce potentiel, tels que la situation du marché et celle des politiques mises en œuvre. [2.8.3]
- L'étude d'experts évoquée au chapitre 2 indique que le niveau de mise en valeur à l'horizon 2050 pourrait être de l'ordre de 100 à 300 EJ/an. La réalisation de ce potentiel représente un défi majeur, mais apporterait une contribution importante à la demande mondiale d'énergie primaire en 2050, à peu près égale à la teneur en équivalent chaleur de l'extraction mondiale actuelle de biomasse dans les secteurs de l'agriculture et de la foresterie. [2.8.3]
- La bioénergie offre un potentiel important de réduction des GES si les ressources sont développées de façon durable et que des technologies efficaces soient mises en œuvre. Certains systèmes actuels et des options cruciales pour l'avenir – y compris les cultures pérennes, les produits forestiers et les résidus et déchets de la biomasse ainsi que des technologies perfectionnées de conversion – peuvent contribuer à réduire très nettement les émissions de GES, de 80 à 90 % par rapport à la base de référence concernant les énergies fossiles. Toutefois, la reconversion des terres et la gestion des forêts, qui conduisent à de vastes pertes des stocks de carbone et à des changements indirects d'affectation des terres, peuvent restreindre – et dans certains cas faire plus que neutraliser – les incidences positives nettes de la réduction des émissions de GES. [2.8.3]
- Afin d'obtenir des niveaux potentiels élevés de mise en valeur de la biomasse à des fins énergétiques, il importe d'assurer une augmentation modérée de la demande concurrentielle de denrées alimentaires et de fibres, de gérer convenablement les terres et de faire en sorte que les rendements agricoles et forestiers augmentent fortement. Le développement de la bioénergie en l'absence d'un contrôle et d'une bonne gouvernance de l'utilisation des terres implique le risque de conflits importants en matière d'approvisionnement alimentaire, de ressources en eau et de biodiversité ainsi que le risque d'avantages limités pour ce qui est des GES. Inversement, une mise en œuvre selon des cadres de durabilité efficaces pourrait atténuer de tels conflits et

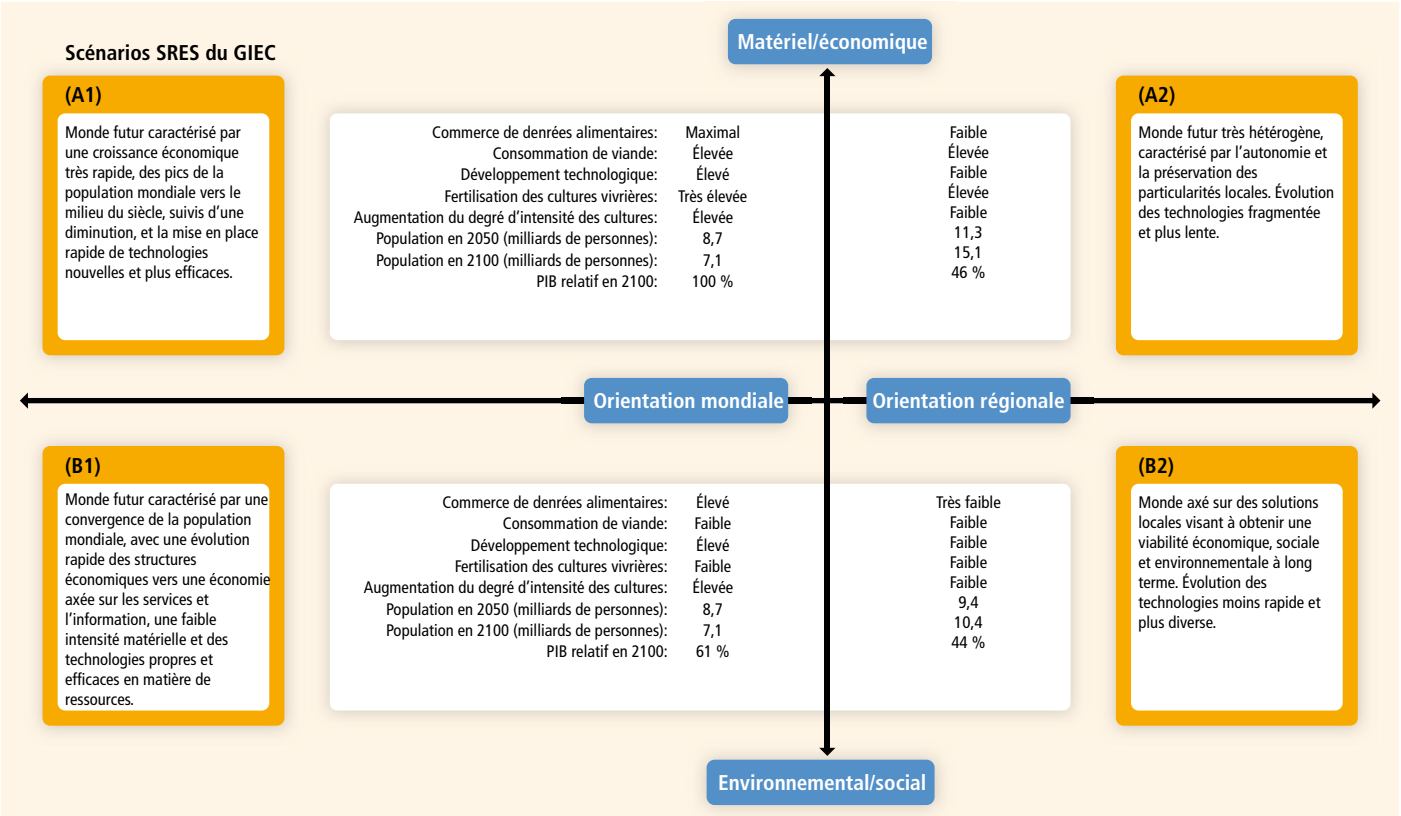


Figure TS.2.8 | Canevas selon les principales variables des scénarios SRES utilisées pour modéliser la biomasse et la bioénergie, servant de base aux esquisses pour 2050 adaptées au présent rapport et employées pour obtenir le graphique cumulé illustrant le potentiel technique de la biomasse à la figure TS.2.2. [Figure 2.26]

permettre d'obtenir des résultats positifs, par exemple en matière de développement rural, d'amélioration des terres et d'atténuation des effets du changement climatique, en donnant en outre la possibilité d'associer diverses mesures d'adaptation. [2.8.3]

- Les incidences et les résultats de la production et de l'utilisation de la biomasse dépendent des régions et des sites considérés. Ainsi, dans le cadre d'une bonne gouvernance de l'utilisation des terres et du développement rural, il faut tenir compte, dans les politiques relatives à la bioénergie, des conditions et des priorités régionales ainsi que des secteurs agricole (agriculture et élevage) et forestier. Si les ressources potentielles de la biomasse dépendent des incidences du changement climatique et sont en interaction avec elles, les incidences précises sont encore mal connues, et il y aura d'importantes différences régionales à cet égard. La bioénergie et les nouveaux systèmes de culture (pérennes) offrent également la possibilité d'associer des mesures d'adaptation (protection des sols, rétention d'eau et modernisation de l'agriculture) et la production de ressources de biomasse. [2.8.3]
- Plusieurs options importantes concernant la bioénergie (production d'éthanol à partir de canne à sucre au Brésil, systèmes de transformation de certains déchets en énergie, cuisinières efficaces faisant appel à la biomasse, production combinée de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse) sont actuellement compétitives et peuvent donner lieu à d'importantes synergies avec des options à plus long terme. Les biocarburants lignocellulosiques en remplacement de l'essence, du gazole et des carburéacteurs, des options avancées en matière de bioélectricité et des concepts de bioraffinage peuvent assurer une mise en valeur compétitive de la bioénergie à l'horizon 2020 à 2030. En combinant conversion de la biomasse et captage et



Figure TS.2.9 | Évolutions futures possibles de la mise en valeur de la biomasse à des fins énergétiques à l'horizon 2050: quatre esquisses illustratives contrastées indiquent les conditions préalables essentielles et les principales incidences dans des conditions mondiales correspondant à celles définies dans les canevas SRES du GIEC résumés à la figure TS.2.8. [Figure 2.27]

stockage du carbone, on accroît la possibilité d'éliminer des GES de l'atmosphère à long terme, ce qui est nécessaire pour obtenir des réductions marquées des émissions de ces gaz. Les biomatériaux avancés sont prometteurs pour l'économie de la production de bioénergie et pour l'atténuation, bien que leur potentiel soit moins bien compris que celui de la biomasse aquatique (algues), qui est très incertain. [2.8.3]

- Un cadre d'action en évolution rapide, des activités récentes fondées sur le marché, le soutien croissant accordé aux bioraffineries de pointe et aux possibilités offertes par les biocombustibles lignocellulosiques, et en particulier l'élaboration de critères et de cadres de durabilité, ont tous le potentiel de donner une dimension durable aux systèmes bioénergétiques et à leur mise en valeur. Pour atteindre cet objectif, il faudra procéder à des investissements soutenus qui réduiront le coût des principales technologies, disposer d'une infrastructure améliorée en matière de production et de fourniture de biomasse et établir des stratégies de mise en œuvre acceptables pour le public et les instances politiques. [2.8.3]

En conclusion et pour illustrer les relations entre les variables des scénarios (voir la figure TS.2.8), les conditions préalables essentielles dans lesquelles la capacité de production de bioénergie se développe et ce que peuvent être les incidences résultantes, la figure TS.2.8 présente quatre esquisses distinctes concernant la mise en valeur de la biomasse à des fins énergétiques sur le plan mondial à l'horizon 2050. La fourchette de 100 à 300 EJ établie à la suite de l'étude du potentiel des ressources indique les limites inférieure et supérieure de la mise en valeur. Les canevas présentés suivent en gros les définitions du Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES), appliquées à la bioénergie et résumées à la figure TS.2.9, qui ont également servi à calculer le potentiel technique présenté sur le graphique cumulé de la figure TS.2.2. [2.8.3]

La biomasse et ses multiples produits énergétiques peuvent être développés parallèlement à des produits alimentaires, à du fourrage, à des fibres et à des produits forestiers, de façon durable ou non durable. Comme l'indiquent les canevas des scénarios du GIEC et les esquisses, on peut obtenir des taux de pénétration faibles ou élevés en tenant compte ou sans tenir compte des voies de développement durable et d'atténuation des effets du changement climatique. Ces canevas permettent de se faire une idée plus claire des progrès des technologies de la bioénergie et des systèmes intégrés connexes. [2.8.3]

3. Énergie solaire directe

3.1 Introduction

Les technologies concernant l'énergie solaire directe constituent une famille de technologies qui diffèrent selon l'utilisation qui est faite de cette forme d'énergie (chauffage, électricité ou production de combustibles, par exemple). Le présent résumé porte sur quatre principaux types de technologie: 1) le solaire thermique, qui englobe à la fois le chauffage actif et le chauffage passif des bâtiments, la production d'eau chaude solaire à des fins domestiques et commerciales, le chauffage des piscines et la production de chaleur à usage industriel; 2) la production d'électricité photovoltaïque (PV) par conversion directe de la lumière solaire en électricité à l'aide de piles photovoltaïques; 3) la production d'électricité par concentration de l'énergie solaire (CES) ou solaire thermodynamique, qui fait appel à la concentration optique de l'énergie solaire pour amener des fluides ou des matériaux à haute température afin d'alimenter des moteurs thermiques et des générateurs électriques; et 4) les méthodes de production de combustibles solaires, qui utilisent l'énergie solaire pour produire des combustibles utiles. [3.1]

L'expression «énergie solaire directe» fait référence aux technologies ÉR qui tirent directement leur énergie du soleil. Certaines technologies renouvelables, telles que celles fondées sur l'énergie éolienne et l'énergie thermique des océans, utilisent l'énergie solaire après qu'elle a été absorbée sur la Terre et convertie en d'autres formes d'énergie. (Dans le reste de ce chapitre, l'adjectif «direct» appliqué à l'énergie solaire sera souvent omis et considéré comme implicite.) [3.1]

3.2 Potentiel de la ressource

L'énergie solaire est le rayonnement thermique émis par la couche la plus externe du Soleil. À la limite de l'atmosphère terrestre, ce rayonnement, appelé éclairement énergétique du soleil, est en moyenne de 1 367 W/m^2 pour une surface perpendiculaire aux rayons du soleil. Au niveau du sol (généralement défini comme correspondant au niveau de la mer avec le soleil directement en surplomb), cet éclairement énergétique du soleil est atténué par l'atmosphère et n'atteint une valeur que de 1 000 W/m^2 environ par ciel clair durant les quelques heures autour de midi (on parle alors de «plein soleil» ou d'ensoleillement maximal). Hors de l'atmosphère, l'énergie du Soleil est transportée par des ondes électromagnétiques d'une longueur d'ondes comprise entre 0,25 et 3 µm environ. Une partie de l'éclairement énergétique du soleil correspond à des rayons qui arrivent directement du soleil sans subir de diffusion dans l'atmosphère. Cet éclairement énergétique «direct», qui peut être concentré par des miroirs et des lentilles, est généralement disponible dans les zones à faible nébulosité. L'éclairement énergétique restant est appelé éclairement diffus. La somme de l'éclairement énergétique direct et de l'éclairement énergétique diffus constitue ce que l'on appelle l'éclairement énergétique solaire global. [3.2]

Le potentiel théorique de l'énergie solaire, qui représente la quantité d'éclairement énergétique du soleil à la surface de la Terre (terres émergées et océans) théoriquement disponible à des fins de production d'énergie, a été estimé à 3,9 x 10^6 EJ/an. Ce chiffre, utilisé de toute évidence à titre indicatif, nécessiterait la pleine utilisation de l'ensemble des terres émergées et des mers disponibles avec un taux de conversion de 100 %. Le potentiel technique est une mesure plus utile; il repose sur l'évaluation de la proportion des terres émergées susceptible d'être utilisée en pratique par des dispositifs de conversion se fondant sur un taux de conversion plus réaliste. Les estimations du potentiel technique de l'énergie solaire vont de 1 575 à 49 837 EJ/an, soit à peu près 3 à 100 fois la consommation mondiale d'énergie primaire en 2008. [3.2, 3.2.2]

3.3 Technologies et applications

La figure RT.3.1 illustre les différentes sortes de technologies d'énergie solaire passives et actives actuellement utilisées pour capter l'énergie du Soleil et fournir à la fois des services énergétiques à vocation résidentielle et, directement, de l'électricité. Dans le présent résumé, seules les technologies de production active de chauffage et d'électricité sont traitées en profondeur. [3.3.1–3.3.4]

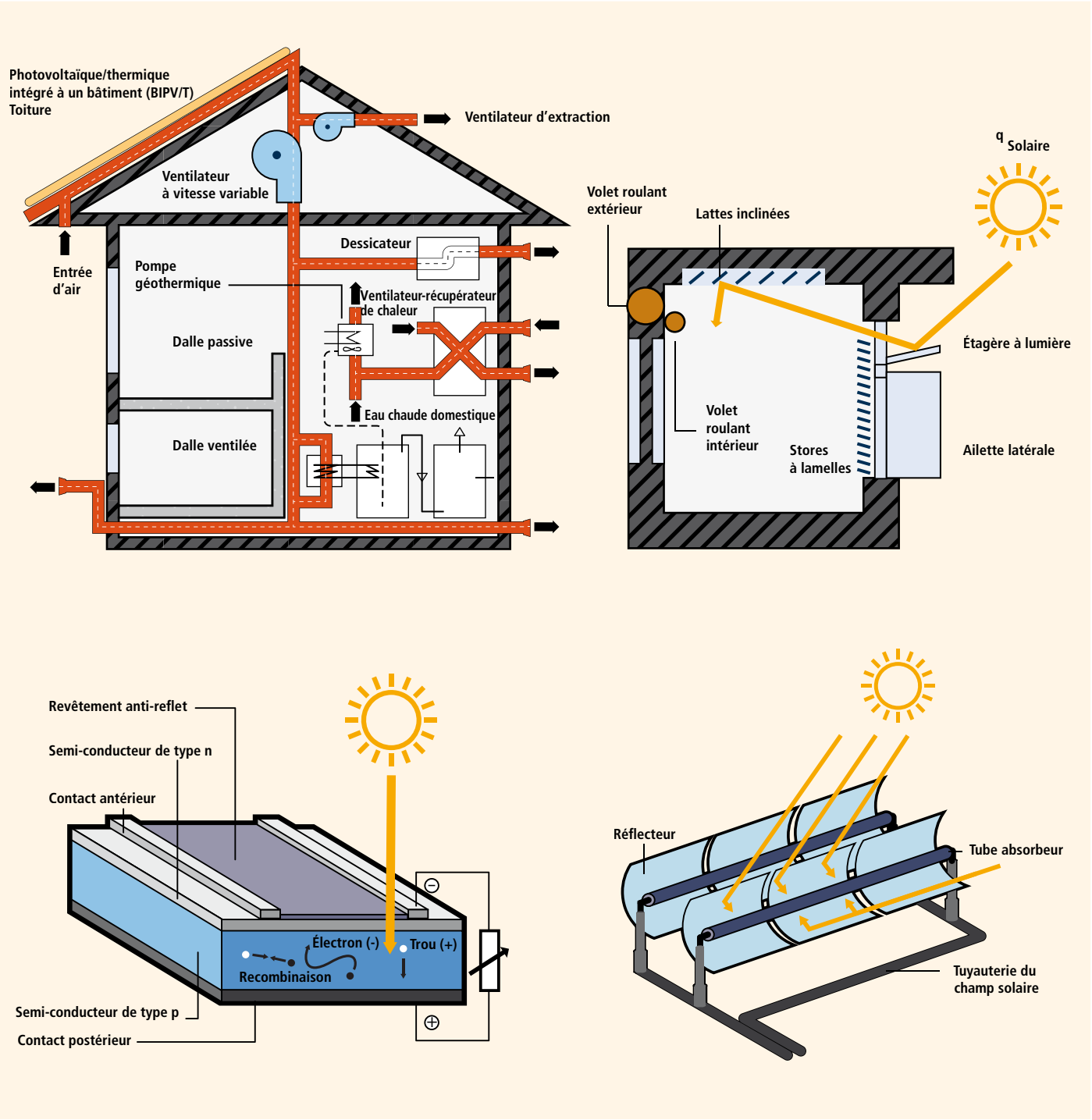


Figure TS.3.1 | Exemples d'énergie solaire thermique, passive et active, intégrée dans un bâtiment (en haut); schéma d'un dispositif photovoltaïque de conversion directe de l'énergie solaire en électricité (en bas à gauche); capteur cylindro-parabolique (en bas à droite), qui est l'un des types courants de capteurs solaires à concentration. [Tiré des figures 3.2, 3.5, 3.7]

Solaire thermique: La principale composante d'un système solaire thermique actif est le capteur solaire. Un capteur plat se compose d'un panneau noirci muni de tubes par lesquels passe un fluide à réchauffer. Les capteurs plats peuvent être classés comme suit: capteurs non vitrés, adaptés à la production de chaleur à des températures supérieures de quelques degrés à la température ambiante; capteurs vitrés, dans lesquels une feuille de verre ou d'un autre matériau transparent est placée parallèlement au panneau à quelques centimètres au-dessus de celui-ci, ce qui leur permet de produire de la chaleur à des températures d'environ 30 à 60 °C; capteurs sous vide, qui sont similaires aux capteurs vitrés mais où l'espace entre le capteur et la feuille de verre est dépourvu d'air, ce qui leur permet de fournir de la chaleur à des températures d'environ 50 à 120 °C. Pour supporter le vide, les panneaux d'un capteur sous vide sont habituellement placés à l'intérieur de tubes de verre qui constituent à la fois le vitrage du capteur et son conteneur. Dans les capteurs sous vide, un revêtement noir spécial appelé «surface sélective» est placé sur le panneau pour empêcher que la chaleur absorbée soit réémise. Ces revêtements sont également souvent utilisés sur

les capteurs vitrés non anéroïdes. Les capteurs solaires utilisés dans la gamme de température appropriée ont généralement des rendements d'environ 40 à 70 % en ensoleillement maximal. [3.3.2.1]

Les capteurs plats sont couramment utilisés pour chauffer l'eau à usage domestique et commercial, mais peuvent également être utilisés dans des systèmes de chauffage solaire actif pour chauffer des bâtiments. La réfrigération solaire peut être obtenue en se servant de capteurs solaires pour fournir de la chaleur afin d'alimenter un cycle de réfrigération par absorption. Les autres applications du solaire thermique sont la chaleur à usage industriel, les applications agricoles telles que le séchage des cultures ainsi que la cuisson des aliments. Les dispositifs le plus souvent utilisés pour stocker la chaleur en période diurne ou nocturne ou pendant de brefs épisodes nuageux sont les réservoirs d'eau. Complétés par d'autres sources d'énergie, ces systèmes permettent généralement de satisfaire 40 à 80 % de la demande en énergie thermique de l'application visée. [3.3.2.2–3.3.2.4]

Dans le cas du chauffage solaire passif, c'est le bâtiment lui-même, et notamment ses fenêtres, qui font office de capteur solaire, et la chaleur est distribuée et stockée par des méthodes naturelles. Les éléments de base de l'architecture d'un système de chauffage passif sont des fenêtres à haut rendement thermique orientées vers l'équateur et une importante masse thermique intérieure. Le bâtiment doit également être bien isolé et disposer de systèmes tels que des dispositifs d'ombrage pour empêcher une surchauffe. L'une des autres caractéristiques du solaire passif est «l'éclairage naturel», qui fait appel à des stratégies particulières pour optimiser l'utilisation de la lumière naturelle (solaire) dans les bâtiments. Des études ont montré que la technologie actuelle, pour peu que ces stratégies soient appliquées dans des constructions neuves en Europe du Nord ou en Amérique du Nord, permettrait de diminuer de 40 % (dans les cas les plus favorables) les besoins en chauffage des bâtiments. Pour les bâtiments existants équipés a posteriori de systèmes de chauffage passif, il est possible d'obtenir des réductions allant jusqu'à 20 %. [3.3.1]

Production d'électricité photovoltaïque: De nombreux manuels décrivent en détail le mode de fonctionnement de la conversion photovoltaïque. En termes très simples, une fine feuille d'un matériau semi-conducteur tel que du silicium est placée au soleil. Cette feuille, connue sous le nom de cellule (ou photopile), se compose de deux couches distinctes constituées en introduisant des impuretés dans le silicium pour obtenir une couche de type n et une couche de type p qui sont jointives au niveau de leur interface. Les photons solaires qui frappent la cellule génèrent des paires électron-trou séparées dans l'espace par un champ électrique interne au niveau de la jonction. Ceci crée des charges négatives d'un côté de l'interface et des charges positives de l'autre côté. La différence de potentiel qui en résulte crée une tension électrique. Lorsque les deux côtés de la cellule éclairée par le soleil sont reliés à une résistance de charge, le courant passe d'un côté à l'autre de la cellule par l'intermédiaire de la résistance, produisant de l'électricité. [3.3.3]
Plusieurs technologies photovoltaïques ont été mises au point en parallèle. Les technologies disponibles dans le commerce comprennent le photovoltaïque basé sur des tranches (wafers) de silicium cristallin ainsi que les technologies en couche mince utilisant du disulfure ou du (di)séléniure de cuivre, indium et gallium (CIGS), du tellurure de cadmium (CdTe) ou du silicium en couche mince (silicium amorphe et microcristallin) et les cellules solaires à colorant. Il existe en outre sur le marché des systèmes photovoltaïques à concentration, dans lesquels des cellules à très haut rendement (constituées de matériaux tels que l'arséniure de gallium (GaAs)) sont placées au foyer de miroirs à concentration ou d'autres capteurs tels que des lentilles de Fresnel. Le marché du photovoltaïque est dominé par les technologies photovoltaïques à tranche de silicium monocristallin et multicristallin (parfois appelé «polycristallin») (y compris les technologies en rubans), avec une part de marché d'environ 80 % en 2009. Les rendements optimaux obtenus par les différents types de cellules atteignent plus de 40 % pour les cellules à concentration en GaAs, environ 25 % pour le silicium monocristallin, 20 % pour le silicium multicristallin et le CIGS, 17 % pour le CdTe et environ 10 % pour le silicium amorphe. Le plus souvent, des groupes de cellules sont montées en parallèle sous une feuille transparente (généralement en verre) et connectées en série pour constituer un «module» d'une dimension pouvant atteindre 1 m par 1 m. Lorsque l'on étudie les rendements, il importe d'établir une distinction entre le rendement des cellules (mentionné ci-dessus) et le rendement des modules, ce dernier atteignant généralement 50 à 80 % de la valeur du précédent. Les fabricants continuent d'améliorer les performances et de réduire les coûts grâce à l'automatisation, à un traitement plus rapide des cellules et à des procédés de fabrication à bas coût et à haute productivité. De manière générale, les fabricants garantissent la performance des modules pour 20 à 30 ans. [3.3.3.1, 3.3.3.2]

Pour tirer une puissance utile du photovoltaïque, il ne faut pas seulement des cellules et des modules; par exemple, le système photovoltaïque comprend souvent un inverseur qui convertit le courant continu produit par les cellules en courant alternatif, afin de le rendre compatible avec les réseaux et dispositifs d'usage courant. Pour les applications hors réseau, le système peut inclure des dispositifs de stockage tels que des batteries. Des travaux sont menés pour rendre ces dispositifs plus fiables, en réduire le coût et allonger leur durée de vie afin qu'elle soit comparable à celle des modules. [3.3.3.4]

Les systèmes électriques photovoltaïques sont classés en deux grandes catégories, selon qu'ils sont autonomes ou raccordés au réseau. Les systèmes raccordés au réseau sont eux-mêmes classés en deux types: répartis et centralisés. Les systèmes répartis (ou décentralisés) sont composés d'un grand nombre de petites centrales locales, dont certaines fournissent de l'électricité essentiellement à un client sur site, le restant étant mis sur le réseau. Les systèmes centralisés, pour leur part, fonctionnent comme une grande centrale électrique. Les systèmes hors réseau (autonomes) alimentent généralement un seul client ou un petit groupe de clients et nécessitent habituellement un dispositif de stockage électrique ou une alimentation de secours. Ces systèmes présentent un gros potentiel dans les zones non électrifiées. [3.3.3.5]

Production d'électricité par concentration d'énergie solaire (CES) ou solaire thermodynamique: Les technologies solaires thermodynamiques produisent de l'électricité en concentrant les rayons du Soleil afin de chauffer un vecteur ensuite utilisé (directement ou indirectement) dans un moteur thermique (tel qu'une turbine à vapeur), qui va à son tour alimenter un générateur électrique. Cette technologie n'utilise que la fraction directe de l'éclairement énergétique solaire, de sorte que son potentiel maximum à tendance à être géographiquement restreint. Le concentrateur dirige les rayons du soleil vers un point (foyer ponctuel) dans le cas d'un système à récepteur central ou à miroir parabolique et vers une ligne (foyer linéaire) dans le cas d'un capteur cylindro-parabolique ou d'un système de Fresnel linéaire. (Ces mêmes systèmes peuvent aussi être utilisés pour alimenter en énergie des procédés thermochimiques de production de combustibles, décrits ci-après). Dans le cas des concentrateurs cylindro-paraboliques, de longues rangées de réflecteurs paraboliques qui suivent le mouvement du Soleil concentrent le rayonnement solaire de l'ordre de 70 à 100 fois sur un élément thermocollecteur monté le long de la ligne

focale du réflecteur. Cet élément thermocollecteur se compose d'un tube intérieur noirci (à surface sélective) et d'un tube extérieur en verre, avec un espace sous vide entre les deux. Dans les configurations actuellement commercialisées, une huile caloporteuse circule dans le tube d'acier où elle est chauffée (à près de 400 °C). Des systèmes utilisant d'autres matériaux caloporteurs circulants tels que des sels fondus ou de la vapeur directe sont en cours d'expérimentation. [3.3.4]

Le deuxième type de système à foyer linéaire, à savoir le système de Fresnel linéaire, utilise de longues bandes de miroirs parallèles comme concentrateur, là encore avec un récepteur linéaire fixe. L'un des deux systèmes à foyer ponctuel, à savoir le système à récepteur central (également appelé «centrale à tour»), utilise un grand nombre de miroirs (héliostats) au sol dont chacun suit la course du soleil selon deux axes, afin de concentrer les rayons du soleil en un point au sommet d'une haute tour. Le point focal est dirigé vers un récepteur qui comprend une cavité inversée fixe et/ou des tubes dans lesquels circule un fluide caloporteur. Celui-ci peut atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1 000 °C) que dans le cas des systèmes à foyer linéaire, ce qui permet au moteur thermique de convertir plus de chaleur collectée en électricité (au moins en théorie). Dans le second type de système à foyer ponctuel, la concentration est effectuée par le concentrateur parabolique, lequel consiste en un seul réflecteur parabolique (et non un ensemble de réflecteurs) qui s'oriente par rapport au soleil selon deux axes. Le miroir parabolique concentre les rayons du soleil sur un récepteur qui n'est pas fixe, mais qui se déplace avec la parabole à environ un diamètre de distance de celle-ci. Les températures sur le moteur du récepteur peuvent atteindre 900 °C. Dans l'une des applications courantes de ce concept, un moteur Stirling est monté au foyer pour alimenter un générateur électrique. Ces systèmes à moteur Stirling sont relativement petits et produisent généralement de 10 à 25 kW, mais peuvent être regroupés sur le terrain en une configuration permettant d'obtenir une production électrique équivalente à celle d'une centrale. [3.3.4]

Chacun de ces quatre types de centrales solaires thermodynamiques présente des avantages et des inconvénients. [3.3.4] Tous les quatre ont été construits et éprouvés. L'un des avantages majeurs de ces technologies (excepté dans le cas des paraboles) est leur capacité de stocker l'énergie thermique une fois celle-ci collectée au niveau du récepteur et avant sa transmission au moteur thermique. Les vecteurs de stockage utilisés sont notamment du sel fondu, des accumulateurs à air ou à vapeur sous pression (uniquement pour un stockage de courte durée), des particules de céramique solide, des matériaux à changement de phase à haute température, du graphite et du béton haute température. Certaines des centrales solaires thermodynamiques commerciales construites ont des capacités de stockage thermique pouvant atteindre 15 heures, ce qui permet au solaire thermodynamique d'offrir une puissance répartissable. [3.3.4]

Production de combustibles solaires: Les technologies permettant de produire des combustibles solaires convertissent l'énergie solaire en combustibles chimiques tels que l'hydrogène, le gaz de synthèse et des liquides comme le méthanol ou le gazole. Les trois techniques de base permettant d'obtenir des combustibles solaires, utilisables ensemble ou séparément, font appel à des procédés: 1) électrochimiques; 2) photochimiques ou photobiologiques; et 3) thermochimiques. Dans le premier cas, un processus d'électrolyse alimenté par un courant électrique d'origine solaire généré par un système photovoltaïque ou thermodynamique permet de produire de l'hydrogène. L'électrolyse de l'eau est une technologie ancienne et bien connue qui offre un taux de conversion type de l'électricité en hydrogène de 70 %. Dans le deuxième procédé, des photons solaires sont utilisés pour déclencher des réactions photochimiques ou photobiologiques dont les produits sont des combustibles: en fait, ils reproduisent ce que font les plantes et les organismes. Autre possibilité, un matériau semi-conducteur peut être utilisé comme anode d'absorption de la lumière solaire dans des cellules photo-électrochimiques qui produisent également de l'hydrogène par décomposition de l'eau. Le troisième procédé fait appel aux températures élevées que permet d'obtenir l'énergie solaire (comme les températures atteintes dans le récepteur d'une centrale solaire thermodynamique à récepteur central) pour générer une réaction chimique endothermique qui produit du combustible. Dans ce cas, les réactifs peuvent être notamment des combinaisons d'eau, de CO_2, de charbon, de biomasse et de gaz naturel. Les produits constituant les combustibles solaires peuvent être l'un quelconque (ou une combinaison) des produits suivants: hydrogène, syngaz (gaz de synthèse), méthanol, oxyde de diméthyle et huile de synthèse. Lorsque le réactif utilisé est un combustible fossile, les valeurs calorifiques d'ensemble des produits dépassent celles des réactifs, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de brûler autant de combustible fossile pour un même dégagement d'énergie. Le combustible solaire peut également être synthétisé à partir d'hydrogène et de CO_2 solaires pour produire des hydrocarbures compatibles avec les infrastructures énergétiques existantes. [3.3.5]

3.4 Situation du marché mondial et régional et utilisation industrielle

3.4.1 Capacité installée et énergie produite

Solaire thermique: Les technologies solaires actives de chauffage et réfrigération utilisées dans les bâtiments résidentiels et commerciaux constituent un marché arrivé à maturité. Ce marché, qui varie selon les pays, a augmenté de 34,9 % entre 2007 et 2009 et continue à croître d'environ 16 % par an. Fin 2009, selon les estimations, la capacité mondiale installée de puissance thermique produite à partir de ces dispositifs était de 180 GW_{th}. Le marché mondial des ventes de systèmes solaires thermiques actifs a atteint, d'après les estimations, 29,1 GW_{th} en 2008 et 31 GW_{th} en 2009. Ce marché se compose en majorité de capteurs vitrés, la Chine représentant 79 % des installations de capteurs vitrés en 2008 et l'Union européenne, environ 14,5 %. Aux États-Unis d'Amérique et au Canada, la principale application reste le chauffage des piscines, avec une capacité installée de 12,9 GW_{th} de capteurs en plastique non vitrés. Fait notable, la Chine a pris en 2008 la première place mondiale en termes de capacité installée de capteurs plats et à tubes sous vide, avec 88,7 GW_{th}, contre 20,9 GW_{th} pour l'Europe et 4,4 GW_{th} pour le Japon. En Europe, la taille du marché a plus que triplé entre 2002 et 2008. Malgré cette progression, le solaire thermique ne représente

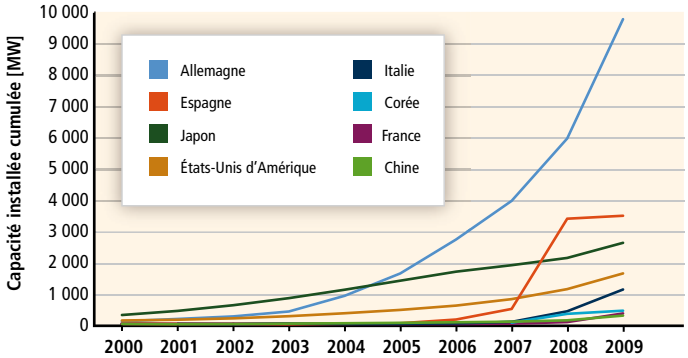


Figure TS.3.2 | Capacité photovoltaïque installée pour la période 2000-2009 sur huit marchés. [Figure 3.9]

encore qu'une part relativement faible de la demande d'eau chaude en Europe. En Allemagne par exemple, pays qui représente le plus gros marché, environ 5 % des maisons individuelles ou à deux logements utilisent l'énergie solaire thermique. L'une des mesures utilisées pour calculer la pénétration du marché est l'utilisation annuelle d'énergie solaire par habitant. À cet égard, le premier pays est Chypre avec 527 kW_{th} pour 1 000 habitants. Il convient de noter que l'on ne dispose pas d'informations sur le solaire passif, que ce soit à propos de la situation du marché ou de la mise en valeur de cette forme d'ÉR dans l'industrie. De ce fait, les chiffres qui précèdent concernent uniquement le solaire actif. [3.4.1]

Production d'électricité photovoltaïque: En 2009, quelque 7,5 GW de systèmes photovoltaïques ont été installés, ce qui a porté cette même année la capacité mondiale installée cumulée pour cette forme d'énergie à environ 22 GW– soit une capacité permettant de produire jusqu'à 26 TWh (93 600 TJ) par an. Plus de 90 % de cette capacité concernent trois marchés principaux: l'Union européenne avec 73 % du total, le Japon, avec 12 %, et les États-Unis d'Amérique, avec 8 %. Environ 95 % de la capacité photovoltaïque installée dans les pays de l'OCDE est reliée au réseau, le restant étant hors réseau. La figure RT.3.2 illustre la croissance des huit principaux marchés du photovoltaïque en 2009. L'Espagne et l'Allemagne sont, de loin, les pays où le plus d'installations solaires photovoltaïques ont été mises en place ces dernières années. [3.4.1]

Solaire thermodynamique: Le solaire thermodynamique a atteint une capacité installée cumulée d'environ 0,7 GW, et 1,5 GW supplémentaires sont en construction. Les coefficients d'utilisation de plusieurs de ces centrales thermodynamiques devraient se situer entre 25 et 75 %; ils peuvent être plus élevés que pour le photovoltaïque, car les centrales thermodynamiques permettent de rajouter du stockage thermique lorsqu'il existe un besoin proportionné de surdimensionner le champ de capteurs pour assurer ce stockage. L'extrémité inférieure de la fourchette des coefficients d'utilisation correspond à l'absence de stockage thermique et son extrémité supérieure à un stockage thermique pouvant atteindre 15 heures. [3.8.4]

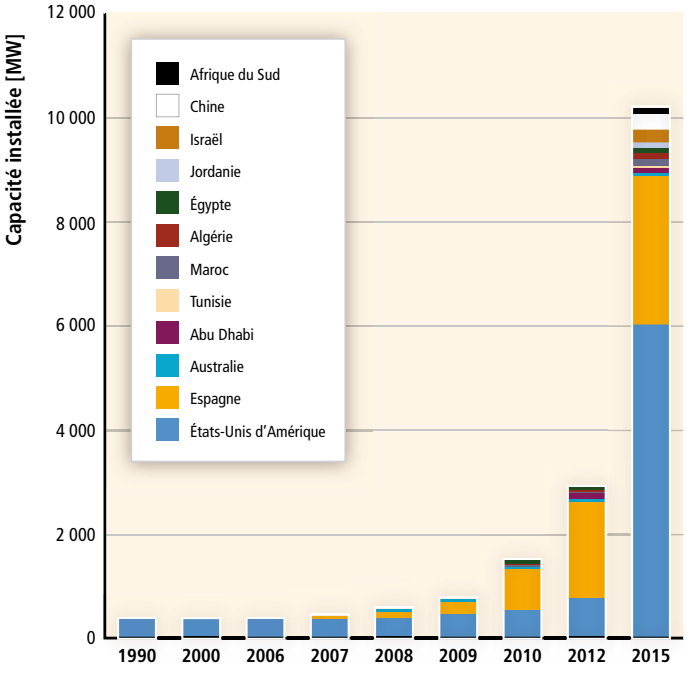


Figure TS.3.3 | Centrales thermodynamiques installées et prévues, par pays. [Figure 3.10]

Les premières centrales thermodynamiques commerciales ont été les SEGS (Solar Electric Generating Systems) de Californie, capables de produire une puissance de 354 MW. Ces centrales, installées entre 1985 et 1991, sont encore en exploitation actuellement. De 1991 jusqu'au début des années 2000, le solaire thermodynamique n'a progressé que lentement, mais depuis 2004 environ, les projets d'installation ont fortement augmenté. La technologie cylindro-parabolique représente l'essentiel du solaire thermodynamique actuellement en place, mais la technologie à récepteur central est en pleine progression, et les offres commerciales de capteurs à miroir parabolique et moteur Stirling sont en augmentation. Début 2010, la plus grande partie des projets mondiaux d'installation de capacité concernait les États-Unis d'Amérique et l'Espagne, mais d'autres pays ont récemment annoncé des plans commerciaux dans ce sens. La figure RT.3.3 illustre la capacité actuelle en solaire thermodynamique et les projets de mise en valeur jusqu'en 2015. [3.3.4, 3.4.1]

Production de combustibles solaires: À l'heure actuelle, la production de combustibles solaires en est au stade des centrales pilotes. Des centrales pilotes d'une puissance de 300 à 500 kW ont été construites pour la réduction carbothermique d'oxyde de zinc, le reformage du méthane à la vapeur (SMR) et la gazéification du coke de pétrole à la vapeur. Un réacteur de reformage à la vapeur de 250 kW est en exploitation en Australie. [3.3.4, 3.4.1]

3.4.2 Capacité de l'industrie et chaîne d'approvisionnement

Solaire thermique: En 2008, les fabricants ont produit environ 41,5 millions de m^2 de capteurs solaires, soit un volume suffisamment important pour permettre une production en série, même si la production est répartie entre un grand nombre d'entreprises dans le monde. En fait, l'essentiel de la filière a atteint des niveaux de production industrielle à grande échelle. Le procédé de fabrication consiste à utiliser et combiner plusieurs matériaux aisément accessibles – dont le cuivre, l'aluminium, l'acier inoxydable et des isolants thermiques – en faisant appel à différentes techniques d'assemblage pour produire le panneau absorbant. Cette boîte est fermée par le couvercle de verre, presque toujours composé de verre à faible teneur en fer, facilement disponible à présent. Le plus gros de la production s'effectue en Chine, à destination du marché intérieur. Les capteurs sous vide, qui se prêtent aux techniques de production en série, commencent à dominer ce marché. Les autres grands sites de production se trouvent en Europe, en Turquie, au Brésil et en Inde. Le marché export concerne surtout des systèmes complets de chauffage solaire de l'eau plutôt que des capteurs solaires pris isolément. Les plus gros exportateurs de systèmes de chauffe-eau solaires se trouvent en Australie, en Grèce, aux États-Unis d'Amérique et en France. Les exportations australiennes représentent environ 50 % de la production du pays dans ce domaine. [3.4.2]

En ce qui concerne le chauffage solaire passif, la capacité de l'industrie et la chaîne d'approvisionnement reposent en partie sur un élément humain, à savoir les ingénieurs et les architectes qui doivent collaborer systématiquement pour construire un bâtiment à chauffage passif. Par le passé, cette étroite collaboration entre les deux disciplines a souvent fait défaut, mais la diffusion de méthodes de conception systématiques mises au point dans différents pays a permis d'améliorer les capacités de conception. Les fenêtres et le vitrage représentent une partie importante des bâtiments à chauffage passif, et l'apparition d'une nouvelle génération de fenêtres à haut rendement (faible émissivité, remplissage argon) a eu d'importantes répercussions sur la contribution de l'énergie solaire aux besoins

du secteur du bâtiment en matière de chauffage. Ces fenêtres représentent désormais l'essentiel des nouvelles fenêtres installées dans la plupart des pays de l'hémisphère Nord. Il ne semble pas que la capacité de l'industrie ou les chaînes d'approvisionnement posent des problèmes susceptibles d'entraver l'adoption de ces fenêtres améliorées. L'une des autres caractéristiques de la conception passive consiste à ajouter de la masse interne à la structure du bâtiment. Le béton et les briques, qui sont les matériaux de stockage les plus couramment utilisés, sont aisément disponibles; quant aux matériaux à changement de phase (comme la paraffine), considérés comme les matériaux de stockage du futur, ils ne devraient pas poser de problèmes d'approvisionnement. [3.4.2]

Production d'électricité photovoltaïque: Entre 2003 et 2009, le taux de croissance annuel cumulé de l'industrie manufacturière photovoltaïque a dépassé les 50 %. En 2009, la production de cellules solaires a atteint environ 11,5 GW par an (en capacité de pointe) répartis entre plusieurs zones économiques, la Chine représentant environ 51 % de la production mondiale (y compris 14 % pour la province chinoise de Taïwan), l'Europe quelque 18 %, 14 % environ pour le Japon et à peu près 5 % pour les États-Unis d'Amérique. Pour l'ensemble de la planète, plus de 300 usines produisent des cellules et des modules solaires. En 2009, 80 % environ du marché mondial était constitué de cellules et modules solaires à base de silicium. Les 20 % restants concernaient essentiellement des cellules et modules à base de tellurure de cadmium, de silicium amorphe et de séléniure de cuivre, d'indium et de gallium. L'ensemble du marché devrait fortement progresser au cours des prochaines années, et la production de modules à couche mince devrait gagner des parts de marché. Les fabricants se tournent vers une conception originale des unités de fabrication et relocalisent la production d'éléments des modules plus près du marché final. Entre 2004 et début 2008, la demande de silicium cristallin (ou silicium polycristallin) a dépassé l'offre, ce qui a entraîné un relèvement des prix. Avec les nouveaux prix, une offre importante s'est dégagée, et le marché du photovoltaïque détermine désormais son propre approvisionnement en silicium polycristallin. [3.4.2]

Solaire thermodynamique: Ces dernières années, l'industrie du solaire thermodynamique a connu un renouveau, passant d'une période de stagnation à plus de 2 GW en commande ou en cours de construction. Désormais, plus de 10 entreprises différentes construisent ou projettent de construire des centrales de dimension commerciale. Cela va de jeunes entreprises à de grosses entreprises, y compris des exploitants de réseaux, dotées d'une expertise internationale en matière de gestion de la construction. Aucune des chaînes d'approvisionnement pour la construction de centrales n'est limitée par des questions de disponibilité des matières premières. Des augmentations de capacité peuvent être réalisées dans un délai d'environ 18 mois. [3.4.2]

Production de combustibles solaires: La technologie des combustibles solaires en est encore à ses débuts et ne dispose pas actuellement d'une chaîne d'approvisionnement permettant des applications commerciales. Les combustibles solaires feront appel en grande partie aux mêmes technologies de champ solaire que celles mises en place pour d'autres systèmes thermodynamiques haute température, ainsi qu'à des technologies d'aval similaires à celles de l'industrie pétrochimique. [3.4.2]

3.4.3 Incidence des politiques

Les technologies concernant l'énergie solaire directe se heurtent à une série d'obstacles susceptibles d'en empêcher la mise en valeur à grande échelle. Ces technologies ont des degrés de maturité différents, et si certaines applications sont d'ores et déjà compétitives sur des marchés locaux, elles font généralement face à un obstacle commun, à savoir la nécessité de réduire les coûts. Le solaire thermodynamique et le photovoltaïque à vocation commerciale ne sont pas confrontés aux mêmes obstacles que le photovoltaïque distribué ou les technologies de chauffage et de réfrigération solaires. Les principaux obstacles sont notamment: l'implantation, l'obtention de permis et les problèmes de financement pour l'aménagement de terrains disposant d'un ensoleillement favorable permettant de réaliser des projets à l'échelle commerciale; le manque d'accès aux lignes de transmission pour les grands projets éloignés des centres de distribution électrique; la complexité des lois réglementant l'accès, des procédures d'obtention de permis et des charges pour les projets de petite échelle; l'absence de normes d'interconnexion cohérentes et de structures tarifaires variables dans le temps qui tiennent compte de la valeur de l'électricité produite distribuée pour les services d'électricité; l'incohérence des normes et procédures de certification et de leur application; et l'absence de structures réglementaires prenant en compte les avantages des différentes technologies au plan environnemental et en matière de réduction des risques. Par le biais de politiques bien conçues, des gouvernements ont démontré qu'ils étaient en mesure de soutenir les technologies solaires en finançant la recherche-développement et en mettant en place des mesures incitatives pour surmonter les obstacles économiques. Des mécanismes d'incitation fondés sur les prix ont par exemple été popularisés après que des politiques de tarif de rachat ont favorisé la mise en valeur du photovoltaïque en Allemagne et en Espagne. Des mécanismes fondés sur des quotas, tels que les normes relatives à l'éventail des énergies renouvelables et les appels d'offre gouvernementaux sont, respectivement, chose courante aux États-Unis d'Amérique et en Chine. Outre ces cadres réglementaires, des politiques fiscales et des mécanismes financiers (crédits d'impôts, prêts à taux préférentiels, subventions, etc.) sont souvent utilisés pour soutenir la fabrication des éléments solaires et augmenter la demande des consommateurs. La plupart des politiques solaires réussies sont adaptées aux obstacles imposés par des applications spécifiques, et celles qui sont couronnées de succès sont celles qui envoient au marché des signaux clairs, cohérents et dans la durée. [3.4.3]

3.5 Intégration dans un système énergétique élargi

Les technologies solaires ont des spécificités qui permettent de les intégrer avantageusement dans un système énergétique plus vaste. Cette partie du chapitre ne résume que les caractéristiques d'intégration propres aux technologies solaires, avec notamment la demande en énergie de faible puissance, le chauffage urbain collectif et autres charges thermiques, les caractéristiques de production et les effets de lissage du photovoltaïque ainsi que les caractéristiques de production du solaire thermodynamique et la stabilisation du réseau. [3.5.1–3.5.4]

Pour les applications peu consommatrices d'énergie, telles que l'éclairage ou les chauffe-eau solaires, les technologies solaires présentent parfois un avantage comparatif par rapport aux technologies à combustible non renouvelable. En outre, les technologies solaires permettent de petites applications décentralisées ainsi que des applications centralisées de plus grande envergure. Dans certaines régions du globe, l'intégration de l'énergie solaire dans le chauffage urbain et d'autres charges thermiques s'est révélée efficace, notamment du fait que des bâtiments bien isolés peuvent être chauffés efficacement par des vecteurs d'énergie à relativement basse température. En certains endroits, un système urbain de réfrigération et de chauffage peut présenter des avantages par rapport à une

réfrigération décentralisée, notamment en matière de coût du fait des économies d'échelle, eu égard à la diversité de la demande en réfrigération des différents bâtiments, à la réduction du bruit et de la charge structurelle et aux économies d'espace pour l'équipement. Par ailleurs, il est possible d'améliorer le coefficient d'utilisation et les profils d'émissions des systèmes en combinant la biomasse et l'énergie solaire thermique à basse température. [3.5.1, 3.5.2]

En ce qui concerne la production d'énergie photovoltaïque en un lieu donné, l'électricité varie de manière systématique sur une journée ou une année, mais également de manière aléatoire en fonction des conditions météorologiques. Dans certains cas, cette variation peut avoir un impact important sur la tension et le débit de puissance dans le système de transmission et de distribution local dès le début de l'entrée sur le marché ainsi que sur l'équilibre entre l'offre et la demande dans le cadre de l'exploitation globale du système énergétique au stade de forte pénétration du marché. Cet effet est susceptible de limiter l'intégration du photovoltaïque. Néanmoins, d'après les modélisations et les simulations, il semblerait que la présence de nombreux systèmes photovoltaïques dans une vaste zone rende les variations moins aléatoires et plus lentes (on parle parfois d'«effet de lissage»). Le phénomène est actuellement à l'étude afin d'évaluer et de quantifier les effets de lissage réels à plus grande échelle (1 000 sites distants de 2 à 200 km) et à des échelles temporelles d'une minute ou moins. [3.5.3]

Dans une centrale thermodynamique, même sans stockage, la masse thermique inhérente au système collecteur et la masse rotatoire dans la turbine tendent à réduire de manière significative l'incidence des régimes solaires transitoires rapides sur la production électrique et ainsi à en diminuer l'impact sur le réseau. À l'avenir, l'inclusion de systèmes intégrés de stockage thermique devrait permettre d'atteindre les coefficients d'utilisation types d'une exploitation en charge de base. En outre, l'intégration de centrales thermodynamiques avec des générateurs à combustible fossile, notamment avec des systèmes solaires intégrés à cycle combiné alimentés au gaz (avec stockage), peut offrir un meilleur rendement du combustible et rallonger la durée d'exploitation, ce qui améliore le rapport coût-efficacité par rapport à une exploitation séparée des centrales thermodynamiques et/ou des centrales à cycle combiné. [3.5.4]

3.6 Impacts environnementaux et sociaux

3.6.1 Impacts environnementaux

Outre ses avantages en matière de réduction des gaz à effet de serre (GES), l'énergie solaire peut également permettre de réduire le rejet de polluants (particules, gaz nocifs, etc.) qui proviennent des anciennes centrales à combustible fossile remplacées. Les technologies du solaire thermique et du photovoltaïque ne génèrent aucun sous-produit solide, liquide ou gazeux lors de la production d'électricité. La famille des technologies de l'énergie solaire peut avoir d'autres types d'impacts sur l'air, l'eau, les sols et les écosystèmes, selon la façon dont leur gestion est assurée. L'industrie photovoltaïque utilise certains gaz toxiques explosifs ainsi que des liquides corrosifs sur ses chaînes de fabrication. La présence et la quantité de ces matériaux dépendent fortement du type de cellule. Toutefois, les exigences intrinsèques des techniques de production de l'industrie photovoltaïque obligent à exercer des méthodes de contrôle rigoureuses qui réduisent au minimum les émissions d'éléments potentiellement dangereux au cours de la fabrication des modules. En ce qui concerne les autres technologies solaires, les impacts attendus en matière de pollution de l'air et de l'eau sont généralement mineurs. Par ailleurs, dans certaines régions, certaines technologies solaires peuvent nécessiter l'utilisation d'eau pour nettoyer les systèmes afin d'en maintenir les performances. [3.6.1]

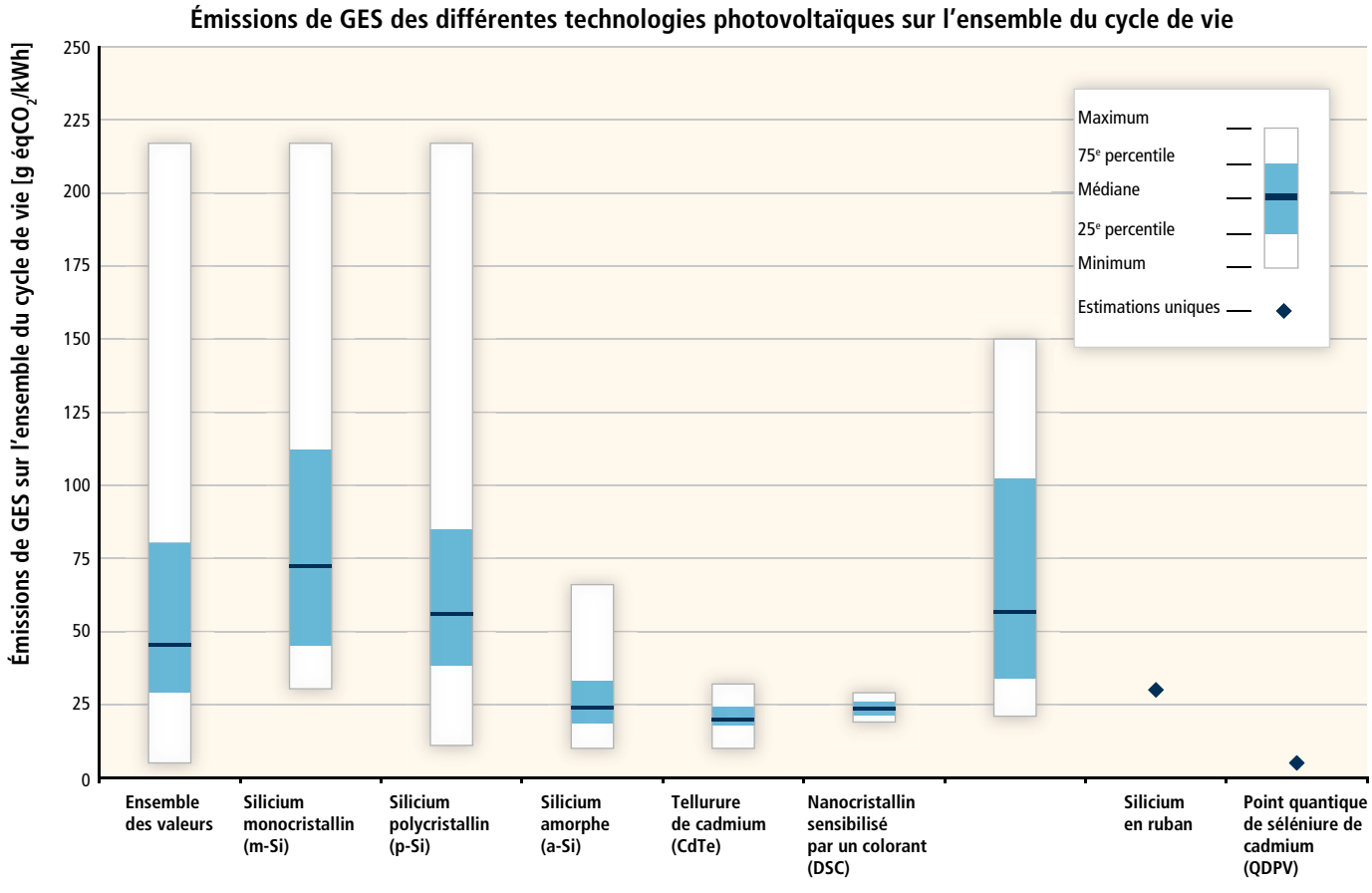
La figure RT.3.4 présente des estimations concernant l'évaluation du cycle de vie des GES associés à différents types de modules photovoltaïques et de technologies thermodynamiques. Pour les modules photovoltaïques, la majorité des estimations sont comprises entre 30 et 80 g éqCO_2/kWh. En ce qui concerne les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie liées à la production thermodynamique d'électricité, les estimations récentes les situent entre 14 et 32 g éqCO_2/kWh. Ces niveaux d'émissions sont inférieurs d'un ordre de grandeur environ à ceux des centrales électriques à gaz. [3.6.1, 9.3.4]

L'utilisation des sols est aussi une forme d'impact environnemental. Pour les systèmes solaires thermiques et photovoltaïques montés sur toitures, il n'y a pas de problème. En revanche, des problèmes peuvent se poser dans le cas du photovoltaïque (station centrale) ainsi que du solaire thermodynamique. L'obtention des permis nécessaires aux installations solaires thermodynamiques peut poser des problèmes particuliers dans le cas de terrains écologiquement fragiles. L'un des éléments qui différencie le solaire thermodynamique du photovoltaïque est la nécessité de refroidir le fluide caloporteur, refroidissement qui exige souvent l'utilisation d'une eau par ailleurs rare. L'utilisation de l'air ambiant comme réfrigérant (réfrigération à sec) constitue une option viable, mais qui peut cependant réduire le rendement de l'installation de 2 à 10%. [3.6.1]

3.6.2 Impacts sociaux

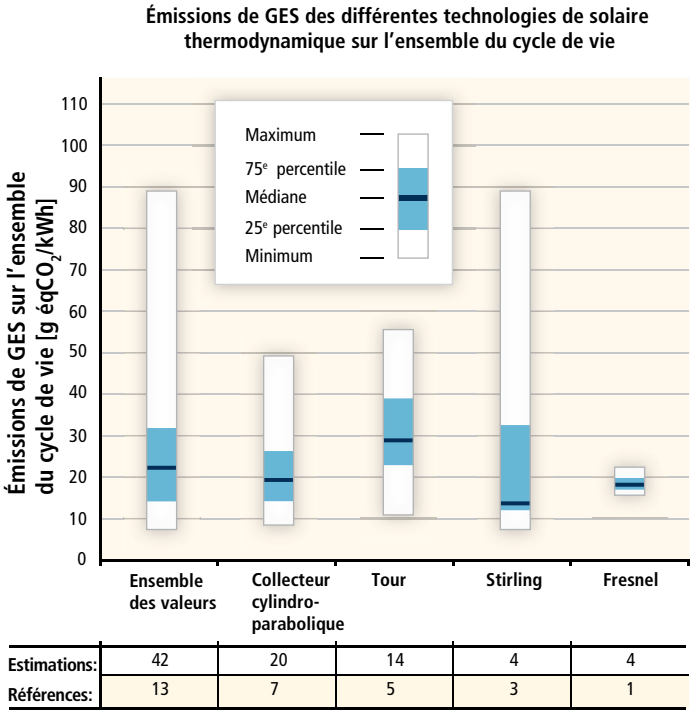
Les avantages apportés par l'énergie solaire dans les pays en développement sont autant d'arguments en faveur de sa plus grande utilisation. Près de 1,4 milliard de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'électricité. Les systèmes solaires domestiques et les réseaux communautaires locaux alimentés par le photovoltaïque sont susceptibles de fournir de l'électricité dans de nombreuses zones où le coût de rattachement au réseau principal serait prohibitif. L'incidence de l'électricité et des technologies solaires sur les populations locales se traduit par une longue liste d'avantages majeurs: remplacement des lampes à kérosène qui polluent l'intérieur des habitations et des réchauds de cuisine inefficaces; possibilité de lire plus longtemps à l'intérieur; réduction du temps passé à ramasser du bois pour la cuisine (dégageant ainsi du temps pour permettre aux femmes et aux enfants habituellement chargés de cette tâche de se consacrer à d'autres priorités); éclairage public améliorant la sécurité; avantages sanitaires liés à la conservation des vaccins et des aliments au froid; et enfin fonctionnement des moyens de communication (tels que télévisions et radios). Tous ces éléments représentent une multitude d'avantages permettant d'améliorer la vie des populations. [3.6.2]

La création d'emplois est un facteur social important associé aux technologies solaires. Les analyses montrent que, parmi ces technologies, c'est le photovoltaïque qui présente le plus fort potentiel de création d'emplois. Le photovoltaïque solaire permet de créer environ 0,87 année-emploi par GWh, suivi par le solaire thermodynamique, avec 0,23 année-emploi par GWh. S'ils sont bien mis en avant, ces arguments relatifs à l'emploi peuvent contribuer à accélérer le processus d'acceptation sociale et inciter le public à mieux tolérer les inconvénients perceptibles de l'énergie solaire, tels que l'impact visuel. [3.6.2]



Estimations:	124	30	56	12	13	4	6	2*	1
Références:	26	9	15	3	3	1	2	2	1

*même valeur



Estimations:	42	20	14	4	4
Références:	13	7	5	3	1

Figure TS.3.4 | Émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie des modules photovoltaïques (graphique du haut) et thermodynamiques (graphique du bas). Pour plus de détails sur les recherches documentaires et les sources ayant conduit aux estimations présentées, se reporter à l'annexe II. [Figures 3.14, 3.15]

3.7 Perspectives en matière d'améliorations technologiques et d'innovations

Solaire thermique: Si ces technologies sont intégrées dès le début du projet, presque tous les éléments visibles du toit et des façades des bâtiments du futur pourraient être équipés de panneaux solaires – comprenant cellules photovoltaïques, capteurs thermiques et éléments combinés photovoltaïque-thermique (hybrides). Ces bâtiments pourraient ne pas être simplement le fruit de la volonté des constructeurs ou propriétaires individuels, mais pourraient aussi résulter de politiques publiques, tout au moins dans certaines régions. À titre d'exemple, il convient de citer la vision de la Plate-forme technologique européenne de l'énergie solaire thermique, qui consiste à définir le «bâtiment solaire actif» comme norme pour les nouvelles constructions d'ici 2030, lequel bâtiment couvrirait en moyenne l'ensemble de ses besoins en énergie pour l'eau chaude, le chauffage et la climatisation. [3.7.2]

Lorsqu'on met en avant les progrès du solaire passif, il convient de faire la distinction entre deux types de climats: ceux qui sont dominés par la demande de chauffage et ceux où prédomine la demande de froid. Dans le premier cas, on peut prévoir une adoption à plus large échelle des éléments suivants: systèmes vitrés sous vide (par opposition aux systèmes scellés), isolation nocturne extérieure dynamique et systèmes de vitrage translucide qui peuvent automatiquement modifier la transmittance solaire ou la transmittance dans les longueurs d'ondes visibles et qui offrent en outre une meilleure isolation. Pour le deuxième type de climat,

on peut prévoir un plus grand usage des toits froids (toits de couleur claire réfléchissant l'énergie solaire); des techniques de dissipation thermique, par exemple en utilisant le sol et l'eau comme puits de chaleur; des méthodes permettant d'améliorer le microclimat autour des bâtiments; et des dispositifs de régulation solaire qui laissent pénétrer la composante lumineuse de l'énergie solaire, mais non sa composante thermique. Dans les deux cas, il est prévu que les matériaux de construction assurent un meilleur stockage thermique. Les méthodes utilisées pour rediffuser la chaleur du soleil absorbée autour du bâtiment et/ou vers l'air extérieur devraient également être améliorées, éventuellement par des méthodes actives telles que des ventilateurs. Enfin, l'amélioration des outils de conception devrait faciliter la mise en œuvre de ces différentes méthodes perfectionnées. [3.7.1]

Production d'électricité photovoltaïque: Bien que la technologie du photovoltaïque ait désormais atteint une relative maturité, elle continue d'enregistrer des améliorations rapides en matière de performance et de coût, et ces progrès réguliers devraient se poursuivre. Les efforts nécessaires sont fournis dans un cadre de coopération intergouvernementale, avec des feuilles de route. S'agissant des différentes technologies photovoltaïques, quatre grandes priorités techniques, nécessitant chacune une approche particulière en matière de recherche-développement, ont été recensées: 1) efficacité, stabilité et durée de vie des cellules; 2) productivité et fabrication des modules; 3) viabilité environnementale; et 4) applicabilité (soit autant de domaines qui doivent être normalisés et harmonisés). En regardant vers l'avenir, les technologies photovoltaïques peuvent être classées en trois grandes catégories: les technologies actuelles; les technologies émergentes, qui présentent un risque moyen et un calendrier à moyen terme (10 à 20 ans); et les technologies à haut risque visant 2030 et au-delà, qui présentent un potentiel extraordinaire mais nécessitent des percées techniques. Les cellules émergentes sont par exemple des cellules à jonctions multiples, à couches minces polycristallines et à silicium cristallin d'une épaisseur inférieure à 100 µm. Quant aux cellules à haut risque, ce sont par exemple des cellules solaires organiques, des dispositifs biomimétiques et des conceptions basées sur les points quantiques qui sont susceptibles d'augmenter le rendement maximal de manière substantielle. Enfin, d'importants travaux doivent être faits en ce qui concerne les autres composantes du système (ACS), qui comprennent les inverseurs, les dispositifs de stockage, les régulateurs de charge, les structures du système et le réseau énergétique. [3.7.3]

Solaire thermodynamique: Bien que la technologie du solaire thermodynamique ait désormais fait ses preuves à l'échelle commerciale, elle continue de progresser. À mesure que sont construites des centrales, la production en série et les économies d'échelle permettent de réduire les coûts. Il y a encore matière à amélioration eu égard au rendement de la conversion de l'énergie solaire en électricité, en partie avec des températures de capteurs plus élevées. Pour augmenter la température et le rendement, l'industrie met au point d'autres solutions que l'utilisation d'huile comme fluide caloporteur – par exemple l'utilisation d'eau (bouillant dans le récepteur) ou de sels fondus –, afin d'assurer des températures d'exploitation plus élevées. Pour les systèmes à récepteur central, les rendements d'ensemble devraient être plus importants du fait que les températures d'exploitation sont plus élevées, et les améliorations attendues devraient permettre d'obtenir des rendements optimums (conversion de l'énergie solaire en électricité) allant jusqu'à 35 %, soit près de deux fois ceux des systèmes existants. La technologie des capteurs cylindro-paraboliques pourra tirer parti des progrès continuels des surfaces sélectives absorbant le rayonnement solaire, et les récepteurs centraux et les miroirs paraboliques bénéficieront de l'amélioration de la conception des récepteurs et absorbeurs, qui assurera des niveaux élevés d'éclairement énergétique solaire au foyer. La production en série, les économies d'échelle et l'expérience acquise devraient permettre de réduire les coûts d'investissement. [3.7.4]

Production de combustibles solaires: L'électrolyse solaire au moyen du photovoltaïque ou du solaire thermodynamique permet des applications de niche, mais reste un procédé coûteux. Un grand nombre de possibilités sont actuellement à l'étude pour élaborer une technologie permettant de réduire le coût des combustibles solaires. Il s'agit notamment des cellules électrolytiques à oxyde solide, des cellules photo-électrochimiques (qui regroupent toutes les étapes de l'électrolyse solaire en une seule unité), de procédés thermochimiques perfectionnés et de procédés photochimiques et photobiologiques – parfois utilisés dans des combinaisons qui intègrent la photosynthèse artificielle dans des systèmes biomimétiques artificiels et la production photobiologique d'hydrogène dans des organismes vivants. [3.7.5]

Autres applications futures possibles: D'autres méthodes sont à l'étude pour produire de l'électricité à l'aide de technologies solaires thermiques sans cycle thermodynamique intermédiaire. Il s'agit notamment des méthodes thermoélectrique, thermionique et magnétohydrodynamique ainsi que de méthodes basées sur les métaux alcalins. On envisage aussi de recourir à l'énergie solaire spatiale, en mettant au point un système qui permettrait de transmettre l'énergie solaire captée dans l'espace vers des antennes situées au sol sous forme d'un faisceau micro-ondes. [3.7.6]

3.8 Tendances en matière de coûts

Bien que le coût de l'énergie solaire varie énormément selon les technologies, les applications, l'implantation ainsi que d'autres facteurs, les coûts ont nettement diminué depuis 30 ans, et les progrès techniques ainsi que les politiques publiques incitatives permettent d'envisager des réductions de coût supplémentaires. Le degré de persistance de l'innovation aura un impact significatif sur le niveau de mise en valeur du solaire. [3.7.2–3.7.5, 3.8.2–3.8.5]

Solaire thermique: Dans le domaine du chauffage solaire, l'économie des applications repose sur la conception appropriée des systèmes eu égard aux besoins en énergie, ce qui implique souvent l'utilisation de sources d'énergie auxiliaires. Dans certaines régions telles que le sud de la Chine, les systèmes de chauffage solaire de l'eau sont compétitifs par rapport aux options traditionnelles. Ces systèmes sont, de manière générale, plus compétitifs dans les régions ensoleillées, mais la situation est différente pour le chauffage de locaux, du fait de leur charge thermique globale généralement plus élevée. Dans les régions plus froides, les coûts d'investissement peuvent être répartis sur une saison de chauffage plus longue, de sorte que le solaire thermique devient alors plus compétitif. [3.8.2]

Les coûts d'investissement afférents aux systèmes de chauffage solaire varient fortement selon la complexité de la technologie employée et la situation du marché dans le pays considéré. Ainsi, le coût d'un système installé va de 83 dollars É.-U.$_{2005}$/m² pour les systèmes de chauffage solaire de l'eau en Chine à plus de 1 200 dollars É.-U.$_{2005}$/m² pour certains systèmes de chauffage de locaux. Le coût moyen actualisé de l'énergie thermique (CMA_{th}) reflète la forte variation des coûts d'investissement et dépend d'un nombre de variables encore plus grand, dont le type particulier de système, le coût d'investissement dudit système, l'éclairement énergétique solaire disponible en un lieu donné, le taux

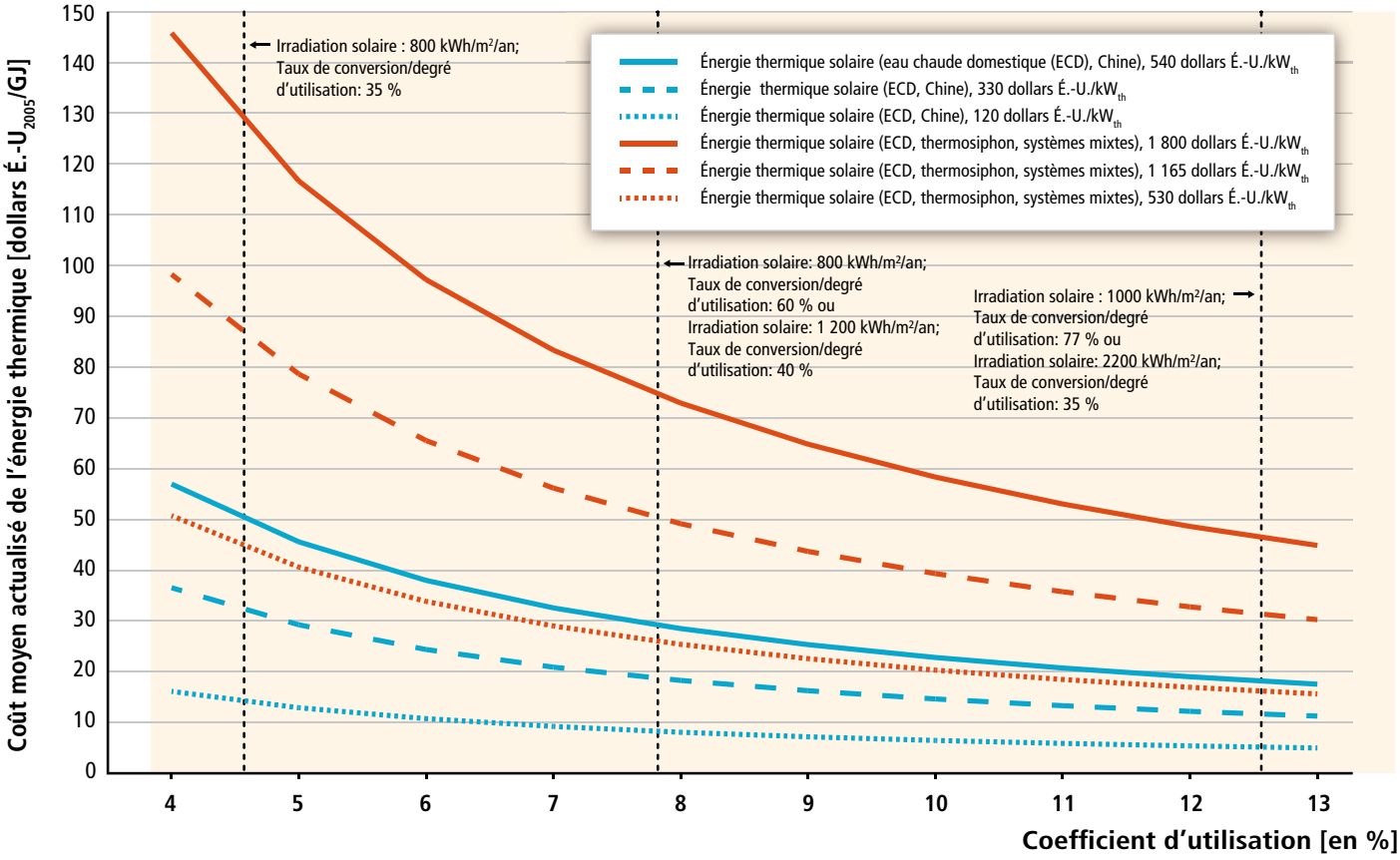


Figure TS.3.5 | Sensibilité du coût moyen actualisé de l'énergie thermique par rapport au coût d'investissement, en fonction du coefficient d'utilisation (taux d'actualisation estimé à 7 %, dépenses annuelles d'exploitation et de maintenance comprises entre 5,6 et 14 dollars É.-U_{2005}/kW et durée de vie fixée respectivement à 12,5 et 20 années pour les systèmes d'eau chaude sanitaire en Chine et pour différents types de systèmes dans les pays de l'OCDE). [Figure 3.16]

de conversion du système, les frais d'exploitation, la stratégie d'utilisation du système et le taux d'actualisation appliqué. D'après la méthodologie normalisée décrite dans l'annexe II et les données de coût et de performance résumées à l'annexe III, le CMA_{th} des systèmes thermiques solaires pour un grand nombre et une vaste gamme de paramètres d'entrée varie considérablement (de 9 à 200 dollars É.-U_{2005}/GJ), mais peut être estimé par analyse paramétrique pour des critères plus précis. La figure RT.3.5 présente ce CMA_{th} pour une série et une gamme de paramètres un peu plus restreintes. Plus précisément, la figure montre que, pour les systèmes de chauffage solaire de l'eau d'un coût compris entre 1 100 et 1 200 dollars É.-U_{2005}/kW_{th} et pour des taux de conversion d'environ 40 %, le CMA_{th} devrait se situer dans une fourchette comprise entre un peu plus de 30 dollars É.-U_{2005}/GJ et un peu moins de 50 dollars É.-U_{2005}/GJ dans des régions comparables aux sites d'implantation d'Europe centrale et d'Europe du Sud et atteindre près de 90 dollars É.-U_{2005}/GJ dans les régions où l'éclairement énergétique solaire est moindre. Chose peu surprenante, les estimations du coût moyen actualisé de l'énergie thermique sont extrêmement sensibles à l'ensemble des paramètres présentés à la figure RT.3.5, y compris aux coûts d'investissement et aux coefficients d'utilisation. [3.8.2, annexe II, annexe III]

Sur les dix dernières années, à chaque augmentation de 50 % de la capacité installée en chauffe-eau solaires, le coût d'investissement a baissé de 20 % en Europe. D'après l'AIE, les pays de l'OCDE devraient connaître d'autres réductions de coût du fait de l'utilisation de matériaux meilleur marché, de meilleurs procédés de fabrication, de la production en série et de l'intégration directe de capteurs dans les bâtiments sous forme de composantes multifonctionnelles du bâtiment et de systèmes modulaires faciles à installer. L'AIE estime que le coût de l'énergie livrée dans les pays de l'OCDE devrait finalement baisser de 70 à 75 %. [3.8.2]

Production d'électricité photovoltaïque: Les prix du photovoltaïque ont chuté de plus d'un facteur de 10 depuis 30 ans; toutefois, le coût moyen actualisé de l'électricité ($CMA_{él}$) produite par le photovoltaïque solaire reste généralement plus élevé que le prix de gros de l'électricité sur le marché. Pour certaines applications, les systèmes photovoltaïques sont déjà compétitifs par rapport à d'autres solutions locales (par exemple pour alimenter certaines zones rurales en électricité dans les pays en développement). [3.8.3, 8.2.5, 9.3.2]

Le $CMA_{él}$ associé au photovoltaïque dépend fortement du coût des différents éléments du système, le coût le plus élevé étant celui du module photovoltaïque. Le CMA_{el} dépend également du coût des autres composantes du système (ACS), du coût de la main d'œuvre pour l'installation, des coûts d'exploitation et de maintenance, de l'implantation et du coefficient d'utilisation ainsi que du taux d'actualisation appliqué. [3.8.3]

Le prix des modules photovoltaïques a fortement chuté, passant de 22 dollars É.-U_{2005}/W en 1980 à moins de 1,5 dollars É.-U_{2005}/W en 2010. Le taux d'apprentissage historique correspondant va de 11 à 26 %, avec un taux médian de 20 %. Le prix en dollars par watt pour un système entier, y compris le module, les ACS et les frais d'installation, a également diminué graduellement, jusqu'à atteindre 2,72 dollars É. U_{2005}/W pour certaines technologies en couche mince en 2009. [3.8.3]

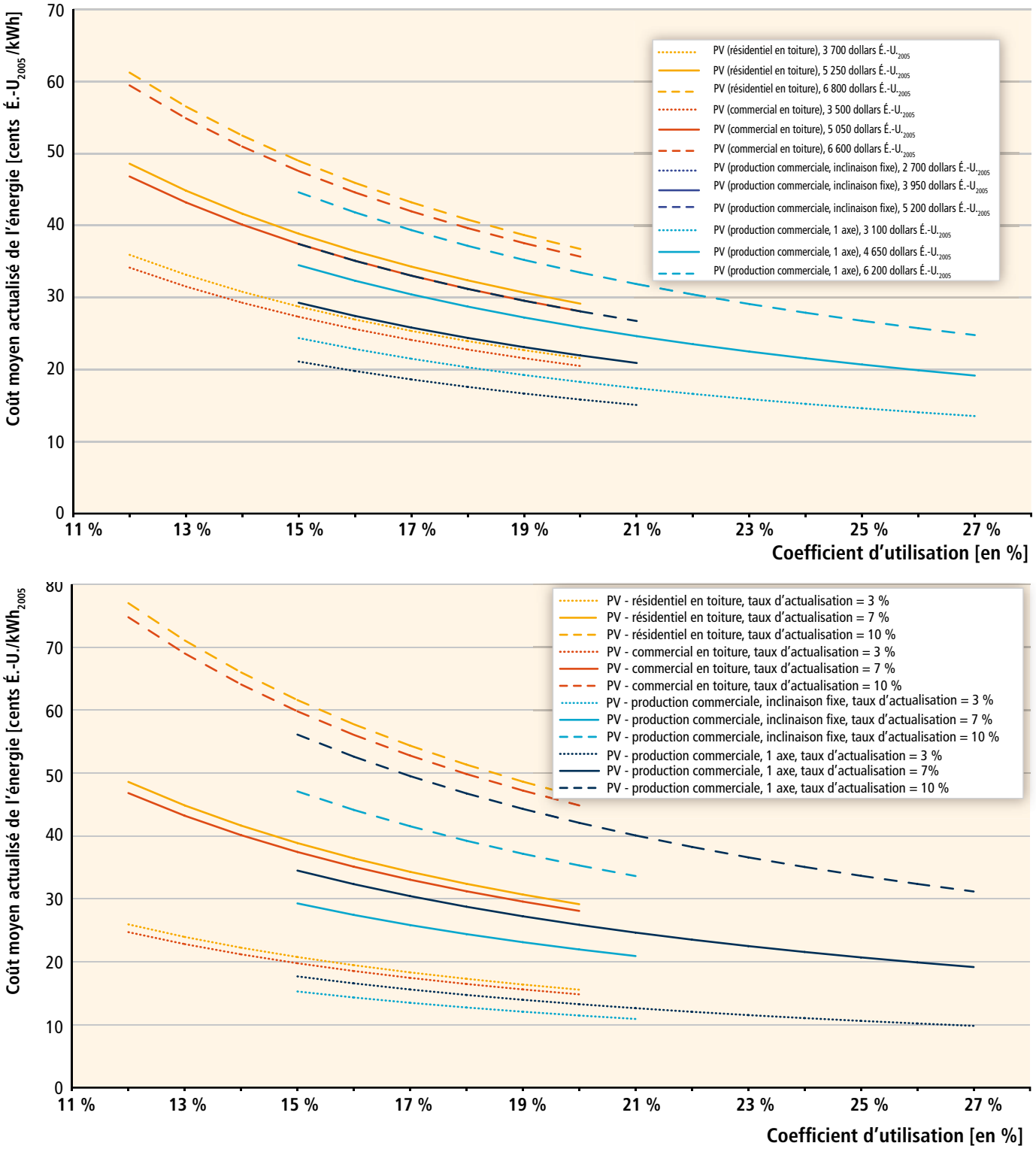


Figure TS.3.6 | Coût moyen actualisé de la production d'électricité photovoltaïque, 2008-2009: a) en fonction du coefficient d'utilisation et du coût d'investissement*,***; et b) en fonction du coefficient d'utilisation et du taux d'actualisation**,***. [Figure 3.19]

Notes: * Hypothèse concernant le taux d'actualisation: 7%. ** Hypothèse concernant le coût d'investissement: 5 500 dollars É.-U/kW pour les systèmes résidentiels sur toiture, 5 150 dollars É.-U/kW pour les systèmes commerciaux sur toiture, 3 650 dollars É.-U/kW pour les systèmes à inclinaison fixe à vocation commerciale et 4 050 dollars É.-U/kW pour les systèmes à un seul axe à vocation commerciale. ***Hypothèse concernant les frais annuels d'exploitation et de maintenance: 41 à 64 dollars É.-U/kW, durée de vie de 25 ans.

Pour le photovoltaïque, le $CMA_{él}$ n'est pas seulement fonction de l'investissement initial; il prend également en compte les frais d'exploitation et la durée de vie des composantes du système, les niveaux locaux du rayonnement solaire et les performances du système. Le $CMA_{él}$ de différents systèmes photovoltaïques a récemment été calculé en utilisant la méthodologie normalisée décrite à l'annexe II et les données de coût et de performance résumées à l'annexe III. On observe qu'il varie largement, allant de 0,074 à 0,92 dollars $É.-U._{2005}$/kWh, en fonction d'un grand nombre et d'une large gamme de paramètres d'entrée. Si l'on restreint le champ de variation des paramètres,

en 2009, le $CMA_{él}$ associé à la production d'électricité photovoltaïque à l'échelle commerciale dans des régions d'Europe et des États-Unis d'Amérique à fort éclairement énergétique solaire se situait à peu près dans une fourchette comprise entre 0,15 et 0,4 dollars É.-U.$_{2005}$/kWh pour un taux d'actualisation de 7 %, mais pouvait atteindre des valeurs inférieures ou supérieures selon la ressource disponible ainsi que d'autres conditions de base. La figure RT.3.6 montre une forte variation du $CMA_{él}$ du photovoltaïque selon le type de système, le coût d'investissement, le taux d'actualisation et le coefficient d'utilisation. [1.3.2, 3.8.3, 10.5.1, annexe II, annexe III]

L'AIE prévoit qu'en 2020, le coût de production de l'électricité ou $CMA_{él}$ atteindra les montants suivants: entre 14,5 et 28,6 cents É.-U.$_{2005}$/kWh pour le secteur résidentiel et de 9,5 à 19 cents É.-U.$_{2005}$/kWh pour le secteur commercial, selon que les conditions sont respectivement favorables (2 000 kWh/kW, soit l'équivalent d'un coefficient d'utilisation de 22,8 %) ou moins favorables (1 000 kWh/kW, soit l'équivalent d'un coefficient d'utilisation de 11,4 %). Le Département américain de l'énergie a des objectifs encore plus ambitieux et vise pour 2015 un $CMA_{él}$ compris entre 5 et 10 cents É.-U.$_{2005}$/kWh, selon l'utilisateur final. [3.8.3]

Production d'électricité solaire thermodynamique: Les systèmes de production d'électricité solaire thermodynamique constituent une technologie complexe qui opère dans un environnement complexe lui aussi, tant au plan de la ressource qu'au plan financier, de sorte que le $CMA_{él}$ est soumis à l'influence de nombreux facteurs. Les dépenses d'investissement annoncées pour les centrales thermodynamiques prêtent souvent à confusion lorsqu'on les compare avec d'autres sources d'énergie renouvelables, du fait que les différents niveaux de stockage thermique intégré augmentent les investissements tout en améliorant dans le même temps la production annuelle et le coefficient d'utilisation des centrales. Pour les grandes centrales à capteurs cylindro-paraboliques à la pointe de la technologie, le coût d'investissement estimatif se situe actuellement entre 3,82 dollars É.-U.$_{2005}$/W (sans stockage) et 7,65 dollars É.-U.$_{2005}$/W (avec stockage), selon le coût de la main d'œuvre et du foncier, les technologies, l'importance et la répartition de l'éclairement énergétique direct et, surtout, la capacité de stockage et la taille du champ solaire. Les données concernant les performances des centrales thermodynamiques modernes sont rares, notamment pour les centrales équipées de moyens de stockage thermique, car les nouvelles centrales ne sont entrées en exploitation qu'à partir de 2007. Le coefficient d'utilisation des premières centrales sans stockage pouvait atteindre 28 %. Pour les centrales modernes sans stockage, des coefficients d'utilisation d'environ 20 à 30 % sont envisagés et, pour les centrales avec stockage thermique, il est possible d'obtenir des coefficients d'utilisation de 30 à 75 %. Sur la base de la méthodologie normalisée décrite dans l'annexe II et des données de coût et de performance résumées à l'annexe III, en 2009, le $CMA_{él}$ d'une centrale solaire à capteurs cylindro-paraboliques dotée de six heures de stockage thermique, calculé pour un grand nombre et une large gamme de paramètres d'entrée, se situait dans une fourchette comprise entre légèrement plus de 10 cents É.-U.$_{2005}$/kWh et environ 30 cents É.-U.$_{2005}$/kWh. En limitant la gamme des taux d'actualisation à 10 %, la fourchette est un peu plus étroite et se situe environ entre 20 et 30 cents É. U.$_{2005}$/kWh, ce qui correspond à peu près à la fourchette mentionnée dans la littérature, soit 18 à 27 cents É. U.$_{2005}$/kWh. Certains paramètres de coût et de performance particuliers, dont le taux d'actualisation appliqué et le coefficient d'utilisation, affectent les estimations spécifiques du $CMA_{él}$, même si le $CMA_{él}$ de différentes configurations de systèmes dans des conditions par ailleurs identiques ne devrait varier que marginalement. [3.8.4]

Le taux d'apprentissage pour le solaire thermodynamique, à l'exclusion du bloc de puissance, a été estimé à 10 ± 5 %. Les objectifs spécifiques de $CMA_{él}$ pour les États-Unis d'Amérique se situent entre 6 et 8 cents É.-U.$_{2005}$/kWh d'ici 2015 avec 6 heures de stockage et entre 50 et 60 cents É.-U.$_{2005}$/kWh d'ici 2020 avec 12 à 17 heures de stockage. L'Union européenne vise des objectifs similaires. [3.8.4]

3.9 Mise en valeur potentielle

3.9.1 Mise en valeur potentielle

Le tableau RT.3.1 résume les résultats des études disponibles sur les possibilités de mise en valeur d'ici 2020, tirés de la littérature. Les sources des données du tableau sont les suivantes: Conseil européen des énergies renouvelables (EREC) – Greenpeace (scénario Energy [R]evolution, scénario de référence et scénario avancé); et AIE (feuilles de route pour les technologies solaires photovoltaïques et solaires thermodynamiques). En ce qui concerne les données sur le solaire thermique, il convient de noter qu'elles n'incluent pas la contribution du solaire passif; bien que cette technologie permette de réduire la demande en énergie, elle ne fait pas partie de la chaîne d'approvisionnement prise en compte dans les statistiques sur l'énergie. [3.9]

3.9.2 Mise en valeur à long terme dans le contexte de la réduction des émissions de carbone

La figure RT.3.7 présente les résultats de plus de 150 scénarios de modélisation à long terme décrits au chapitre 10. Les scénarios de mise en valeur potentielle varient largement – certains attribuant un rôle marginal à l'énergie solaire directe en 2050 et d'autres considérant que cette énergie constituera une source d'approvisionnement en énergie majeure. Bien que l'énergie solaire directe ne représente actuellement qu'une très petite partie de l'approvisionnement mon-

Tableau TS.3.1 | Évolution des capacités solaires cumulées. [Tableau 3.7]

		Solaire thermique basse température (GW_{th})			Électricité solaire photovoltaïque (GW)			Électricité solaire thermodynamique (GW)		
	Année	2009	2015	2020	2009	2015	2020	2009	2015	2020
Nom du scénario	**Capacité installée cumulée actuelle**	**180**			**22**			**0,7**		
	EREC – Greenpeace (scénario de référence)		180	230		44	80		5	12
	EREC – Greenpeace (scénario Energy [R]evolution)		715	1 875		98	335		25	105
	EREC – Greenpeace (scénario avancé)		780	2 210		108	439		30	225
	Feuilles de route de l'AIE		n.d.			95[1]	210		n.d.	148

Note: 1) Extrapolé à partir du taux de croissance moyen pour 2010 à 2020.

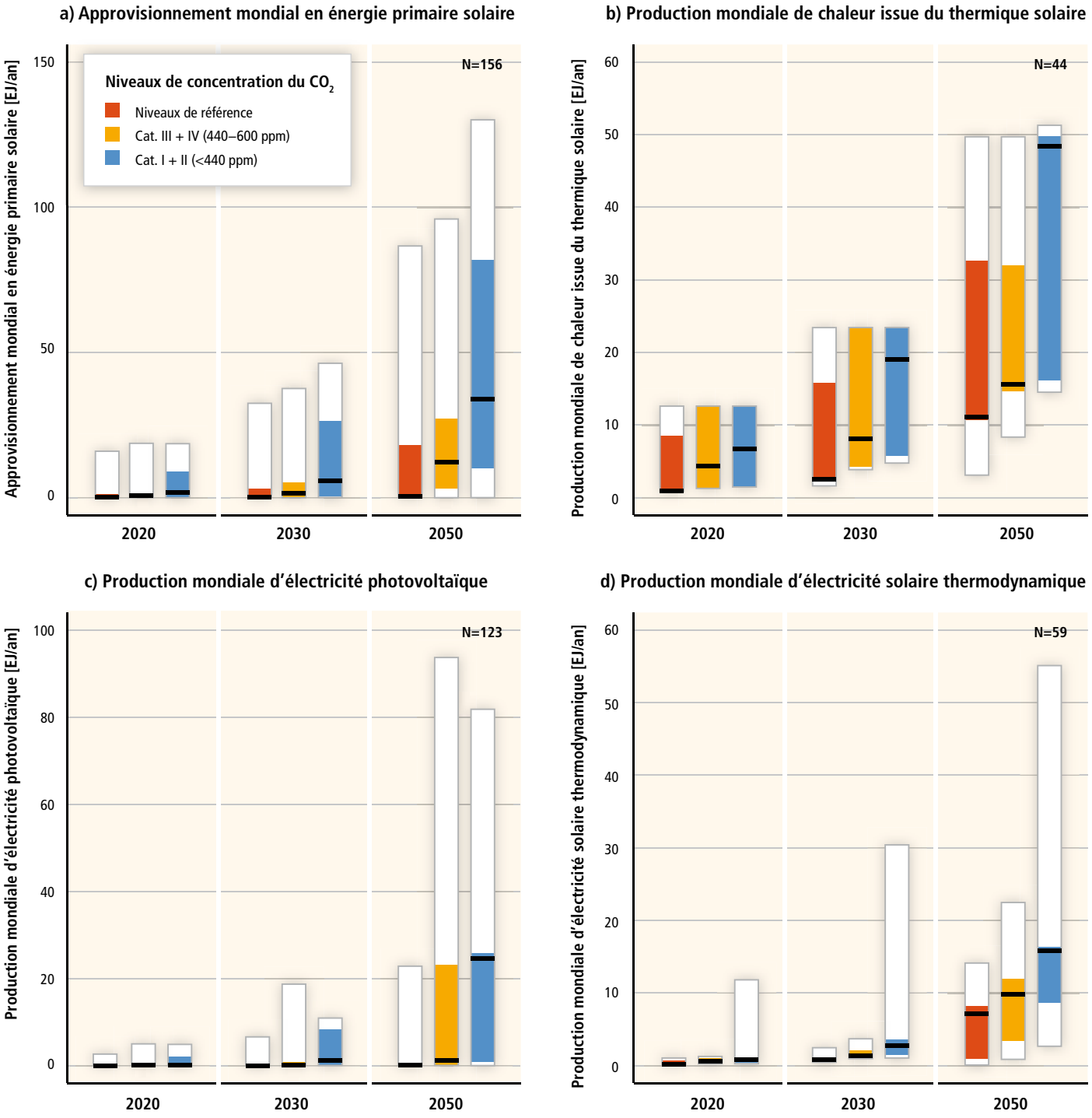


Figure TS.3.7 | Approvisionnement mondial en énergie solaire et production mondiale d'énergie solaire selon divers scénarios à long terme (médiane, fourchette du 25e au 75e percentile et fourchette complète des résultats des scénarios; le codage couleur est fondé sur les niveaux de concentration du CO_2 atmosphérique en 2100; le nombre de scénarios correspondant à chaque graphique est indiqué dans le coin en haut à droite). a) Approvisionnement mondial en énergie solaire primaire; b) production mondiale de solaire thermique; c) production mondiale d'électricité photovoltaïque solaire; et d) production mondiale d'électricité solaire thermodynamique. [Figure 3.22]

dial en énergie, il ne fait aucun doute que cette source d'énergie est l'une de celles qui présente le potentiel d'avenir le plus prometteur.

La réduction des coûts est un élément clé pour faire de l'énergie solaire directe une proposition plus pertinente commercialement et la mettre en position de viser une plus large part du marché mondial de l'énergie. Ceci n'est possible que si les coûts afférents aux technologies solaires diminuent au fur et à mesure de leur progression le long des courbes d'apprentissage correspondantes, ce qui dépend en premier lieu des volumes du marché. Par ailleurs, la recherche-développement doit se poursuivre, de sorte que les courbes d'apprentissage ne s'aplatissent pas trop tôt. Les coûts réels de la mise en valeur de l'énergie solaire restent inconnus, car les principaux scénarios de mise en valeur actuels ne prennent en compte qu'une seule technologie. Ces scénarios ne tiennent pas compte des avantages connexes qu'apporte un approvisionnement en énergie renouvelable ou durable

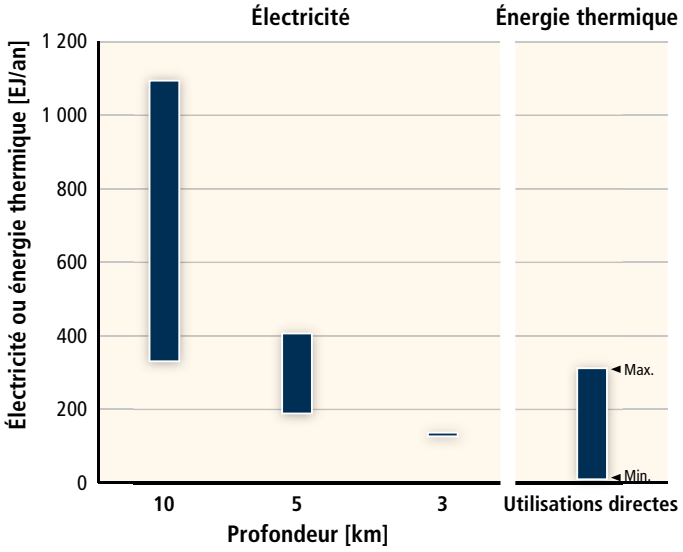


Figure TS.4.1 | Potentiels techniques géothermiques pour l'électricité et les utilisations directes (chaleur). Habituellement, les utilisations directes ne nécessitent pas de développement à des profondeurs supérieures à environ trois kilomètres. [Figure 4.2]

par le biais de sources d'ÉR diversifiées et de mesures d'amélioration du rendement énergétique.

La mise en valeur potentielle dépend des ressources effectives et de la disponibilité des technologies concernées. Toutefois, le cadre réglementaire et juridique en place peut favoriser ou entraver, dans une large mesure, l'adoption d'applications de l'énergie solaire directe. Un minimum de normes de construction concernant l'orientation et l'isolation des bâtiments peut réduire de manière significative la demande en énergie desdits bâtiments et augmenter la part de l'offre en énergie renouvelable sans accroître la demande globale. Le coût afférent à l'énergie solaire directe peut par ailleurs être diminué plus encore par l'adoption de procédures administratives transparentes et rationnalisées pour l'installation et le raccordement des sources d'énergie solaire aux infrastructures de réseau existantes.

4. L'énergie géothermique

4.1 Introduction

Les ressources géothermiques consistent en l'énergie thermique provenant de l'intérieur de la Terre et stockée à la fois dans les roches et dans la vapeur piégée ou l'eau liquide. Elles sont utilisées pour produire de l'énergie électrique dans des centrales thermiques ou pour d'autres applications domestiques et agro-industrielles nécessitant de la chaleur ainsi que pour des applications de production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération). Le changement climatique n'a pas d'incidences majeures sur l'efficacité de l'énergie géothermique. [4.1]

L'énergie géothermique est une ressource renouvelable, vu que la chaleur extraite d'un réservoir actif est continuellement remplacée par la production de chaleur naturelle, la conduction et la convection de zones voisines plus chaudes, et les fluides géothermiques extraits sont reconstitués par recharge naturelle et par réinjection des fluides refroidis. [4.1]

4.2 Potentiel de la ressource

On estime que la chaleur accessible stockée dans des roches sèches chaudes à l'intérieur de la Terre se situe entre 110 et 403 x 106 EJ à 10 km de profondeur, 56 et 140 x 106 EJ à 5 km de profondeur et environ 34 x 106 EJ à 3 km de profondeur. À partir d'évaluations réalisées précédemment à propos des ressources hydrothermiques et de calculs sur les systèmes géothermiques améliorés (ou aménagés) émanant de l'évaluation de la chaleur stockée en profondeur, le potentiel technique de la géothermie pour la production d'électricité se situe entre 118 et 146 EJ/an (à 3 km de profondeur), entre 318 et 1 109 EJ/an (à 10 km de profondeur) et entre 10 et 312 EJ/an pour les utilisations directes (figure TS.4.1). [4.2.1]

Le tableau TS.4.1 présente les potentiels techniques par région. La répartition par région s'appuie sur la méthode appliquée par l'Electric Power Research Institute pour évaluer les potentiels géothermiques théoriques de chaque pays avant de regrouper les pays par région. La présente ventilation du potentiel technique

Tableau TS.4.1 | Potentiels techniques géothermiques en zone continentale pour les régions de l'AIE [tableau 4.3]

RÉGION[1]	Potentiel technique électrique (EJ/an) à une profondeur de:						Potentiels techniques (EJ/an) pour des usages directs	
	3 km		5 km		10 km			
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
Amérique du Nord OCDE	25,6	31,8	38,0	91,9	69,3	241,9	2,1	68,1
Amérique latine	15,5	19,3	23,0	55,7	42,0	146,5	1,3	41,3
Europe OCDE	6,0	7,5	8,9	21,6	16,3	56,8	0,5	16,0
Afrique	16,8	20,8	24,8	60,0	45,3	158,0	1,4	44,5
Économies en transition	19,5	24,3	29,0	70,0	52,8	184,4	1,6	51,9
Moyen-Orient	3,7	4,6	5,5	13,4	10,1	35,2	0,3	9,9
Asie en développement	22,9	28,5	34,2	82,4	62,1	216,9	1,8	61,0
Pacifique OCDE	7,3	9,1	10,8	26,2	19,7	68,9	0,6	19,4
Total	**117,5**	**145,9**	**174,3**	**421,0**	**317,5**	**1 108,6**	**9,5**	**312,2**

Note: 1. Pour les définitions des régions et des groupements de pays, voir l'annexe II. La chaleur extraite pour réaliser les potentiels techniques peut être reconstituée totalement ou partiellement sur le long terme par le flux de chaleur terrestre en zone continentale de 315 EJ/an pour un flux moyen de 65 mW/m^2. [4.2.1]

mondial est donc basée sur des facteurs qui prennent en compte les variations régionales du gradient géothermique moyen ainsi que la présence soit d'une anomalie géothermique diffuse, soit d'une zone de haute température associée à une activité volcanique ou aux limites des plaques. La distinction entre potentiel électrique et potentiel thermique (utilisations directes) est quelque peu arbitraire, dans la mesure où la plupart des ressources à température élevée pourraient être utilisées pour l'un, pour l'autre ou pour les deux dans des applications de cogénération selon les conditions du marché local. [4.2.2]

4.3 Technologies et applications

Actuellement, l'énergie géothermique est extraite à l'aide de puits et d'autres moyens produisant des fluides chauds à partir: a) de réservoirs hydrothermiques naturellement très perméables, ou b) de systèmes géothermiques améliorés ou aménagés avec des voies fluides artificielles (figure TS.4.2). La technologie de production d'électricité à partir de réservoirs hydrothermiques est maîtrisée et fiable et fonctionne depuis une centaine d'années. Les technologies de chauffage direct faisant appel à des pompes à chaleur géothermique pour le chauffage urbain et d'autres applications sont également bien maîtrisées. Quant aux technologies faisant appel à des systèmes géothermiques améliorés, elles en sont à l'étape de la démonstration. [4.3]

Le courant électrique tiré de l'énergie géothermique est particulièrement adapté à la fourniture de courant de base, mais peut également être réparti et utilisé pour faire face aux pics de la demande. Ainsi, le courant électrique géothermique peut venir en complément de la production variable d'électricité. [4.3]

Étant donné que les ressources géothermiques se trouvent dans le sous-sol, des méthodes d'exploration (y compris des études géologiques, géochimiques et géophysiques) ont été mises au point pour les localiser et les évaluer. Les objectifs de l'exploration géothermique consistent à identifier et à classer les réservoirs géothermiques potentiels avant de forer. Actuellement, les puits géothermiques allant jusqu'à des profondeurs de 5 km sont forés en faisant appel à des méthodes classiques de forage rotatif semblables à celles utilisées pour atteindre les réservoirs de pétrole et de gaz. Des techniques de forage perfectionnées permettent de fonctionner à haute température et offrent des capacités sur le plan de l'orientation des forages. [4.3.1]

Les principaux types de centrales géothermiques actuellement en service sont des turbines à condensation de vapeur et des unités à cycle binaire. Les centrales à condensation peuvent être de type flash (vaporisation partielle) ou à vapeur sèche (ces dernières n'exigeant pas de séparation de la saumure, ce qui signifie que ces centrales sont plus simples et meilleur marché) et sont plus courantes que les unités à cycle binaire. Elles sont installées dans le cas de ressources à température intermédiaire ou élevée (≥ 150 °C) avec une capacité souvent comprise entre 20 et 110 $MW_{él}$. Dans les centrales à cycle binaire, le fluide géothermique passe par un échangeur de chaleur pour chauffer un autre fluide de travail à bas point d'ébullition, qui se vaporise et alimente une turbine. Ces centrales permettent d'utiliser des réservoirs hydrothermiques à plus basse température et des réservoirs de systèmes géothermiques améliorés (généralement entre 70 °C et 170 °C) et sont souvent construites sous forme d'unités modulaires reliées, d'une capacité de quelques $MW_{él}$. Les centrales combinées ou hybrides combinent deux ou plusieurs des types de base ci-dessus afin d'offrir plus de versatilité, d'accroître l'efficacité thermique globale, d'améliorer les possibilités de suivi de charge et de couvrir efficacement

(a)

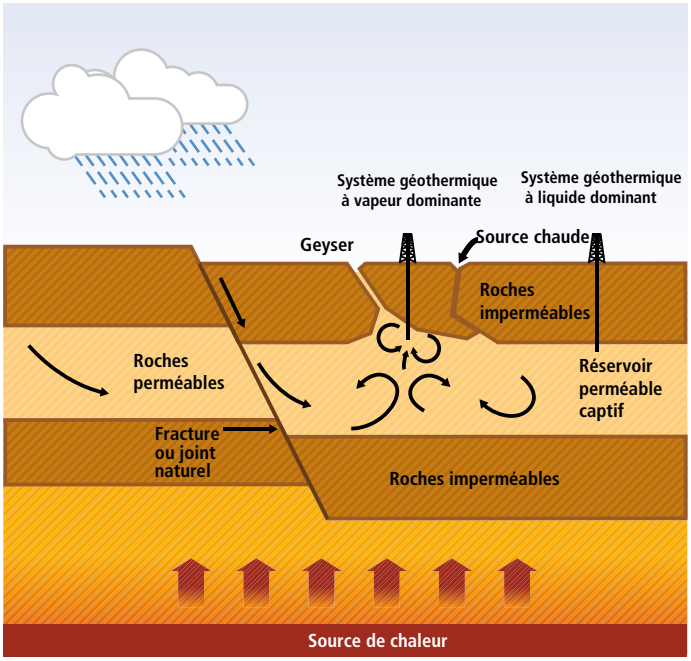


Figure TS.4.2a | Diagramme montrant des ressources convectives (hydrothermiques) [Figure 4.1]

une vaste gamme de températures. Enfin, les centrales à cogénération produisent à la fois de l'électricité et de l'eau chaude pour une utilisation directe. [4.3.3]

Pour une utilisation efficace, les réservoirs des systèmes géothermiques améliorés nécessitent la stimulation de zones souterraines où la température est suffisamment élevée. Un réservoir composé d'un réseau de fractures est créé ou amélioré pour fournir des voies bien connectées pour le fluide entre les puits d'injection et les puits de production. La chaleur extraite en faisant circuler de l'eau à travers le réservoir en boucle fermée peut être utilisée pour la production de courant et pour le chauffage industriel ou domestique (voir la figure TS.4.2). [4.3.4]

L'utilisation directe permet d'assurer chauffage et refroidissement dans des bâtiments, y compris pour le chauffage urbain, les bassins à poissons, les serres, la baignade, les centres de bien être et les piscines, la purification et le dessalement de l'eau et la production de chaleur industrielle pour le séchage de produits agricoles et de minerais. Même s'il peut y avoir débat quant à savoir si les pompes à chaleur géothermique sont une application «véritable» de l'énergie géothermique, ces pompes peuvent être utilisées presque partout dans le monde pour le chauffage et la refroidissement et tirent parti de la température relativement constante du sol et des eaux souterraines dans une fourchette de 4 à 30 °C. [4.3.5]

4.4 Situation du marché mondial et régional et évolution de l'industrie

Les ressources géothermiques sont utilisées pour produire de l'électricité depuis près d'un siècle. En 2009, le marché mondial de l'électricité géothermique comptait de nombreux acteurs, avec une capacité installée de 10,7 $GW_{él}$. En 2008, l'électricité produite dans 24 pays a dépassé les 67 $TWh_{él}$ (0,24 EJ) (figure TS.4.3) et représenté plus de 10 % de la demande totale d'électricité dans six d'entre eux. Il y avait également, toujours en 2008, 50,6 GW_{th} d'applications géothermiques

(b)

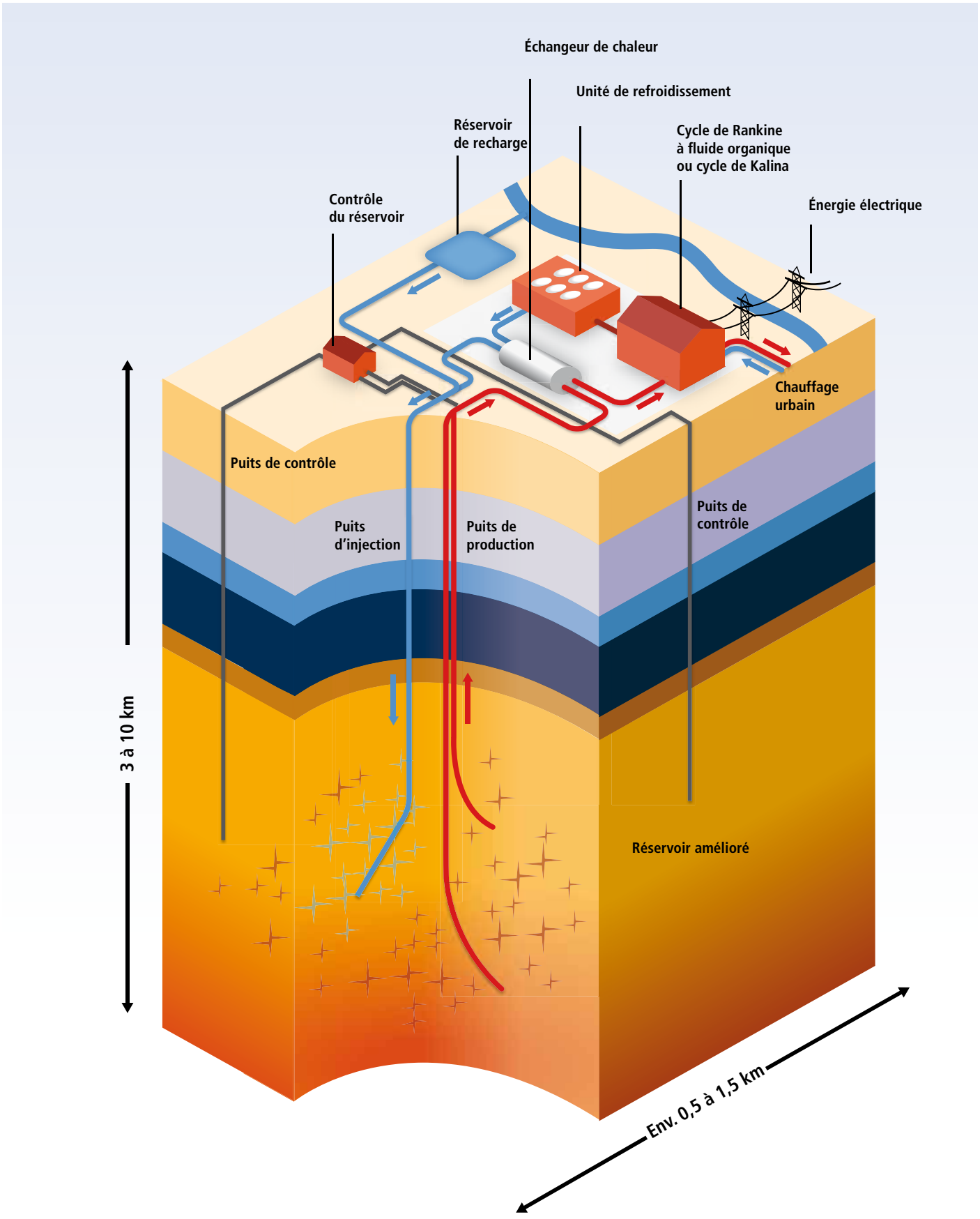


Figure TS.4.2b | Diagrammes montrant des ressources par conduction (systèmes géothermiques améliorés) (à droite). [Figure 4.1]

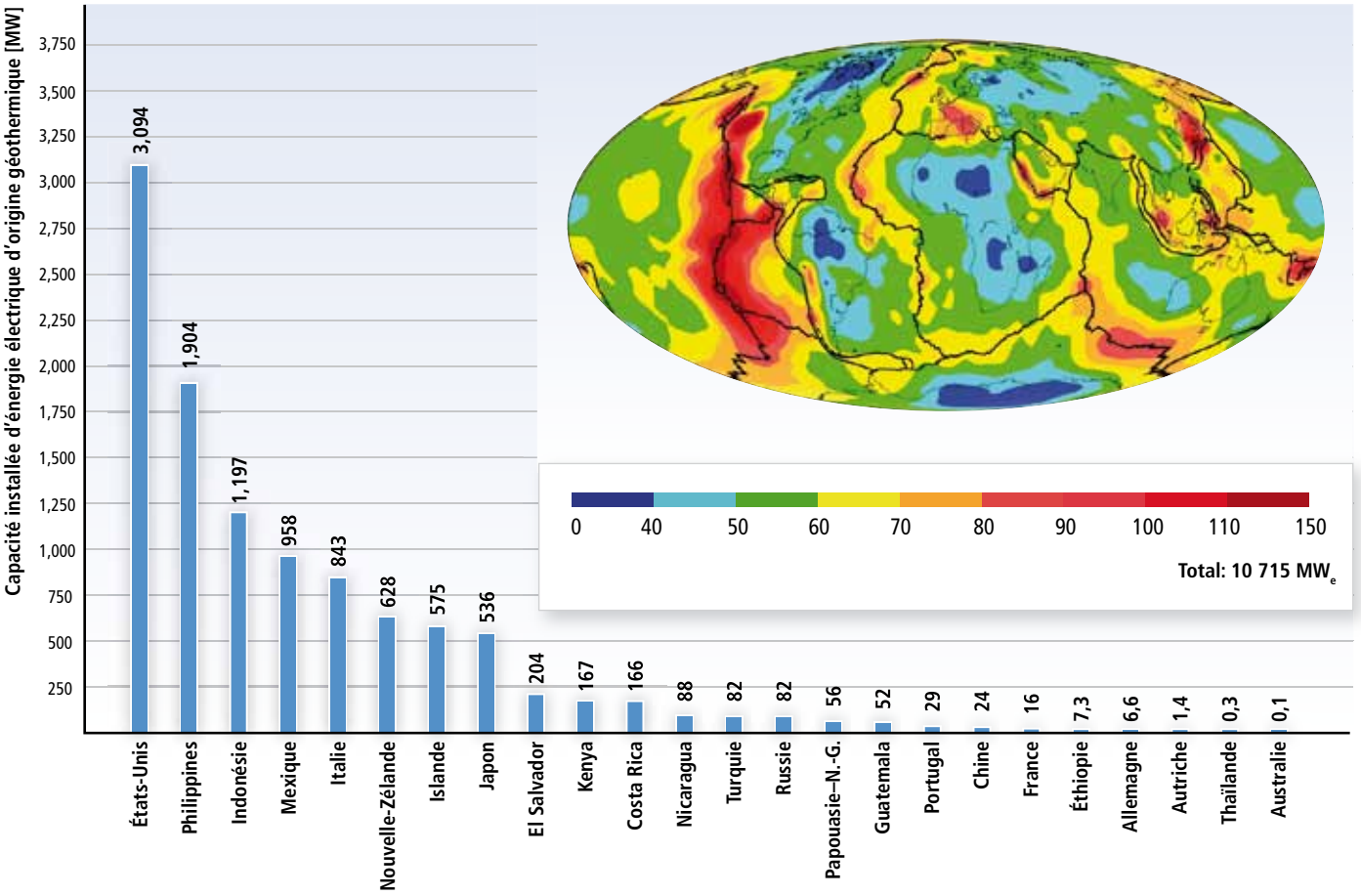


Figure TS.4.3 | Capacité installée d'électricité géothermique par pays en 2009. La figure présente le flux thermique moyen mondial en mW/m^2 ainsi que les limites des plaques tectoniques. [Figure 4.5]

directes en exploitation dans 78 pays, lesquelles ont généré 121,7 TWh$_{th}$ (0,44 EJ) de chaleur. Les pompes à chaleur géothermique ont représenté 70 % (35,2 GW$_{th}$) de cette capacité installée aux fins d'utilisation directe. [4.4.1, 4.4.3]

Le taux de croissance annuel moyen de la capacité installée d'électricité géothermique à l'échelle du globe a été de 3,7 % au cours des cinq dernières années (2005-2010) et de 7 % pour les 40 dernières années (1970-2010). Pour les utilisations directes de la géothermie, les taux ont été de 12,7 % (2005-2010) et de 11 % pour la période 1975-2010. [4.4.1]

Les systèmes géothermiques améliorés en sont encore à la phase de démonstration, avec une petite centrale en exploitation en France et un projet pilote en Allemagne. En Australie, l'étude et la mise au point de ces systèmes ont bénéficié d'investissements considérables ces dernières années, et les États-Unis d'Amérique ont récemment accru leur soutien à la recherche, au développement et à la démonstration de ces systèmes dans le cadre de la relance d'un programme géothermique national. [4.4.2]

En 2009, les principaux types (et pourcentages relatifs) d'applications géothermiques directes aux fins d'une utilisation annuelle d'énergie ont été le chauffage des bâtiments (63 %), la baignade et la balnéothérapie (25 %), l'horticulture (serres et chauffage du sol) (5 %), la chaleur à usage industriel et le séchage agricole (3 %), l'aquaculture (pisciculture) (3 %) et la fonte des neiges (1 %). [4.4.3] Pour que la géothermie atteigne sa pleine capacité en matière d'atténuation du changement climatique, il est nécessaire de surmonter des obstacles techniques et non techniques. Des mesures propres à la technologie géothermique peuvent contribuer à surmonter ces obstacles. [4.4.4]

4.5 Impacts environnementaux et sociaux

Il existe des impacts environnementaux et sociaux liés à l'énergie géothermique, qui dépendent généralement du site considéré et de la technologie employée. Habituellement, ces incidences sont gérables, et les impacts environnementaux négatifs sont minimes. Le principal GES émis dans le cadre de l'exploitation géothermique est le CO_2, même s'il n'est pas le produit d'une combustion mais qu'il est émis par des sources présentes naturellement. Une étude de terrain menée sur les centrales géothermiques en exploitation en 2001 a fait ressortir la forte variabilité des taux d'émission directe de CO_2, avec des valeurs allant de 4 à 740 g/kWh$_{él}$ selon la configuration technique et la composition du fluide géothermique dans le réservoir souterrain. Dans le cadre des applications d'utilisation directe, les émissions directes de CO_2 sont négligeables et les centrales faisant appel à des systèmes géothermiques améliorés sont généralement conçues comme des systèmes de circulation en circuit fermé en phase liquide, sans émissions directes. Les évaluations sur l'ensemble du cycle de vie donnent les prévisions d'émissions suivantes, en équivalent CO_2: moins de 50 g/kWh$_{él}$ pour les centrales géothermiques, moins de 80 g/kWh$_{él}$ pour les systèmes géothermiques améliorés prévus et de 14 à 202 g/kWh$_{th}$ pour les systèmes de chauffage urbain et les pompes à chaleur géothermique. [4.5, 4.5.1, 4.5.2]

Pour déterminer les impacts environnementaux associés aux projets géothermiques, il faut prendre en compte toute une série d'incidences locales liées à l'air et à l'utilisation des sols et de l'eau, en phase de construction et en phase d'exploitation, certaines de ces incidences étant communes à la plupart des projets énergétiques et d'autres étant propres à l'énergie géothermique. Les systèmes géothermiques mettent en jeu des phénomènes naturels et entraînent généralement un dégagement de gaz mêlés à de la vapeur, dû à des caractéristiques de surface et à des minéraux dissous dans l'eau des sources chaudes. Certains gaz peuvent être dangereux, mais sont généralement soit traités, soit surveillés en cours de production. Par le passé, il était plus courant de rejeter à la surface l'eau séparée, mais actuellement, cela ne se produit que dans des circonstances exceptionnelles. La saumure géothermique est habituellement réinjectée dans le réservoir afin de contrebalancer les pressions qui s'y exercent et d'éviter des effets négatifs sur l'environnement. S'il dépasse de manière significative le débit des sources chaudes naturelles et s'il n'est pas fortement dilué, le rejet en surface peut avoir un effet négatif sur l'écologie des cours d'eau, des lacs et des milieux marins. [4.5.3.1]

Des dangers locaux dus à des phénomènes naturels (microséismes, éruptions de vapeur hydrothermique, subsidence du sol, etc.) peuvent être influencés par l'exploitation de champs géothermiques. Au cours des 100 années d'évolution de ces technologies, aucun bâtiment ni aucune structure appartenant à un site d'exploitation géothermique ou à une collectivité locale n'a été endommagé de manière significative par des séismes superficiels générés soit par la production géothermique, soit par des activités d'injection. Certains projets de démonstration de systèmes géothermiques améliorés ont suscité des oppositions sociales, notamment dans des zones peuplées d'Europe. Le processus consistant à injecter de l'eau froide sous haute pression dans des roches chaudes peut provoquer de petits épisodes sismiques. Les phénomènes sismiques induits n'ont pas été suffisamment importants pour faire des victimes ou causer des dégâts importants, mais une gestion appropriée de ce problème représentera à l'avenir une étape importante pour faciliter le développement des projets de systèmes géothermiques améliorés. [4.5.3.2]

Les conditions d'utilisation des sols vont de 160 à 290 $m^2/GWh_{él}$/an sans compter les puits et peuvent aller jusqu'à 900 m^2/GWh/an en incluant les puits. Les incidences spécifiques de la géothermie sur l'utilisation des sols comprennent des effets sur des éléments naturels d'exception tels que sources, geysers et fumeroles. Dans de nombreux pays (tels que le Japon, les États-Unis d'Amérique et la Nouvelle Zélande), les problèmes liés à l'utilisation des sols peuvent constituer une entrave sérieuse à la poursuite de l'expansion de la géothermie. [4.5.3.3]

Les ressources géothermiques peuvent également présenter des avantages environnementaux considérables en comparaison des modes d'utilisation de l'énergie qu'elles remplacent. [4.5.1]

4.6 Perspectives en matière d'amélioration, d'innovation et d'intégration des technologies

Les ressources géothermiques peuvent être intégrées dans tous les types de systèmes d'approvisionnement en énergie électrique, qu'il s'agisse de vastes réseaux de distribution continentaux interconnectés ou d'utilisations sur site pour de petits villages isolés ou des bâtiments autonomes. Comme l'énergie géothermique assure généralement la production d'électricité de base, l'intégration de nouvelles centrales dans des systèmes énergétiques existants ne présente pas de problème majeur. Pour les utilisations directes de la géothermie, aucun problème d'intégration n'a été observé et, en ce qui concerne le chauffage et le refroidissement, l'énergie géothermique (y compris les systèmes de pompes à chaleur) est déjà très répandue au niveau domestique, communautaire et urbain. Le chapitre 8 du présent résumé traite plus en détail des problèmes d'intégration. [4.6]

Plusieurs perspectives d'améliorations techniques et d'innovations peuvent conduire à une réduction du coût de production de l'énergie géothermique, à une récupération plus importante de l'énergie, à l'allongement de la durée de vie des sites et des centrales et à une meilleure fiabilité. Des études géophysiques approfondies ainsi que l'optimisation de l'injection, la prévention du tartre et de la corrosion et une meilleure modélisation des réservoirs sont autant d'éléments qui contribueront à réduire les risques liés à la ressource en faisant mieux concorder capacité installée et capacité de production durable. [4.6]

En matière d'exploration, des activités de recherche-développement sont nécessaires pour localiser les systèmes géothermiques cachés (par exemple ceux qui ne donnent lieu à aucune manifestation en surface) et dans une perspective de systèmes améliorés. L'affinement et l'utilisation accrue d'outils de reconnaissance géothermique rapide tels que des capteurs satellitaires, hyperspectraux en altitude, thermiques infrarouge, panchromatiques haute résolution ou radar pourraient améliorer l'efficacité des activités d'exploration. [4.6.1]

Des recherches particulières doivent être menées sur les techniques de forage et de construction des puits, afin d'accroître la vitesse de pénétration lors de forages dans une roche dure et de mettre au point des techniques perfectionnées de forage en petit diamètre, dans le but général de réduire les coûts et d'allonger la durée de vie utile des installations de production géothermique. [4.6.1]

L'efficacité des différentes composantes des centrales géothermiques et des utilisations directes peuvent encore être améliorées, et il est important d'élaborer des systèmes de conversion permettant une utilisation plus efficace de l'énergie dans le fluide géothermique produit. Il est également possible d'utiliser des puits de pétrole et de gaz susceptibles de fournir de l'énergie géothermique pour la production d'électricité. [4.6.2]

Les projets de systèmes géothermiques améliorés en sont actuellement à la phase de démonstration ou à la phase expérimentale. Ces systèmes nécessitent des méthodes innovantes pour stimuler hydrauliquement la connectivité des réservoirs entre les puits d'injection et les puits de production afin d'atteindre des rythmes de production soutenus et adaptés à un usage commercial, tout en réduisant le risque de danger sismique et en améliorant les simulateurs numériques et les méthodes d'évaluation en vue de prévoir de manière fiable les réactions chimiques entre les fluides géologiques et les roches-réservoirs géothermiques. La possibilité d'utiliser du CO_2 comme fluide de travail dans les réservoirs géothermiques, notamment pour les systèmes géothermiques améliorés, est également à l'étude, car elle pourrait fournir un moyen de renforcer l'effet de la mise en valeur de l'énergie géothermique en réduisant les émissions de CO_2 au-delà de la seule production d'électricité avec une source d'énergie renouvelable qui n'émet pas de carbone. [4.6.3]

Il n'existe actuellement aucune technologie susceptible de tirer parti des ressources géothermiques sous-marines, mais en théorie, il devrait être possible de produire de l'énergie électrique directement à partir d'un évent hydrothermal. [4.6.4]

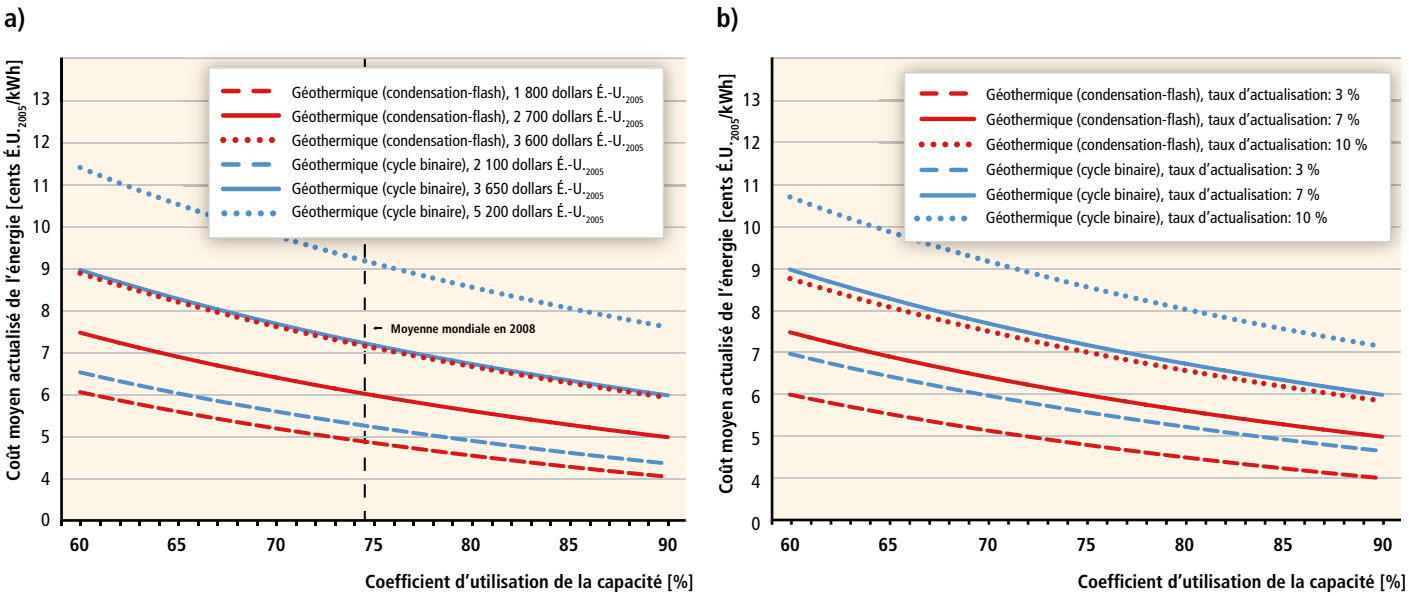


Figure TS.4.4 | Coût moyen actualisé de l'énergie géothermique en 2008: a) en fonction du coefficient d'utilisation de la capacité et du coût*, ***; et b) en fonction du coefficient d'utilisation de la capacité et du taux d'actualisation**, ***. [Figure 4.8]

Notes: * Hypothèse concernant le taux d'actualisation: 7%.** Hypothèse concernant le coût d'investissement: 2 700 dollars É. U./kW pour les centrales à condensation flash et 3 650 dollars É. U./kW pour les centrales à cycle binaire. *** Hypothèse concernant les dépenses annuelles d'exploitation et de maintenance: 170 dollars É. U./kW, durée de vie: 27,5 ans.

4.7 Tendances en matière de coûts

Les projets géothermiques nécessitent généralement des investissements initiaux élevés, du fait de la nécessité de forer des puits et de construire des centrales, et engendrent des coûts d'exploitation relativement faibles. Bien que les coûts varient selon les projets, le coût moyen actualisé de l'énergie pour les centrales utilisant des ressources hydrothermiques est souvent compétitif sur les marchés actuels de l'électricité; il en va de même pour les utilisations directes de la chaleur géothermique. Les centrales géothermiques améliorées sont toujours en phase de démonstration, mais on estime que les coûts liés à ces centrales sont plus élevés que ceux des réservoirs hydrothermiques. [4.7]

Les coûts d'investissement pour un projet d'électricité géothermique type correspondent: a) à l'exploration et à la confirmation de la ressource (10 à 15 % du total); b) au forage des puits de production et d'injection (20 à 35 % du total); c) aux installations de surface et à l'infrastructure (10 à 20 % du total); et d) à la centrale proprement dite (40 à 81 % du total). Au niveau mondial, ces coûts varient actuellement de 1 800 à 5 200 dollars É.-U.$_{2005}$/kW$_{él}$. [4.7.1]

On a calculé que les coûts d'exploitation et de maintenance, y compris pour les puits d'appoint (c'est à dire les nouveaux puits destinés à remplacer les puits défaillants ou à restaurer la capacité de production ou d'injection perdue), se situaient entre 152 et 187 dollars É.-U.$_{2005}$/kW$_{él}$/an, mais qu'ils pouvaient être nettement plus faibles dans certains pays (par ex. 83 à 117 dollars É.-U.$_{2005}$/kW$_{él}$/an en Nouvelle Zélande). [4.7.2]

La longévité des centrales et le coefficient d'utilisation de la capacité sont également des paramètres économiques importants. En 2008, le coefficient mondial moyen d'utilisation de la capacité des centrales géothermiques était de 74,5 % pour les centrales existantes et de plus de 90 % pour les installations récentes. [4.7.3]

D'après des calculs effectués selon une méthode normalisée décrite à l'annexe II et des données concernant les coûts et les performances résumées à l'annexe III, le coût moyen actualisé de l'énergie dans le cas des projets géothermiques de type hydrothermique, pour une large série et une vaste gamme de paramètres d'entrée, est compris entre 3,1 et 17 cents É.-U.$_{2005}$/kWh, selon le type de technologie employée et les conditions propres au projet. La figure TS.4.4 montre que, pour une série et une gamme plus restreintes de paramètres et selon un taux d'actualisation de 7 %, le coût moyen actualisé de l'énergie pour de nouveaux projets hydrothermiques récemment réalisés avec un coefficient moyen mondial d'utilisation de 74,5 % (et dans d'autres conditions spécifiées au paragraphe [4.7.4]) se situe entre 4,9 et 7,2 cents É.-U.$_{2005}$/kWh pour les centrales à condensation de type flash et entre 5,3 et 9,2 cents É.-U.$_{2005}$/kWh pour les centrales à cycle binaire. Ce coût moyen actualisé de l'énergie varie sensiblement en fonction du coefficient d'utilisation, du coût d'investissement et du taux d'actualisation. Il n'existe aucune donnée sur le coût moyen actualisé de l'énergie pour les systèmes géothermiques améliorés, mais des projections ont été faites à partir de différents modèles pour plusieurs cas correspondant à des températures et à des profondeurs différentes, par exemple 10 à 17,5 cents É.-U.$_{2005}$/kWh pour des ressources émanant de systèmes géothermiques améliorés de qualité relativement élevée. [1.3.2, 4.7.4, 10.5.1, annexe II, annexe III]

Les estimations concernant les réductions de coût que peuvent amener les changements de conception et les progrès techniques reposent uniquement sur l'expertise des spécialistes de la chaîne de valeur du processus géothermique, étant donné qu'il existe peu d'études publiées de la courbe d'apprentissage. Les perfectionnements techniques concernant la conception et la stimulation des réservoirs géothermiques et les améliorations portant sur les matériaux, l'exploitation et la maintenance sont les éléments qui devraient avoir le plus d'incidences sur le coût moyen actualisé de l'énergie à court terme, en contribuant notamment à améliorer les coefficients d'utilisation de la capacité et à diminuer la part des coûts de forage dans les coûts d'investissement. Pour les nouveaux projets à l'horizon 2020, les projections concernant le coût moyen mondial actualisé de

Tableau TS.4.2 | Coûts d'investissement et coût moyen actualisé de l'énergie thermique pour diverses applications directes de la géothermie. [Tableau 4.8]

Application thermique	Coût d'investissement (dollars É.-U.$_{2005}$/kWth)	Coût moyen actualisé de l'énergie thermique (dollars É.-U.$_{2005}$/GJ) pour un taux d'actualisation de:		
		3%	7%	10%
Chauffage de locaux (bâtiments)	1 600–3 940	20–50	24–65	28–77
Chauffage de locaux (urbain)	570–1 570	12–24	14–31	15–38
Serres	500–1 000	7,7–13	8,6–14	9,3–16
Bassins aquacoles découverts	50–100	8,5–11	8,6–12	8,6–12
Pompes à chaleur géothermique (résidentiel et commercial)	940–3 750	14–42	17–56	19–68

Tableau TS.4.3 | Capacité installée actuelle et prévue au niveau régional pour ce qui concerne la production d'énergie géothermique, les utilisations directes de la géothermie (chaleur) et la production d'électricité et de chaleur prévues pour 2015. [Tableau 4.9]

RÉGION[1]	Capacité actuelle (2010)		Capacité prévue (2015)		Production prévue (2015)	
	Directe (GW_{th})	Électricité ($GW_{él}$)	Directe (GW_{th})	Électricité ($GW_{él}$)	Directe (TW_{th})	Électricité ($TWh_{él}$)
Amérique du Nord OCDE	13,9	4,1	27,5	6,5	72,3	43,1
Amérique latine	0,8	0,5	1,1	1,1	2,9	7,2
Europe OCDE	20,4	1,6	32,8	2,1	86,1	13,9
Afrique	0,1	0,2	2,2	0,6	5,8	3,8
Économies en transition	1,1	0,1	1,6	0,2	4,3	1,3
Moyen-Orient	2,4	0	2,8	0	7,3	0
Asie en développement	9,2	3,2	14,0	6,1	36,7	40,4
Pacifique OCDE	2,8	1,2	3,3	1,8	8,7	11,9
TOTAL	**50,6**	**10,7**	**85,2**	**18,5**	**224,0**	**121,6**

Notes: *Pour la définition des régions et des groupements de pays, voir l'annexe II. Le taux de croissance annuel moyen estimé pour la période 2010-2015 est de 11,5 % pour l'électricité et de 11 % pour les utilisations directes. Les hypothèses pour 2015 concernant les coefficients d'utilisation de la capacité en moyenne mondiale sont de 75 % pour l'électricité et de 30 % pour l'utilisation directe.

Tableau TS.4.4 | Mise en valeur potentielle de l'énergie géothermique pour la production d'électricité et les utilisations directes de 2020 à 2050.[Tableau 4.10]

Année	Utilisation	Capacité[1] (GW)	Production (TWh/an)	Production (EJ/an)	Total (EJ/an)
2020	Électricité	25,9	181,8	0,65	2,01
	Directe	143,6	377,5	1,36	
2030	Électricité	51,0	380,0	1,37	5,23
	Directe	407,8	1 071,7	3,86	
2050	Électricité	150,0	1 182,8	4,26	11,83
	Directe	800,0	2 102,3	7,57	

Notes: *Les capacités installées en 2020 et 2030 sont extrapolées à partir des estimations pour 2015 en supposant un taux de croissance annuel de 7 % pour l'électricité et de 11 % pour les utilisations directes. À l'horizon 2050, elles représentent la valeur centrale entre les projections citées au chapitre 4. La production a été estimée pour des coefficients moyens mondiaux d'utilisation de la capacité de 80 % (2020), 85 % (2030) et 90 % (2050) pour l'électricité et de 30 % pour les utilisations directes.

l'énergie donnent une fourchette comprise entre 4,5 et 6,6 cents É.-U.$_{2005}$/kWh pour les centrales à condensation de type flash et entre 4,9 et 8,6 cents É.-U.$_{2005}$/kWh pour les différentes gammes de centrales à cycle binaire, avec un coefficient d'utilisation moyen mondial de 80 %, une durée de vie de 27,5 ans et un taux d'actualisation de 7 %. La réduction du coût moyen mondial actualisé de l'énergie devrait donc être d'environ 7 % pour les centrales géothermiques de type flash et les centrales à cycle binaire d'ici 2020. Le coût des systèmes géothermiques améliorés devrait également baisser à l'avenir. [4.7.5]

Pour les projets d'utilisation directe, le coût moyen actualisé de l'énergie thermique se situe dans une large fourchette, selon l'utilisation considérée, la température, le débit nécessaire, les frais d'exploitation et de maintenance et les coûts salariaux associés et le rendement du produit fourni. Par ailleurs, le coût des constructions nouvelles est habituellement inférieur au coût de remise en état de structures plus anciennes. Les montants figurant au tableau TS.4.2 sont fondés sur un climat type de la moitié nord des États-Unis d'Amérique ou de l'Europe. Les charges de chauffage seraient plus élevées pour des climats plus septentrionaux tels que ceux de l'Islande, de la Scandinavie et de la Russie. La plupart des chiffres sont fondés sur les coûts aux États-Unis d'Amérique, mais seraient similaires dans les pays développés et inférieurs dans les pays en développement. [4.7.6]

Les applications industrielles sont plus difficiles à quantifier, car elles varient fortement selon les besoins en énergie et le produit à fournir. Ces centrales requièrent habituellement des températures plus élevées et sont souvent en concurrence avec l'utilisation de centrales électriques; elles ont néanmoins un coefficient d'utilisation élevé, compris entre 0,40 et 0,70, qui en améliore

l'économie. Les applications industrielles vont de grosses usines de séchage de produits alimentaires, de bois d'œuvre et de minerais (États-Unis d'Amérique et Nouvelle-Zélande) à des usines de pâtes et papiers (Nouvelle-Zélande). [4.7.6]

4.8 Potentiel de mise en valeur

L'énergie géothermique peut contribuer à une réduction à court et à long terme des émissions de carbone. En 2008, l'utilisation mondiale de la géothermie n'a représenté que 0,1 % environ de l'approvisionnement mondial en énergie primaire. Néanmoins, d'ici 2050, la géothermie pourrait correspondre à 3 % environ de la demande mondiale d'électricité et à 5 % de la demande mondiale de chauffage et de refroidissement. [4.8]

Si l'on tient compte des projets d'électricité géothermique en cours de réalisation ou prévus dans le monde, la capacité géothermique installée devrait atteindre 18,5 $GW_{él}$ d'ici 2015. La presque totalité des nouvelles centrales mises en route d'ici 2015 seront des centrales à condensation de type flash ou des centrales à cycle binaire faisant appel à des ressources hydrothermiques, avec une modeste contribution de projets de systèmes géothermiques améliorés. Les utilisations directes de la géothermie (applications pour la production de chaleur, y compris les pompes à chaleur géothermique) devraient se développer au même taux de croissance annuelle que par le passé (11 % de 1975 à 2010) pour atteindre 85,2 GW_{th}. D'ici 2015, la production totale d'électricité pourrait atteindre 121,6 TWh/an (0,44 EJ/an) et la production directe de chaleur, 224 TWh_{th}/an (0,8 EJ/an), avec une répartition par région présentée au tableau TS.4.3. [4.8.1]

Le potentiel de mise en valeur de l'énergie géothermique à long terme, établi à partir d'une évaluation approfondie de nombreux scénarios basés sur des modèles, est présenté dans le chapitre 10 du présent résumé et couvre un large éventail. Les médianes des scénarios pour trois fourchettes de stabilisation de la concentration de GES, fondées sur les niveaux de concentration de CO_2 du quatrième Rapport d'évaluation (niveaux de référence: > 600 ppm; catégories III et IV: 440 à 600 ppm; catégories I et II: < 440 ppm), vont de 0,39 à 0,71 EJ/an pour 2020, de 0,22 à 1,28 EJ/an pour 2030 et de 1,16 à 3,85 EJ/an pour 2050.

La politique relative au carbone sera probablement l'un des principaux facteurs déterminants pour le développement de la géothermie à l'avenir et, selon la stratégie la plus favorable en matière de stabilisation de la concentration des GES (< 440 ppm), la mise en valeur de la géothermie pourrait être nettement supérieure aux valeurs médianes indiquées ci-dessus à l'horizon 2020, 2030 et 2050. Si l'on projette le taux de croissance annuel moyen observé jusqu'ici des centrales géothermiques (7 %) et des utilisations directes de la géothermie (11 %) à partir des estimations pour 2015, la capacité géothermique installée en 2020 et 2030 pour l'électricité et les utilisations directes pourrait correspondre aux chiffres du tableau TS.4.4. D'ici 2050, la capacité de production d'électricité géothermique atteindrait 150 $GW_{él}$ (la moitié étant représentée par des centrales géothermiques améliorées), ce à quoi il conviendrait d'ajouter jusqu'à 800 GW_{th} supplémentaires émanant d'installations d'utilisation directe (tableau TS.4.4). [4.8.2]

Même les estimations les plus élevées concernant la contribution à long terme de l'énergie géothermique à l'approvisionnement mondial en énergie primaire (52,5 EJ/an d'ici 2050) se situent dans les fourchettes du potentiel technique (118 à 1 109 EJ/an pour l'électricité et 10 à 312 EJ/an pour les utilisations directes) et même dans la fourchette supérieure des ressources hydrothermiques (28,4 à 56,8 EJ/an). Le potentiel technique ne devrait donc pas faire obstacle à la réalisation de niveaux plus ambitieux de mise en valeur géothermique (électricité et utilisations directes), tout au moins sur une base mondiale. [4.8.2]

Selon certaines indications, l'approvisionnement en énergie géothermique pourrait correspondre à la fourchette haute des projections établies à partir de l'examen d'environ 120 scénarios énergétiques et de réduction des GES. Avec sa capacité naturelle de stockage thermique, la géothermie est particulièrement adaptée à l'approvisionnement en courant de base. Compte tenu de son potentiel technique et de sa mise en valeur possible, l'énergie géothermique, qui pourrait assurer environ 3 % de la demande mondiale d'électricité d'ici 2050, dispose également du potentiel nécessaire pour répondre à peu près à 5 % de la demande mondiale de chauffage et de refroidissement en 2050. [4.8.3]

5. L'énergie hydroélectrique

5.1 Introduction

L'énergie hydroélectrique est une énergie renouvelable où la puissance provient de l'énergie de l'eau qui se déplace d'un point haut à un point bas. Il s'agit d'une technique éprouvée, maîtrisée, prévisible et compétitive sur le plan des coûts. L'énergie mécanique de l'eau en mouvement est un outil ancien utilisé pour divers services depuis l'époque des Grecs, il y a plus de 2 000 ans. La première centrale hydroélectrique du monde, d'une puissance de 12,5 kW, a été mise en service le 30 septembre 1882 sur la Fox River, dans la centrale de Vulcan Street à Appleton, Wisconsin, aux États-Unis d'Amérique. Bien qu'actuellement le rôle principal de l'énergie hydroélectrique dans la production mondiale d'énergie soit de produire de l'électricité de façon centralisée, il existe aussi des centrales hydroélectriques isolées qui alimentent des réseaux indépendants, souvent dans des zones rurales ou reculées du monde. [5.1]

5.2 Potentiel des ressources

Le potentiel technique annuel mondial de production d'énergie hydroélectrique est de 14 576 TWh (52,47 EJ), et l'on évalue la capacité potentielle totale correspondante à 3 721 GW, soit quatre fois la capacité mondiale actuellement installée en matière d'hydroélectricité (figure TS.5.1). Cette capacité inexploitée va d'environ 47 % en Europe à quelque 92 % en Afrique, ce qui indique des possibilités vastes et bien réparties de développement de l'énergie hydroélectrique dans le monde entier (voir le tableau TS.5.1). L'Asie et l'Amérique latine ont les potentiels techniques les plus importants et les plus vastes ressources inexploitées. C'est en Afrique que la part inexploitée du potentiel total est la plus grande. [5.2.1]

Il est à noter que la capacité totale installée pour ce qui concerne l'énergie hydroélectrique est du même ordre de grandeur en Amérique du Nord, en Amérique latine, en Europe et en Asie et qu'elle est dix fois inférieure en Afrique (en raison du sous-développement du continent) et en Australasie/Océanie (en raison de la taille, du climat et de la topographie des pays). Le coefficient moyen mondial d'utilisation de

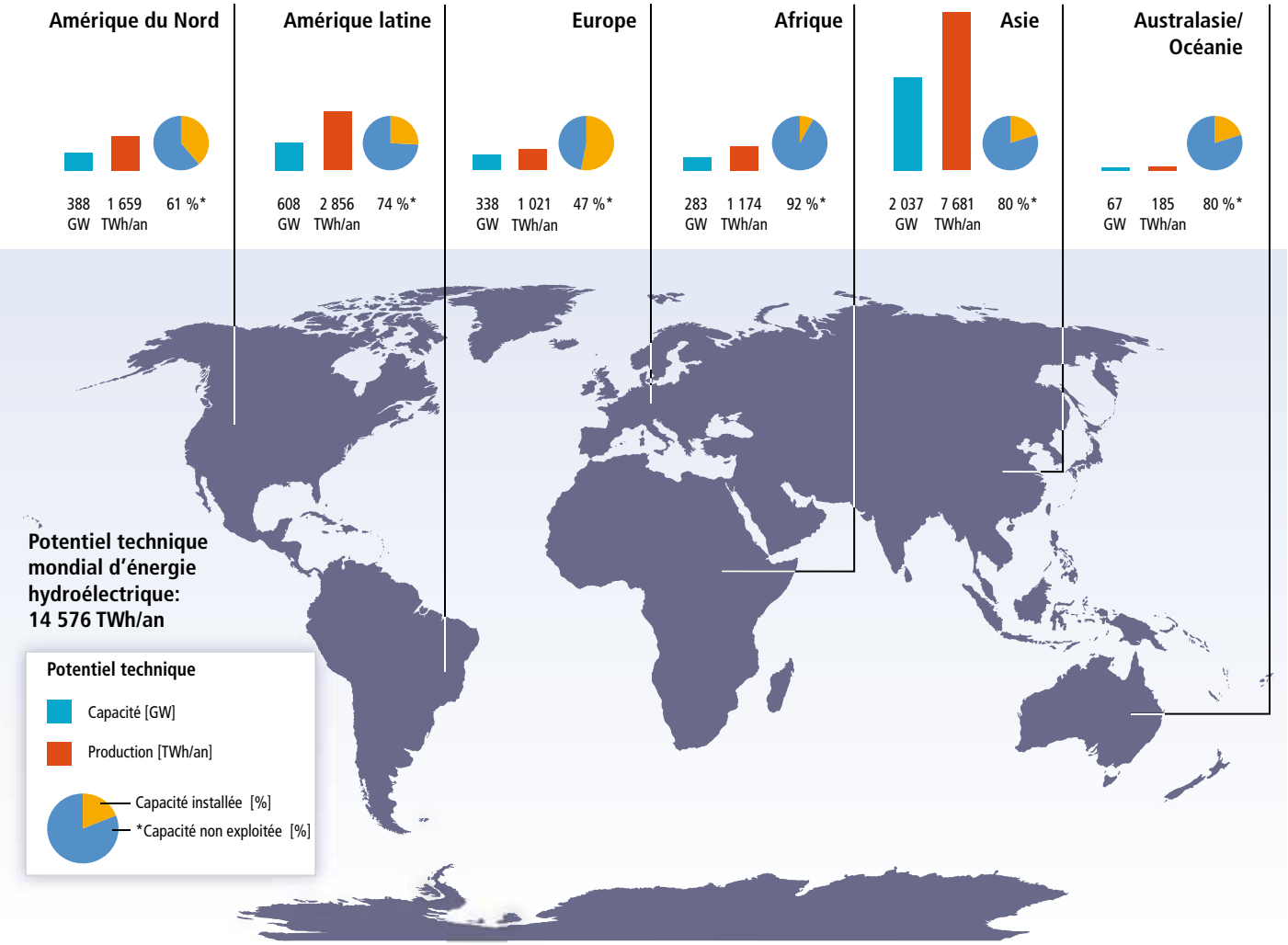


Figure TS.5.1 | Potentiel technique de l'énergie hydroélectrique au niveau régional par rapport à la production annuelle et à la capacité installée et potentiel technique inexploité en 2009. [Figure 5.2]

Tableau TS.5.1 | Potentiel technique régional de l'énergie hydroélectrique selon la production annuelle et la capacité installée (GW); production actuelle, capacité installée, coefficients moyens d'utilisation de la capacité et potentiel inexploité résultant en 2009. [Tableau 5.1]

Région	Potentiel technique, exprimé en production annuelle (TWh/an (EJ/an))	Potentiel technique, exprimé en capacité installée (GW)	Production totale en 2009 (TWh/an (EJ/an))	Capacité installée en 2009 (GW)	Potentiel inexploité (%)	Coefficient régional moyen d'utilisation (%)
Amérique du Nord	1 659 (5,971)	388	628 (2,261)	153	61	47
Amérique latine	2 856 (10,283)	608	732 (2,635)	156	74	54
Europe	1 021 (3,675)	338	542 (1,951)	179	47	35
Afrique	1 174 (4,226)	283	98 (0,351)	23	92	47
Asie	7 681 (27,651)	2 037	1 514 (5,451)	402	80	43
Australasie/Océanie	185 (0,666)	67	37 (0,134)	13	80	32
Monde	**14 576 (52,470)**	**3 721**	**3 551 (12,783)**	**926**	**75**	**44**

la capacité des centrales hydroélectriques est de 44 %. Ce coefficient peut indiquer la façon dont l'énergie hydroélectrique est employée dans le bouquet énergétique (par ex. pour une production de pointe ou pour une production de base) ou selon les disponibilités en eau, ou il peut permettre d'accroître la production grâce à l'amélioration de l'équipement et à une optimisation de l'exploitation. [5.2.1]

Le potentiel des ressources en énergie hydroélectrique pourrait changer en raison de l'évolution du climat. Selon un nombre limité d'études réalisées à ce jour, on s'attend à ce que les incidences de cette évolution sur les systèmes mondiaux existants de production d'énergie hydroélectrique ne soient que légèrement positives, même si un certain nombre de pays et de régions peuvent subir des variations positives ou négatives importantes des précipitations et de l'écoulement. D'ici 2050, selon le scénario A1B du SRES, la capacité annuelle de production d'énergie pourrait augmenter de 2,7 TWh (9,72 PJ) en Asie et diminuer de 0,8 TWh (2,88 PJ) en Europe. Dans les autres régions, les changements devraient être encore plus faibles. Sur le plan mondial, on estime que les changements subis par le système

actuel de production d'énergie hydroélectrique en raison de l'évolution du climat sont inférieurs à 0,1 %, bien qu'il soit nécessaire de procéder à de plus amples recherches pour réduire l'incertitude de ces projections. [5.2.2]

5.3 Technologie et applications

Les projets de production d'énergie hydroélectrique, généralement conçus pour répondre à des besoins particuliers et s'accommoder des particularités des sites, sont classés par type de projet, hauteur de chute (hauteur verticale de l'eau au-dessus de la turbine) ou objectif visé (un seul objectif ou plusieurs). Les catégories de taille (capacité installée), fondées sur des définitions nationales, diffèrent selon les pays en raison de la diversité des politiques appliquées. Il n'existe pas de rapport direct et immédiat entre la capacité installée en tant que critère de classement et les propriétés générales communes à toutes les centrales hydroélectriques, qu'elles soient au-dessus ou au-dessous de cette limite en matière de capacité installée. Dans l'ensemble, le classement selon la taille, à la fois commun et simple du point de vue administratif, est – dans une certaine mesure – arbitraire, des notions générales telles que la taille «petite» ou «grande» des centrales ne constituant pas des indicateurs techniques ou scientifiques rigoureux des incidences, des aspects économiques ou des caractéristiques des projets concernés. Il peut être plus opportun d'évaluer un projet hydroélectrique en fonction de sa viabilité ou de ses performances économiques en définissant pour ce faire des indicateurs plus réalistes. D'un point de vue environnemental et social, les incidences relatives cumulées des projets hydroélectriques de grande taille et de petite taille ne sont pas claires et dépendent du contexte. [5.3.1]

Il existe trois types principaux de centrales hydroélectriques: les centrales d'éclusées ou au fil de l'eau, les centrales à réservoir et les centrales à réserve pompée. Les centrales hydroélectriques d'éclusées ou au fil de l'eau disposent de petits bassins d'alimentation sans capacité de stockage. Dans ce cas, la production d'énergie suit le cycle hydrologique du bassin hydrographique, et la production varie en fonction des disponibilités en eau. Ces centrales peuvent donc être exploitées comme des centrales à production variable dans les petits cours d'eau ou comme des centrales de base dans les grands cours d'eau. Les grandes centrales hydroélectriques d'éclusées ou au fil de l'eau ont parfois une capacité limitée de régulation du débit d'eau et, si elles fonctionnent en cascades de concert avec des centrales à réservoir en amont, peuvent contribuer à la capacité globale de régulation et d'équilibrage d'une série de centrales. Une quatrième catégorie de centrales, dites «dans le courant» (ou hydrocinétiques), sont moins maîtrisées et fonctionnent comme des centrales au fil de l'eau sans régulation. [5.3.2]

Les centrales hydroélectriques à réservoir (ou à accumulation) fournissent une vaste gamme de services énergétiques tels que charge de base, charge de pointe et accumulation d'énergie et servent de régulateurs pour d'autres sources d'énergie. En outre, elles offrent souvent des services dans des secteurs autres que celui de l'énergie (lutte contre les inondations, alimentation en eau, navigation, tourisme, irrigation, etc.). Les centrales à réserve pompée accumulent de l'eau aux fins de production d'électricité. En faisant s'écouler l'eau en sens inverse, on peut produire de l'énergie électrique à la demande avec un délai de réaction très court. L'accumulation par pompage est actuellement la forme d'accumulation d'énergie sur réseau qui présente la plus grande capacité. [5.3.2.2–5.3.2.3]

Le transport de sédiments et la sédimentation dans les réservoirs sont des problèmes qu'il convient de bien comprendre, car ils ont des effets négatifs sur les performances des centrales hydroélectriques: réduction de la capacité d'accumulation des réservoirs avec le temps; augmentation de la dégradation en aval; augmentation des risques de crue en amont des réservoirs; pertes de production en raison de la réduction de l'efficacité des turbines; accroissement de la fréquence des travaux de réparation et d'entretien; réduction de la durée de vie des turbines et de la régularité de la production d'énergie. Le problème de la sédimentation peut être résolu tôt ou tard par des politiques d'occupation des sols appropriées et par la protection du couvert végétal. L'énergie hydroélectrique a le meilleur rendement de conversion de toutes les sources d'énergie connues (rendement d'environ 90 %, depuis l'eau jusqu'au réseau électrique) et un taux de récupération de l'énergie très élevé. [5.3.3]

Normalement, la durée de vie d'une centrale hydroélectrique est de 40 à 80 ans. Les éléments électriques et mécaniques et le matériel de contrôle s'usent vite par comparaison aux ouvrages de génie civil, en général au bout de 30 à 40 ans, après quoi ils doivent être rénovés. L'amélioration et la remise en état de ces centrales nécessitent une approche systématique, du fait qu'un certain nombre de facteurs (hydrauliques, mécaniques, électriques et économiques) jouent un rôle essentiel dans la détermination d'une ligne de conduite. Du point de vue techno-économique, une remise en état doit être envisagée parallèlement à des mesures de rénovation et de modernisation. Du matériel de production d'énergie hydroélectrique aux performances améliorées peut être remis à niveau, souvent pour répondre à la demande du marché en vue d'obtenir un mode de fonctionnement plus souple, adapté à une production de pointe. La plus grande partie des 926 GW d'équipement hydroélectrique actuel (2010) devra être modernisée d'ici 2030 ou 2040. La remise à neuf des centrales hydroélectriques existantes permet souvent d'accroître la capacité de production lorsque les turbines sont rénovées ou améliorées ou que l'infrastructure de génie civil existante (barrages, tunnels pour canaux, etc.) est remise en état pour accroître le nombre d'installations hydroélectriques. [5.3.4]

5.4 Situation mondiale et régionale du marché et développement de l'industrie

L'énergie hydroélectrique est une technologie maîtrisée, prévisible et compétitive sur le plan des prix. Actuellement, elle fournit environ 16 % de l'électricité totale du globe et 86 % de l'électricité provenant de sources renouvelables. Si elle contribue dans une certaines mesure à la production d'énergie dans 159 pays, cinq pays seulement représentent plus de la moitié de la production d'énergie hydroélectrique: la Chine, le Canada, le Brésil, les États-Unis d'Amérique et la Russie. Toutefois, l'importance de cette forme d'énergie dans l'ensemble de la production d'électricité de ces pays est très variable. Alors que le Brésil et le Canada dépendent largement de l'énergie hydroélectrique, qui représente respectivement 84 et 59 % de leur production totale d'électricité, en Russie et en Chine, elle ne représente que 19 et 16 % respectivement de cette production totale. Malgré l'accroissement substantiel de la production d'énergie hydroélectrique dans le monde entier, la part de cette production a diminué ces 35 dernières années (1973 à 2008), passant de 21 à 16 %, du fait que la distribution d'électricité et les autres sources de production se sont développées plus rapidement que l'énergie hydroélectrique. [5.4.1]

Les crédits d'émission de carbone favorisent les projets hydroélectriques en contribuant à en assurer le financement et à réduire les risques. Le financement est l'étape la plus décisive de l'ensemble du processus de développement d'un projet dans son ensemble. Les projets hydroélectriques figurent parmi ceux qui contribuent le plus aux mécanismes souples du Protocole de Kyoto et, par conséquent, aux marchés actuels des crédits d'émission de carbone. Sur les 2 062 projets enregistrés auprès du Conseil exécutif du Mécanisme de développement propre au 1er mars 2010, 562 sont des projets hydroélectriques. Avec 27 % du nombre total de projets, l'énergie hydroélectrique est la principale source d'ÉR mise en place selon le Mécanisme. La Chine, l'Inde, le Brésil et le Mexique totalisent 75 % environ des projets acceptés. [5.4.3.1]

De nombreux projets hydroélectriques économiques sont remis en cause sur le plan financier. Les mises de fonds initiales élevées dissuadent les investisseurs. En outre, les projets hydroélectriques nécessitent souvent de longs délais en matière de planification, d'autorisation et de construction. Lors de l'évaluation des coûts sur l'ensemble du cycle de vie, les projets hydroélectriques affichent souvent d'excellentes performances, les coûts annuels d'exploitation et de maintenance ne représentant qu'une fraction des capitaux investis. Comme l'énergie hydroélectrique et son industrie sont depuis longtemps maîtrisées, on prévoit que cette industrie va pouvoir répondre à la demande qui résultera du taux de mise en valeur prévu pour les années à venir. En 2008, par exemple, l'industrie hydroélectrique a installé, sur le plan mondial, plus de 41 GW de capacité nouvelle. [5.4.3.2]

La mise au point de modèles de financement plus appropriés est un défi majeur pour le secteur hydroélectrique, de même que la définition d'un rôle optimal pour le secteur public et le secteur privé. Les principaux problèmes du secteur hydroélectrique sont l'obtention de la confiance du secteur privé et la réduction des risques, surtout avant l'autorisation des projets. Les marchés verts et l'échange de droits d'émission vont sans doute servir d'incitations. En outre, dans des régions en développement telles que l'Afrique, l'interconnexion des différents pays et la constitution de réseaux d'énergie donnent confiance aux investisseurs de ces marchés émergents. [5.4.3.2]

Le classement des centrales hydroélectriques en «petites» et en «grandes» centrales selon la capacité installée (MW) peut faire obstacle au développement de l'énergie hydroélectrique. Par exemple, ce classement peut avoir des répercussions sur le financement des nouvelles centrales hydroélectriques et déterminer la place de l'énergie hydroélectrique dans les politiques relatives au changement climatique et à l'énergie. Diverses mesures incitatives sont utilisées pour les projets hydroélectriques à petite échelle (tarifs de distribution, certificats verts et bonus) selon les pays, mais il n'existe pas de mesures de ce type pour les projets à grande échelle. Une directive de l'Union européenne fixe à 20 MW la limite des crédits d'émission de carbone issus des centrales hydroélectriques. La même limite est fixée dans la Renewables Obligation du Royaume-Uni, un mécanisme de certificats verts fondé sur le marché. De même, dans plusieurs pays, les tarifs de distribution ne s'appliquent pas à l'énergie hydroélectrique au-dessus d'une certaine limite de taille des centrales (par ex. 12 MW en France, 5 MW en l'Allemagne et 5 et 25 MW en Inde). [5.4.3.4]

Le Conseil exécutif du Mécanisme de développement propre de la CCNUCC a décidé que les projets hydroélectriques à réservoir devraient être conformes à l'indice de densité de puissance (capacité installée/superficie du réservoir en W/m^2) pour avoir droit aux crédits accordés au titre du Mécanisme. Actuellement, selon la règle relative à cet indice, il semble exclu que ces centrales à réservoir puissent bénéficier des crédits en question (ou des crédits accordés au titre de la Mise en œuvre conjointe), ce qui risque de conduire à un développement insuffisant des ressources hydroélectriques, l'option des centrales d'éclusées ou au fil de l'eau sans accumulation étant alors favorisée.

5.5 Intégration dans des systèmes énergétiques plus vastes

La capacité très diverse des centrales hydroélectriques, leur souplesse, leur capacité d'accumulation (lorsqu'elles disposent d'un réservoir) et leur aptitude à fonctionner de façon autonome ou au sein de réseaux de toutes tailles leur permettent de fournir une vaste gamme de services. [5.5]

L'énergie hydroélectrique peut être distribuée par un réseau national ou régional, par des mini-réseaux et aussi de façon isolée. On se rend de plus en plus compte dans les pays en développement que les projets hydroélectriques à petite échelle ont un rôle important à jouer dans le développement socioéconomique des zones rurales reculées, surtout lorsqu'elles sont accidentées, car ces projets peuvent fournir de l'énergie à usage industriel, agricole et domestique. En Chine, les centrales hydroélectriques à petite échelle sont l'un des exemples les plus positifs d'électrification rurale: plus de 300 millions de personnes tirent profit de plus de 45 000 petites centrales d'une capacité cumulée de plus de 55 000 MW, qui produisent annuellement 160 TWh (576 PJ) d'électricité. [5.5.2]

Lorsqu'elles disposent de très grands réservoirs par rapport à leur taille (ou de débits fluviaux très importants), les centrales hydroélectriques peuvent produire de l'énergie à un niveau quasi constant pendant toute l'année (en fonctionnant en tant que centrales de base). Sinon, si la capacité hydroélectrique est nettement supérieure à la capacité d'accumulation des réservoirs, on dit parfois des centrales qu'elles sont «énergétiquement limitées». Une telle centrale épuiserait ses «réserves de carburant» en fonctionnant constamment à sa capacité nominale. Dans ce cas, grâce à l'accumulation d'eau dans un réservoir, l'énergie hydroélectrique peut être produite aux moments les plus opportuns du point de vue du système énergétique plutôt qu'à des moments imposés uniquement par le débit du cours d'eau. Comme la demande d'électricité varie pendant la journée et la nuit, durant la semaine et selon la saison, la production d'énergie hydroélectrique avec accumulation peut être prévue pour coïncider avec les moments où les besoins en énergie sont les plus importants. Ces moments se produisent en partie pendant les périodes de pointe de la demande d'électricité. L'exploitation des centrales hydroélectriques de façon à produire de l'électricité aux moments de forte demande est qualifiée d'exploitation en période de pointe (par opposition à l'exploitation de base). Toutefois, même en cas d'accumulation, la production d'énergie hydroélectrique reste limitée par la taille du réservoir, la capacité électrique nominale de la centrale et les contraintes en matière de débit en aval aux fins d'irrigation, de loisirs ou d'usages environnementaux. Si l'eau s'évacue vers un cours d'eau, l'exploitation en période de pointe peut conduire à des fluctuations rapides du débit, de la surface submergée, de la profondeur et de la vitesse, ce qui peut entraîner des incidences négatives pour le cours d'eau, selon les conditions locales, à moins qu'il ne soit géré correctement. [5.5.3]

Outre que l'énergie hydroélectrique complète les technologies de production d'énergie fossile et nucléaire, elle peut aussi contribuer à résoudre des problèmes liés à l'intégration des ressources renouvelables variables. Au Danemark, par

exemple, le niveau élevé de l'énergie éolienne variable (> 20 % de la demande annuelle d'énergie) est géré en partie grâce à des interconnexions importantes (1 GW) avec la Norvège, qui dispose de nombreuses centrales hydroélectriques à réservoir. D'autres interconnexions avec l'Europe peuvent également favoriser une augmentation de la part de l'énergie éolienne au Danemark et en Allemagne. L'augmentation de la production variable d'énergie va accroître l'importance des services de stabilisation, y compris la régulation et la charge qui s'ensuivent, nécessaires au système énergétique. Dans les régions qui disposent d'installations hydroélectriques nouvelles et anciennes, la prestation de services hydroélectriques peut éviter de recourir à une charge partielle accrue et à l'appoint de centrales thermiques classiques pour fournir ces services. [5.5.4]

Bien que l'hydroélectricité ait le potentiel d'offrir d'importants services d'alimentation électrique outre l'énergie et la capacité, l'interconnexion et la fiabilité d'utilisation des centrales hydroélectriques peuvent aussi exiger que des modifications soient apportées aux réseaux électriques. L'interconnexion des centrales avec le réseau électrique exige une capacité adéquate de transport depuis les centrales jusqu'aux centres de demande. Par le passé, pour créer de nouvelles centrales hydroélectriques, il a fallu investir dans le réseau de transport en vue de le renforcer. Faute d'une capacité de transport appropriée, l'exploitation des centrales hydroélectriques risque d'être limitée de telle façon que les services offerts seront inférieurs à ce qu'ils pourraient être dans le cas d'un système sans contraintes. [5.5.5]

5.6 Incidences écologiques et sociales

Comme tous les projets de gestion des ressources énergétiques et des ressources en eau, les projets hydroélectriques ont des incidences environnementales et sociales négatives et positives. S'agissant de l'environnement, l'hydroélectricité peut laisser une empreinte aux niveaux local et régional tout en offrant des avantages au niveau macroécologique. Du point de vue social, les projets hydroélectriques peuvent notamment donner lieu au déplacement des populations vivant à l'endroit ou à proximité du réservoir ou du chantier, à des mesures de dédommagement des populations en aval et à des problèmes de santé publique. Cependant, un projet hydroélectrique bien conçu peut être un moteur du développement socioéconomique, bien qu'il reste essentiel de déterminer la façon dont ces avantages peuvent être répartis. [5.6]

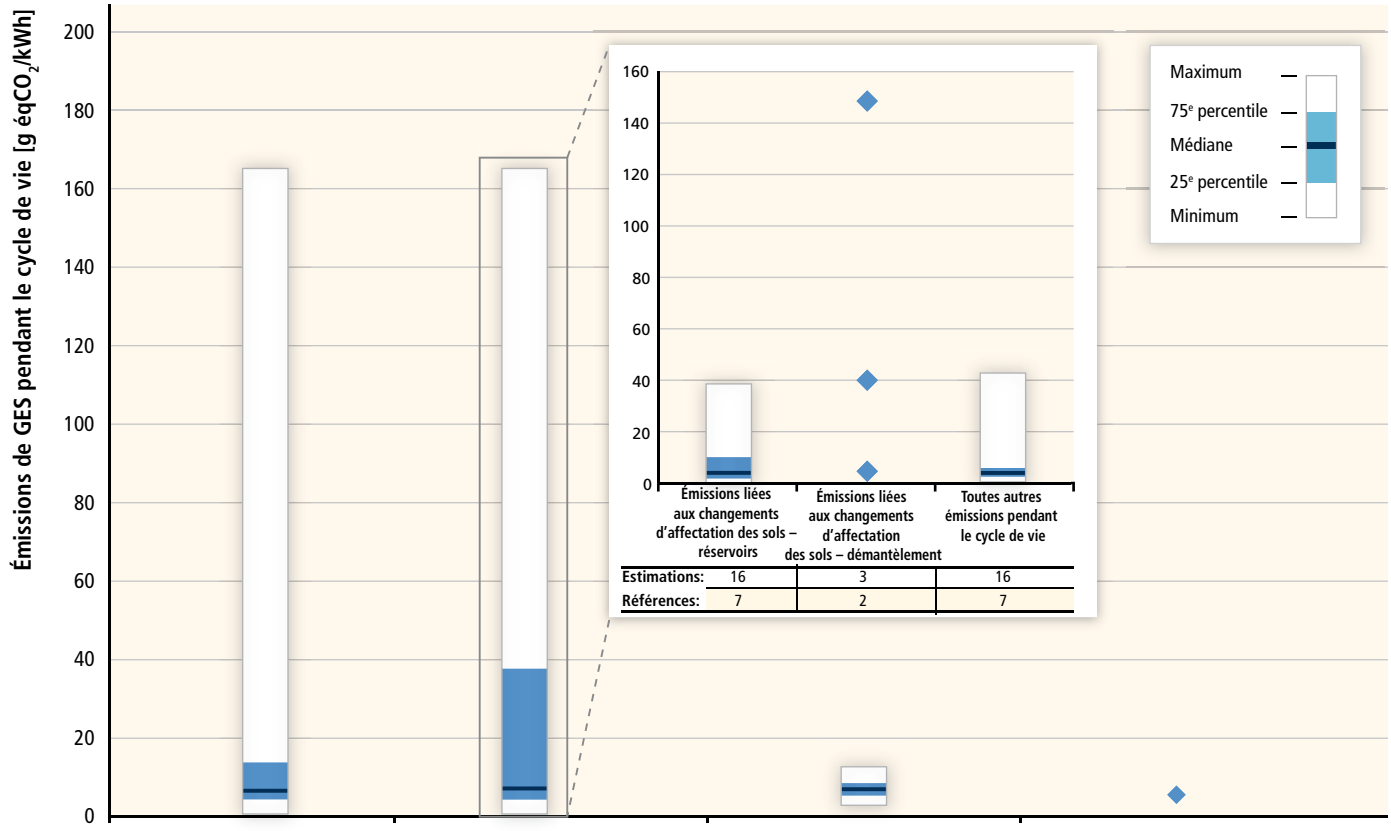
Toutes les structures hydroélectriques influent sur l'écologie des cours d'eau, surtout en entraînant des modifications de leurs caractéristiques hydrologiques et en perturbant la continuité écologique du transport de sédiments et de la migration des poissons du fait de la construction de barrages et de digues. Cependant, la mesure dans laquelle les caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et écosystémiques d'un cours d'eau sont modifiées dépend largement du type de centrale hydroélectrique. Alors que les centrales d'éclusées ou au fil de l'eau n'altèrent pas le régime d'écoulement des cours d'eau, la création d'un réservoir d'accumulation entraîne un changement environnemental majeur en transformant un cours d'eau à débit rapide en lac artificiel immobile. [5.6.1.1–5.6.1.6]

Tout comme les conséquences écologiques des projets hydroélectriques, l'importance de leurs incidences sociales sur les collectivités locales et régionales, l'occupation des sols, l'économie, la santé et la sécurité ou le patrimoine varie selon le type de projet et les conditions propres au site. Alors que les centrales d'éclusées ou au fil de l'eau entraînent généralement peu de bouleversements sociaux, la création d'un réservoir dans une zone densément peuplée peut engendrer des problèmes importants en matière de réinstallation et avoir des incidences sur les moyens de subsistance des populations situées en aval. La restauration et l'amélioration du niveau de vie des collectivités touchées est une tâche longue et difficile qui a été gérée avec un succès mitigé par le passé. Le fait de savoir si les centrales hydroélectriques peuvent contribuer à favoriser le développement socioéconomique dépend largement de la façon dont les services et les revenus obtenus sont partagés et répartis entre les divers acteurs. Ces centrales peuvent avoir des effets positifs sur les conditions de vie des collectivités locales et sur l'activité économique régionale, non seulement en produisant de l'électricité, mais aussi en facilitant, grâce à la mise en place de systèmes d'accumulation d'eau douce, de nombreuses autres activités dépendant de l'eau telles que l'irrigation, la navigation, le tourisme, la pêche et l'alimentation en eau des municipalités et des industries, tout en assurant une protection contre les inondations et les sécheresses. [5.6.1.7–5.6.1.11]

L'évaluation et la gestion des incidences environnementales et sociales des grandes centrales hydroélectriques, en particulier, constituent un défi majeur pour le développement de l'hydroélectricité. L'approche fondée sur la consultation des parties prenantes, qui met l'accent sur la transparence et sur un processus ouvert et participatif de prise de décision, oriente les projets hydroélectriques actuels et à venir vers des solutions de plus en plus écologiques et durables. Dans de nombreux pays, un cadre juridique et réglementaire national a été mis en place pour déterminer la façon dont les projets hydroélectriques doivent être conçus et mis en œuvre. De plus, de nombreux organismes multilatéraux de financement ont défini leurs propres directives et exigences pour évaluer les performances économiques, sociales et environnementales de ces projets. [5.6.2]

L'un des grands avantages environnementaux de l'hydroélectricité est qu'elle ne crée aucun polluant atmosphérique ni aucun déchet lié à la combustion de combustibles. Cependant, tous les systèmes faisant appel à de l'eau douce, qu'ils soient naturels ou anthropiques, émettent des GES (CO_2 et méthane, par ex.) en raison de la décomposition de matières organiques. Les analyses du cycle de vie réalisées dans le cadre de projets hydroélectriques ont démontré à ce jour qu'il est difficile de généraliser les estimations des émissions de GES pendant le cycle de vie propres à ces projets pour l'ensemble des conditions climatiques, des types de couvert végétal avant l'édification des barrages, des âges, des technologies hydroélectriques et autres circonstances propres aux projets. Du fait de la polyvalence de la plupart des projets hydroélectriques, il est difficile de déterminer la part de leurs incidences totales qui correspond à leurs divers objectifs. Actuellement, dans de nombreuses analyses du cycle de vie, on associe la totalité des conséquences des projets hydroélectriques à la fonction de production d'électricité, en surestimant dans certains cas les émissions dont ils sont «responsables». D'après les analyses du cycle de vie (figure TS.5.2) où l'on évalue les émissions de GES des centrales hydroélectriques pendant leurs phases de construction, d'exploitation, de maintenance et de démantèlement, la majorité des estimations des émissions de GES de l'hydroélectricité pendant le cycle de vie se situent entre 4 et 14 g éqCO_2/kWh; cependant, selon certains scénarios, il existe un risque d'émission de quantités nettement plus importantes de GES, comme le montrent les observations aberrantes. [5.6.3.1]

Si certaines étendues d'eau naturelles et certains réservoirs d'eau douce peuvent absorber davantage de GES qu'ils n'en émettent, il est assurément nécessaire d'évaluer correctement l'évolution nette des émissions de GES produites par la création de tels réservoirs. Toutes les analyses du cycle de vie incluses dans ces



	Toutes valeurs	Réservoirs	Centrales d'éclusées	Accumulation par pompage
Estimations:	27	18	8	1
Références:	11	9	2	1

Figure TS.5.2 | Émissions de GES pendant le cycle de vie issues des technologies hydroélectriques (valeurs non modifiées trouvées dans la documentation disponible, après contrôle de la qualité). On trouvera à l'annexe I des détails sur les recherches effectuées dans la documentation et les citations de la documentation qui contribuent aux chiffres indiqués. Les émissions de surface des réservoirs sont considérées comme des émissions brutes de GES. [Figure 5.15]

évaluations se contentent d'estimer les émissions brutes de GES émanant des réservoirs. Que les réservoirs soient ou non des sources nettes d'émissions de GES, l'étude des émissions qui se seraient produites sans les réservoirs est un domaine de recherche active. Si l'on considère que les émissions anthropiques nettes correspondent, dans le cycle global du carbone, à la différence entre la présence et l'absence de réservoir, il n'existe actuellement pas de consensus sur le fait de savoir si les réservoirs sont des sources nettes ou des puits nets. Il existe à ce jour deux sources internationales d'étude de la question: le projet de recherche du Programme hydrologique international de l'UNESCO et l'Accord sur l'énergie hydroélectrique de l'AIE, annexe XII. [5.6.3.2]

5.7 Perspectives d'amélioration et d'innovation des technologies

Bien que l'hydroélectricité soit une technologie éprouvée et bien avancée, il existe toujours des possibilités d'amélioration, consistant par exemple à optimiser le fonctionnement, à atténuer les incidences sur l'environnement, à s'adapter aux nouvelles conditions sociales et environnementales et à mettre en œuvre des solutions techniques plus robustes et plus économiques. Les grandes turbines hydroélectriques sont proches, actuellement, de leur limite théorique de rendement, avec une efficacité pouvant atteindre 96 % lorsqu'elles fonctionnent à leur meilleur taux de rendement; mais cela n'est pas toujours possible, et il faut poursuivre les recherches afin d'obtenir un fonctionnement le plus efficace possible pour une plus large gamme de débits. Les turbines anciennes peuvent avoir une efficacité moindre du fait de leur conception ou des effets de la corrosion et de la cavitation. Il est donc possible d'accroître le rendement énergétique en procédant à une remise à niveau avec du nouveau matériel à haut rendement, en général complétée par une augmentation de la capacité. La plus grande partie du matériel électrique et mécanique actuellement en service devra être modernisé d'ici une trentaine d'années, ce qui devrait se traduire par un accroissement de l'efficacité, de la puissance et du rendement énergétique. En général, le matériel de production d'électricité peut être amélioré ou remplacé par du matériel électromécanique techniquement plus perfectionné deux ou trois fois pendant la durée de vie d'une installation, de manière à exploiter de façon plus efficace le même débit d'eau. [5.7]

Beaucoup d'innovations techniques et de recherches sur le matériel sont en cours en vue d'élargir la gamme opérationnelle en matière de hauteur de chute et de débit, mais aussi d'améliorer les performances environnementales et la fiabilité et de réduire les coûts. Certaines technologies prometteuses sont en cours de mise au point: technologies matricielles et à vitesse variable, turbines protégeant les poissons, turbines hydrocinétiques, turbines résistant à l'abrasion et nouvelles techniques d'aménagement des tunnels et d'édification des barrages. De nouvelles technologies visant à utiliser des hauteurs de chute faibles (< 15 m) ou très faibles

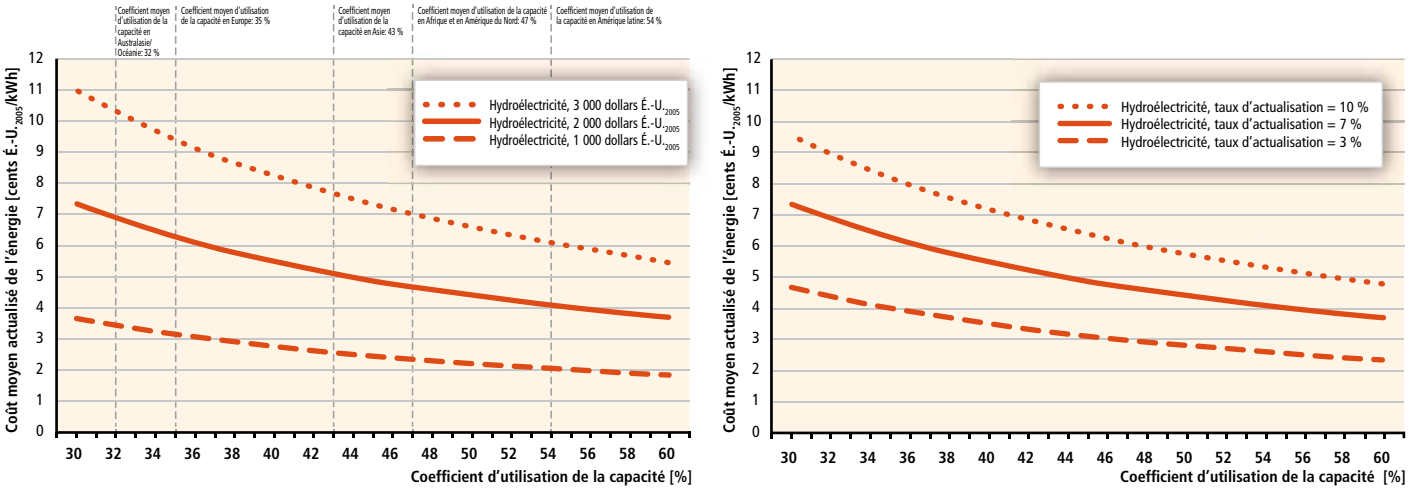


Figure TS.5.3 | Évaluation du coût moyen actualisé récent et à court terme de l'hydroélectricité a) en fonction du coefficient d'utilisation de la capacité et du coût d'investissement*, *** et b) en fonction du coefficient d'utilisation de la capacité et du taux d'actualisation**, ***. [Figure 5.20]

Notes: * Taux d'actualisation fixé à 7 %. ** Coût d'investissement fixé à 2 000 dollars É.-U./kW. *** Frais annuels d'exploitation et de maintenance fixés à 2,5 % du coût d'investissement, et durée de vie des centrales fixée à 60 ans.

(< 5 m) pourraient permettre d'exploiter de nombreux sites inexploitables par les techniques classiques. Comme la plupart des données disponibles à propos du potentiel de l'hydroélectricité sont fondées sur des études de terrain réalisées il y a plusieurs dizaines d'années, à une époque où les centrales hydroélectriques de basse chute ne constituaient pas vraiment une priorité, les données existantes sur le potentiel hydroélectrique de basse chute risquent d'être incomplètes. Enfin, il existe des possibilités importantes d'améliorer le fonctionnement des centrales hydroélectriques en employant de nouvelles méthodes qui en optimiseront l'exploitation. [5.7.1–5.7.8]

5.8 Tendances en matière de coûts

L'hydroélectricité est souvent compétitive sur le plan économique par rapport aux prix actuels de l'énergie sur le marché, bien que les coûts de conception, de mise en place et d'exploitation des nouveaux projets hydroélectriques varient d'un projet à l'autre. Les projets hydroélectriques exigent souvent un investissement initial important, mais ont l'avantage d'entraîner des frais d'exploitation et de maintenance limités et d'avoir une longue durée de vie. [5.8]

Les coûts d'investissement propres à l'hydroélectricité incluent les frais de planification, d'autorisation, de construction des centrales, d'atténuation des conséquences pour les poissons, la faune, la flore et les sites récréatifs, historiques et archéologiques et de contrôle de la qualité de l'eau. Globalement, il existe deux grandes catégories de coûts: les coûts de génie civil, qui sont normalement les coûts les plus importants des projets hydroélectriques, et le coût du matériel électromécanique. Les coûts de génie civil suivent l'évolution des prix dans le pays où le projet va être réalisé. Dans le cas des pays à économie en transition, ces coûts ont des chances d'être relativement faibles du fait de l'emploi d'une main-d'œuvre locale et de matériaux locaux. Le coût du matériel électromécanique suit l'évolution des prix sur le plan mondial. [5.8.1]

On a calculé, selon une méthode normalisée présentée dans l'annexe II et les données sur les coûts et les performances résumées dans l'annexe III, que le coût moyen actualisé de l'électricité ($CMA_{él}$) pour les projets hydroélectriques en fonction d'une vaste gamme de paramètres d'entrée se situait entre 1,1 et 15 cents É.-U.$_{2005}$/kWh, compte tenu des paramètres propres aux sites pour les coûts d'investissement de chaque projet et des hypothèses relatives au taux d'actualisation, au coefficient d'utilisation de la capacité, à la durée de vie et aux frais d'exploitation et de maintenance. [1.3.2, 5.8, 10.5.1, annexe II, annexe III]

La figure TS.5.3 présente le $CMA_{él}$ de projets hydroélectriques pour un ensemble quelque peu différent et plus caractéristique de paramètres correspondant à la majorité de ces projets, en fonction du coefficient d'utilisation de la capacité et en appliquant divers coûts d'investissement et taux d'actualisation.

Le coefficient d'utilisation est déterminé par les conditions hydrologiques, la capacité installée, la conception des centrales et la façon dont ces centrales sont exploitées. Pour les centrales hydroélectriques conçues pour une production maximale d'énergie (charge de base) et/ou avec une certaine régulation, le coefficient d'utilisation de la capacité est souvent de 30 à 60 %, le coefficient moyen pour diverses régions du monde étant indiqué dans le graphique. Pour les centrales hydroélectriques de pointe, le coefficient d'utilisation de la capacité peut être encore plus faible, alors que pour les centrales d'éclusées ou au fil de l'eau, il est très variable (20 à 95 %) selon les conditions géographiques et climatologiques, la technologie employée et les caractéristiques opérationnelles. Pour un coefficient moyen d'utilisation de 44 % et un coût d'investissement compris entre 1 000 et 3 000 dollars É.-U.$_{2005}$/kW, le $CMA_{él}$ varie de 2,5 à 7,5 cents É.-U.$_{2005}$/kWh.

Pour la plupart des projets qui seront réalisés dans un avenir proche (jusqu'en 2020), les coûts d'investissement et le $CMA_{él}$ devraient se situer dans cette fourchette, bien que le coût de certains projets puisse être plus faible ou plus élevé. Dans de bonnes conditions, le $CMA_{él}$ des projets hydroélectriques pourrait se situer entre 3 et 5 cents É.-U.$_{2005}$/kWh. [5.8.3, 8.2.1.2, annexe III]

La documentation existante nous donne relativement peu d'informations sur l'évolution des coûts de l'hydroélectricité. S'il en est ainsi – outre le fait que les coûts des projets dépendent largement des sites –, c'est notamment en raison du caractère complexe de la structure de coûts des centrales hydroélectriques, le coût de certains éléments ayant tendance à diminuer (par ex. le coût d'aménagement des tunnels) et celui d'autres éléments, à augmenter (par ex. le coût d'atténuation des effets sociaux et environnementaux). [5.8.4]

Un facteur qui complique les choses, lorsqu'on cherche à déterminer le coût de l'hydroélectricité, est le fait que, pour les réservoirs polyvalents, il est nécessaire de partager ou d'affecter le coût lié à d'autres usages de l'eau tels que l'irrigation, la lutte contre les inondations, la navigation, les routes, l'alimentation en eau potable, la pêche et les loisirs. Il existe diverses méthodes pour affecter ce coût à des objectifs particuliers, qui ont chacune des avantages et des inconvénients. Selon les règles de base, le coût affecté à un objectif donné ne doit pas être supérieur aux avantages de cet objectif, et chaque objectif doit être réalisé pour un coût distinct. On obtient le coût distinct d'un objectif en soustrayant le coût d'un projet polyvalent sans prendre en compte cet objectif du coût total du projet en en tenant compte. L'association d'éléments économiques (prix de vente de l'énergie et de l'eau) avec des avantages sociaux (fourniture d'eau aux agriculteurs en cas de pénurie d'eau) et la valeur de l'environnement (préservation d'un débit écologique minimal) devient un outil pour la prise en compte du partage des coûts dans le cas de réservoirs polyvalents. [5.8.5]

5.9 Potentiel de mise en valeur

L'hydroélectricité offre un potentiel important de réduction des émissions de carbone à court et à long terme. Sur le plan mondial, les ressources hydroélectriques sont peu susceptibles de limiter le développement à court et moyen terme, bien que des préoccupations d'ordre environnemental et social puissent limiter les possibilités de mise en valeur si elles ne sont pas gérées avec prudence. [5.9]

À ce jour, 25 % seulement du potentiel hydroélectrique est exploité à l'échelle du globe (3 551 TWh sur 14 575 TWh, soit 12,78 EJ sur 52,47 EJ). Les divers scénarios à long terme indiquent une augmentation continue pour les prochaines décennies. Selon plusieurs études, l'augmentation de la capacité hydroélectrique relevée au cours des 10 dernières années devrait se poursuivre à court et moyen terme, passant de 926 GW en 2009 à une valeur comprise entre 1 047 et 1 119 GW d'ici 2015, pour une croissance annuelle de 14 à 25 GW. [5.9, 5.9.1]

Les projections de référence présentées dans le chapitre 10 (fondées sur 164 scénarios à long terme analysés) indiquent le rôle de l'hydroélectricité dans l'approvisionnement mondial en énergie, qui couvre une vaste fourchette, avec une médiane d'environ 13 EJ (3 600 TWh) en 2020, 16 EJ (4 450 TWh) en 2030 et 19 EJ (5 300 TWh) en 2050. On a déjà atteint 12,78 EJ en 2009, et la projection de 13 EJ en moyenne en 2020 est sans doute déjà dépassée aujourd'hui. En outre, certains résultats de scénarios indiquent des valeurs plus faibles que la capacité actuelle installée pour 2020, 2030 et 2050, contrairement à ce qu'on pourrait penser compte tenu, par exemple, de la longue durée de vie des centrales hydroélectriques, de leur vaste potentiel de marché et d'autres services importants. Ces résultats pourraient peut-être s'expliquer par des insuffisances des modèles et des scénarios (voir la section 10.2.1.2 du présent rapport). On prévoit ainsi que l'hydroélectricité devrait se développer, même en l'absence de politiques d'atténuation des émissions de GES, même si la valeur médiane de la contribution de cette énergie à l'approvisionnement mondial en électricité passe de 16 % environ aujourd'hui à moins de 10 % à l'horizon 2050. Comme on suppose que les politiques d'atténuation des émissions de GES deviendront plus rigoureuses dans les autres scénarios, la contribution de l'hydroélectricité va augmenter: en 2030, sa contribution médiane est d'environ 16,5 EJ (4 600 TWh) pour des fourchettes de stabilisation du CO_2 à 440-600 ppm et < 440 ppm (par rapport à une valeur médiane de 15 EJ dans le cas des scénarios de référence) et passe à environ 19 EJ d'ici 2050 (par rapport à une valeur médiane de 18 EJ dans le cas des scénarios de référence). [5.9.2]

Des projections régionales quant à la production d'hydroélectricité en 2035 indiquent une augmentation de 98 % dans la région Asie-Pacifique par rapport aux valeurs de 2008 et de 104 % en Afrique. Le Brésil est le principal moteur de l'augmentation prévue de 46 % de la production d'hydroélectricité en Amérique du Sud et en Amérique centrale pour la même période. On s'attend, en Amérique du Nord et en Europe/Eurasie, à des augmentations plus modestes de 13 et 27 % respectivement, toujours sur cette même période. [5.9.2]

Globalement, il apparaît qu'un niveau relativement important de mise en valeur peut être atteint au cours des 20 années à venir. Même si la part de l'hydroélectricité dans l'approvisionnement mondial en électricité diminue d'ici 2050, l'hydroélectricité restera une source intéressante d'ÉR dans le contexte de scénarios mondiaux de réduction du carbone. En outre, un développement accru des centrales hydroélectriques à réservoir pourrait permettre d'investir dans des infrastructures de gestion des ressources en eau, nécessaires pour faire face aux problèmes croissants liés à ces ressources. [5.9.3]

5.10 Intégration dans des systèmes de gestion des ressources en eau

L'eau, l'énergie et le changement climatique sont inextricablement liés. Les ressources en eau sont essentielles pour de nombreuses technologies énergétiques, y compris l'hydroélectricité, et l'énergie est nécessaire pour assurer l'alimentation en eau de l'agriculture, des industries et des ménages, en particulier dans les régions des pays en développement où l'eau est rare. Ce rapport étroit a permis de comprendre que le lien entre l'eau et l'énergie doit être pris en compte de façon globale, en particulier dans les domaines de l'évolution du climat et du développement durable. Il faudra peut-être, pour produire de l'énergie et de l'eau aux fins d'un développement durable, améliorer la gouvernance de l'eau sur le plan régional et mondial. Comme l'hydroélectricité est souvent associée à l'aménagement d'installations d'accumulation d'eau, elle se trouve au centre de ces questions et peut jouer un rôle majeur d'amélioration de la sécurité énergétique et hydrique. [5.10]

Actuellement, 700 millions de personnes vivent dans des pays marqués par le stress hydrique et la pénurie d'eau. On prévoit qu'en 2035, trois milliards de personnes vivront dans des conditions de stress hydrique grave. De nombreux pays disposant de ressources en eau limitées dépendent du partage de ces ressources, ce qui accroît le risque de conflits. C'est pourquoi l'adaptation aux incidences du changement climatique va prendre une grande importance pour la gestion des ressources en eau. [5.10.1]

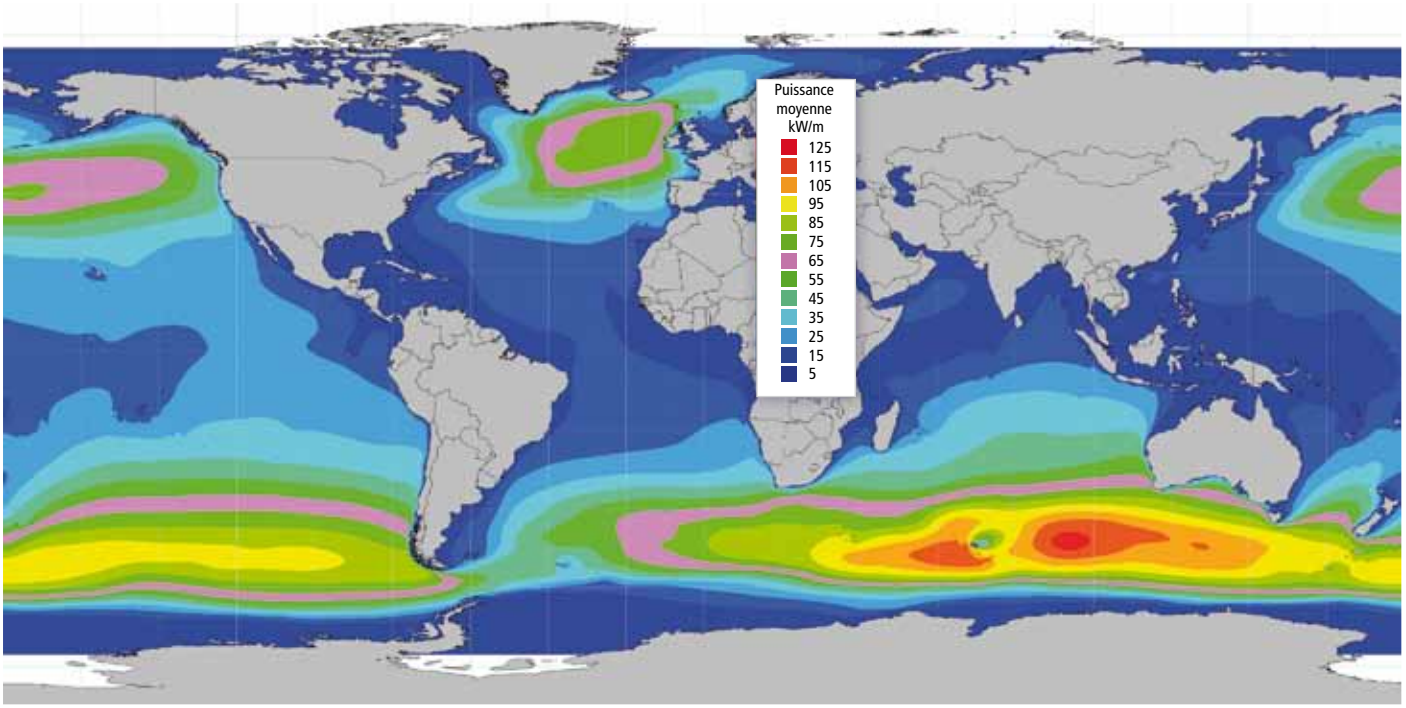
Dans un contexte où l'hydroélectricité à fins multiples peut être un outil permettant d'atténuer à la fois les incidences du changement climatique et les pénuries d'eau, les projets hydroélectriques peuvent avoir un rôle de facilitation au-delà du secteur de l'électricité en tant que moyens de financement pour les réservoirs, ce qui contribuerait à assurer l'accès à l'eau douce. Toutefois, des usages multiples peuvent accroître les risques de conflits et réduire la production d'énergie en période de basses eaux. Comme les grands bassins hydrographiques sont communs à plusieurs pays, une coopération régionale et internationale est indispensable. Des accords intergouvernementaux et des initiatives mises en œuvre par des organismes internationaux permettent de soutenir activement ces processus importants. [5.10.2, 5.10.3]

6. L'énergie marine

6.1 Introduction

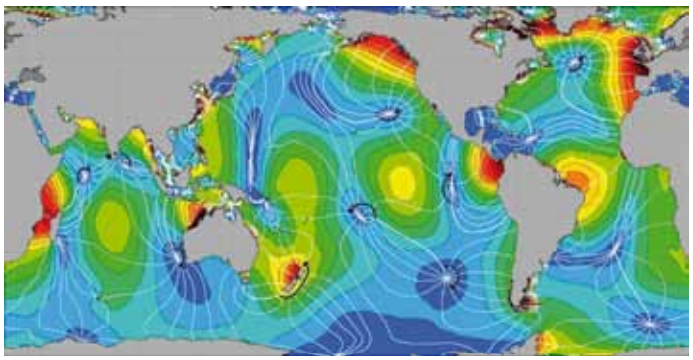
L'énergie marine offre la possibilité de réduire sur le long terme les émissions de carbone, mais il est peu probable que sa contribution dans ce domaine soit significative avant 2020, car les techniques correspondantes n'en sont encore qu'aux premiers stades de développement. Le potentiel théorique de 7 400 exajoules (EJ) par an des océans du globe dépasse de loin les besoins actuels en énergie de l'humanité, et les politiques publiques contribuent à accélérer le déploiement des technologies requises pour mettre en valeur cette forme d'énergie, ce qui laisse supposer que les progrès pourraient être plus rapides que prévu. Les six grandes familles de technologies relatives à l'énergie marine offrent un large éventail de possibilités en ce qui concerne les modes de développement, et l'impact environnemental de la plupart d'entre elles est potentiellement faible, en l'état actuel des connaissances. Des signes encourageants donnent à penser que le coût d'investissement de ces technologies et le coût moyen actualisé de l'électricité ainsi produite, actuellement non compétitifs, sont appelés à diminuer au fur et à mesure que progressera la recherche-développement et au gré des activités de démonstration et de mise en exploitation. La question de savoir si ces réductions de coûts seront suffisantes pour permettre une mise en valeur à grande échelle de l'énergie marine représente la principale incertitude lorsqu'il s'agit de déterminer la contribution future de cette forme d'énergie à l'atténuation du changement climatique. [6 ES, 6.1]

a)



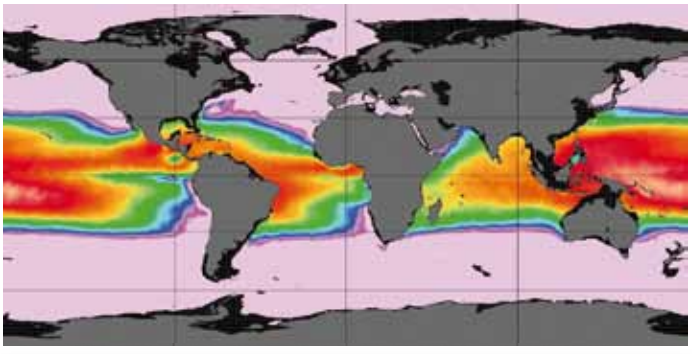
b)

GOT99.2 NASA/GSFC



c)

Ocean Data View



6/99

Figure TS.6.1a-c | Répartition dans le monde des diverses sources d'énergie marine: a) Énergie des vagues; b) Amplitude de marée; c) Énergie thermique des mers. [Figures 6.1, 6.2, 6.4, 6.3]

d)

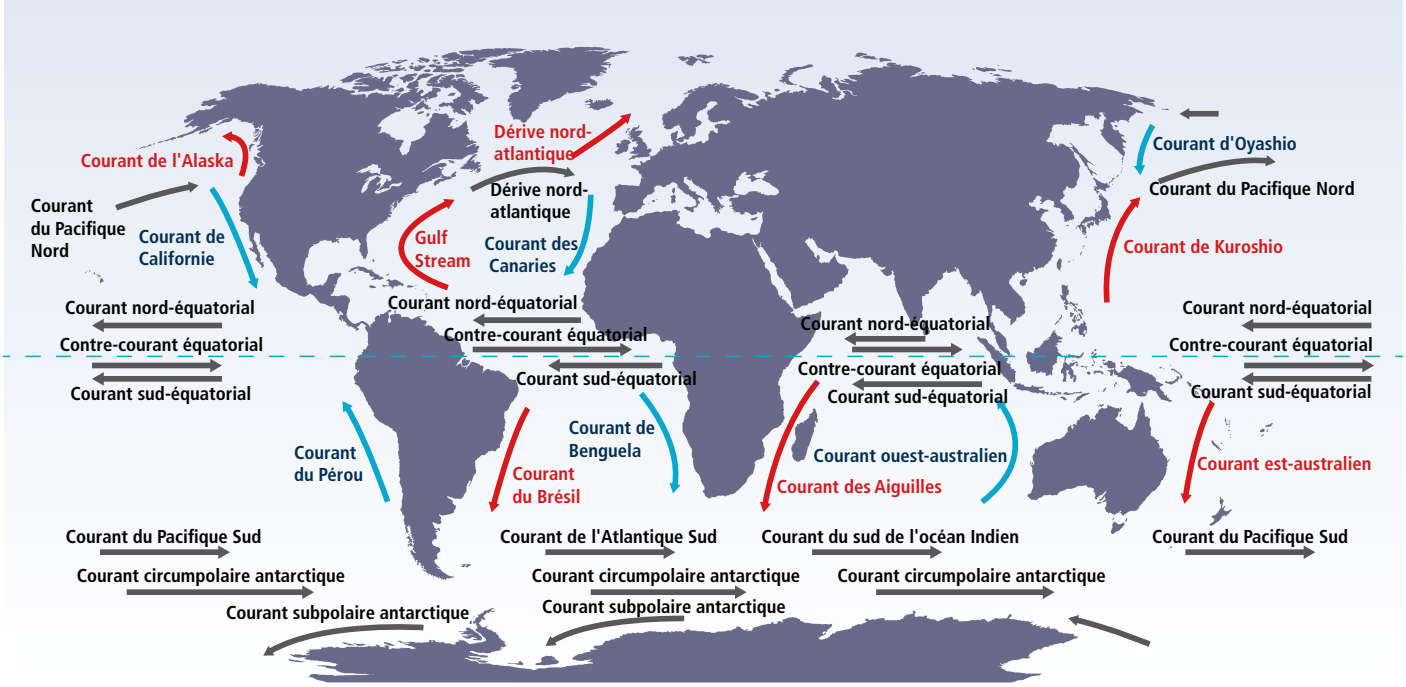


Figure TS.6.1d | Répartition dans le monde des diverses sources d'énergie marine: courants océaniques

6.2 Potentiel énergétique

On peut définir l'énergie marine comme l'énergie produite au moyen de technologies qui utilisent l'eau de mer comme force motrice ou qui mettent à profit son potentiel chimique ou thermique. Cette ressource énergétique renouvelable provient de six sources différentes, dont chacune a des origines diverses et nécessite des technologies de conversion spécifiques. Ces sources sont les suivantes:

Énergie des vagues: Elle découle du transfert de l'énergie cinétique du vent aux couches superficielles de l'océan. En théorie, l'énergie totale engendrée par les vagues est de 32 000 TWh/an (115 EJ/an), mais le potentiel technique devrait être bien inférieur et dépendra de la mise au point de technologies appropriées. [6.2.1]

Amplitude de marée (hauteur de la marée): Elle résulte de l'effet conjugué des forces de gravitation de la Terre, de la Lune et du Soleil. Le potentiel théorique de l'énergie marémotrice se situe dans une fourchette comprise entre 1 et 3 TW et concerne des eaux relativement peu profondes. Là aussi, le potentiel technique devrait être bien inférieur au potentiel théorique. [6.2.2]

Courants de marée: Ils résultent du flux et du reflux de la mer, causés par les marées, dans les zones côtières. Selon des estimations régionales, le potentiel technique actuel des courants de marée est de 48 TWh (0,17 EJ) par an en Europe et de 30 TWh (0,11 EJ) par an en Chine. Des sites potentiellement rentables ont été aussi repérés en République de Corée, au Canada, au Japon, aux Philippines, en Nouvelle-Zélande et en Amérique du Sud. [6.2.3]

Courants océaniques: Il s'agit de courants engendrés par le vent ou la circulation thermohaline. Le système de courants océaniques le plus connu est le Gulf Stream, en Amérique du Nord, où le courant de Floride a un potentiel technique de production d'électricité de 25 gigawatts (GW), mais il existe d'autres courants océaniques potentiellement prometteurs, tels que les courants de Mozambique et des Aiguilles au large de l'Afrique du Sud, le courant de Kuroshio au large de l'Asie orientale et le courant est-australien. [6.2.4]

Énergie thermique des mers (ETM): Elle résulte des différences de température entre les couches supérieures de l'océan, où l'énergie solaire est stockée sous forme de chaleur, et les eaux froides situées en général à plus de 1 000 m de profondeur. Bien que la densité énergétique de l'ETM soit relativement faible, son potentiel global est beaucoup plus important que celui des autres formes d'énergie marine. Selon une étude réalisée en 2007, on pourrait obtenir de la sorte environ 44 000 TWh (159 EJ) par an en électricité directement utilisable. [6.2.5].

Gradients de salinité (énergie osmotique): Cette forme d'énergie résulte des différences de salinité entre l'eau douce et l'eau de mer au voisinage des estuaires. Son potentiel théorique est estimé à 1 650 TWh (6 EJ) par an. [6.2.6]

La figure TS.6.1 montre comment se répartissent dans le monde diverses sources d'énergie marine. Certaines d'entre elles, comme les courants océaniques ou l'énergie résultant des gradients de salinité, sont réparties sur l'ensemble du globe. L'énergie thermique des océans se trouve essentiellement aux latitudes équatoriales et tropicales (0° à 35°), tandis qu'en moyenne annuelle, l'énergie des vagues est la plus élevée entre les 30ème et 60ème parallèles. Cette dernière est en outre soumise à de plus faibles variations saisonnières dans l'hémisphère Sud que dans l'hémisphère Nord. Les courants océaniques, l'énergie thermique des mers, les gradients de salinité et, dans une certaine mesure, l'énergie des vagues sont suffisamment constants pour fournir de l'électricité permettant d'assurer la charge de base. Comme la littérature disponible dans ce domaine est encore peu abondante et que les incertitudes afférentes au potentiel technique de l'énergie marine sont considérables, les estimations concernant ce potentiel sont extrêmement variables. [6.2.1-6.2.6]

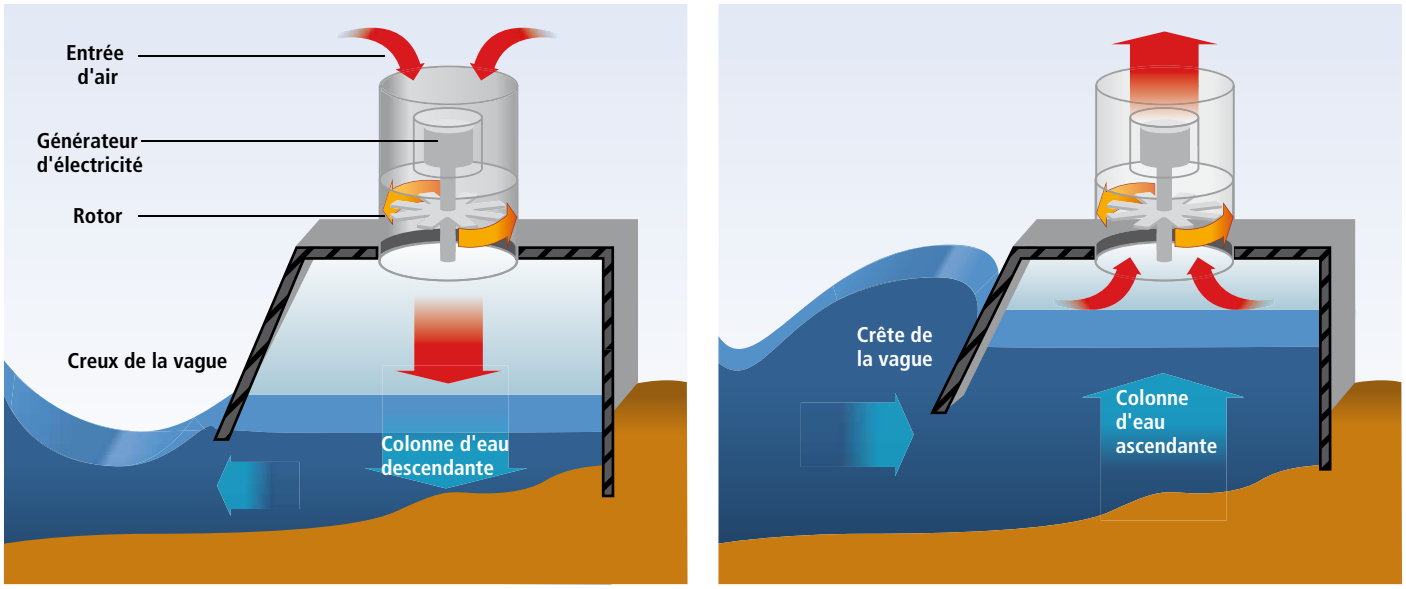
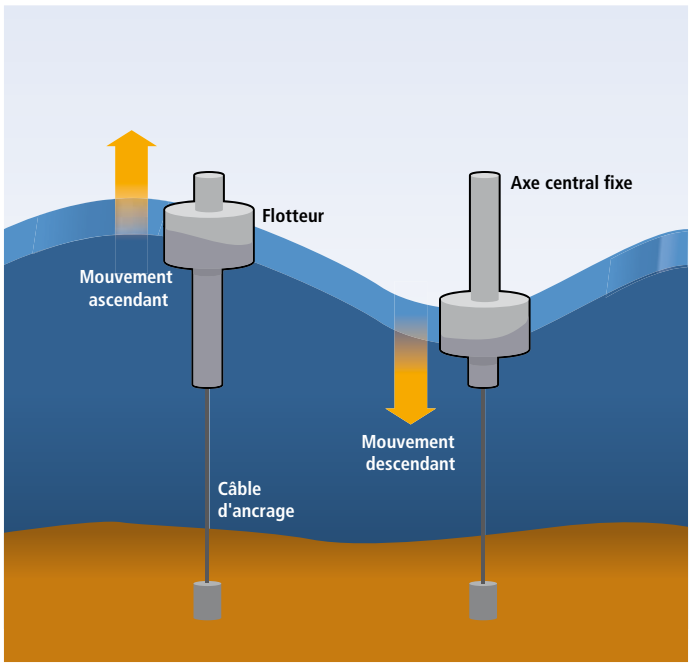


Figure TS.6.2a/b | Type de convertisseur d'énergie des vagues et son mode de fonctionnement: système à colonne d'eau oscillante: [Figure 6.6] (conception du National Renewable Energy Laboratory (NREL)).



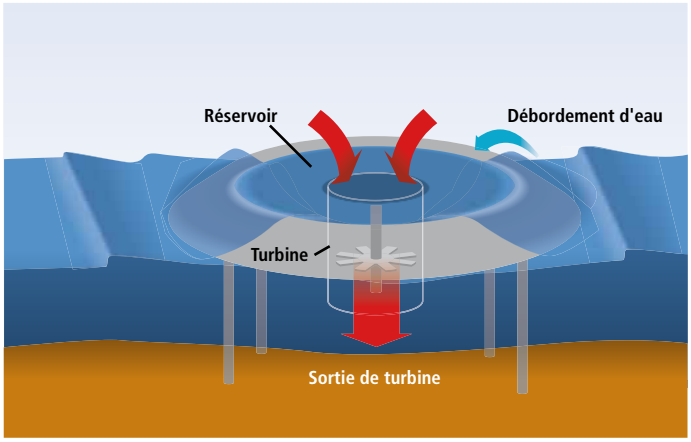


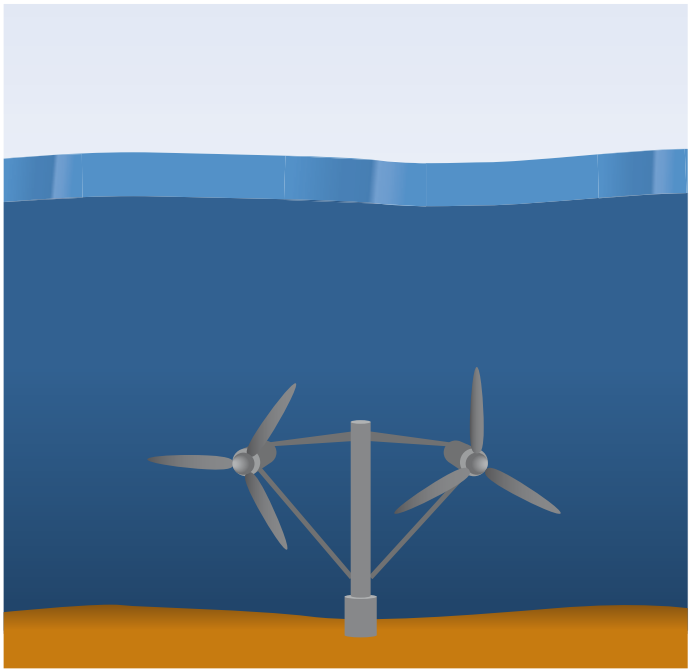
Figure TS.6.2c/d | Divers convertisseurs d'énergie des vagues et leur mode de fonctionnement: (à gauche) dispositif oscillant; (à droite) dispositif à débordement ou déferlement. [Figure 6.6] (conception du National Renewable Energy Laboratory (NREL)).

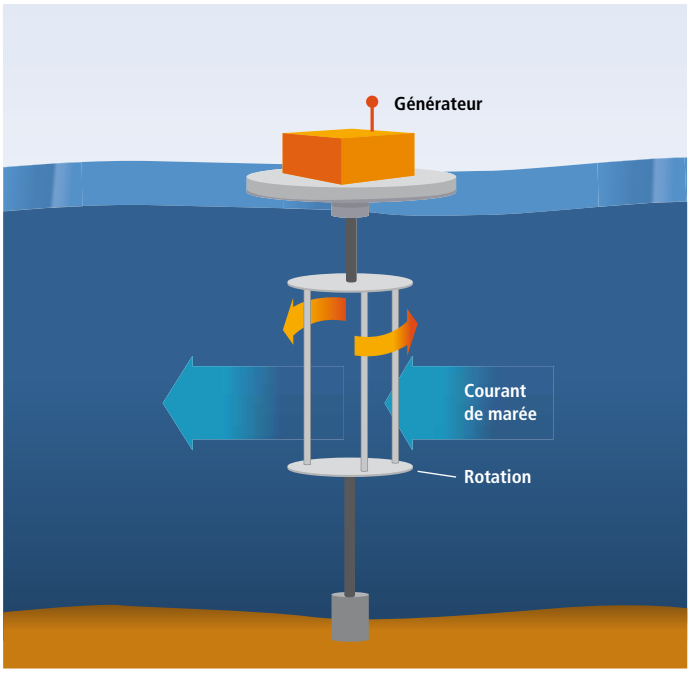
6.3 Technologies et applications

Le niveau actuel de développement des technologies afférentes à l'énergie marine vont du stade de la recherche-développement, purement conceptuel, à celui des prototypes et de la démonstration, seules les technologies mises au point pour exploiter l'amplitude de marée pouvant être considérées comme bien maîtrisées. À l'heure actuelle, il existe de nombreuses options technologiques pour chaque source d'énergie marine, et à l'exception des usines marémotrices, il n'y a pas encore eu de convergence technologique. Sur les quarante années écoulées, d'autres industries marines (plates-formes pétrolières et gazières essentiellement) ont enregistré de grands progrès dans les domaines suivants: matériaux, conception des structures, corrosion, câbles sous-marins et communications. Ces progrès devraient avoir des retombées directes sur la mise en valeur de l'énergie marine. [6.3.1]

Un grand nombre de technologies reposant sur divers principes de fonctionnement ont été conçues – et souvent expérimentées – pour transformer l'énergie des vagues en une forme d'énergie exploitable. Parmi les principales variables à prendre en considération figurent le mode d'interaction des convertisseurs d'énergie avec les vagues (selon qu'ils sont animés d'un mouvement de roulis, de tangage ou de soulèvement), la profondeur d'eau (grande, intermédiaire ou faible) et la distance à la côte (sur le littoral, à proximité du littoral ou en pleine mer). Les techniques de récupération de l'énergie des vagues se répartissent en trois groupes: les systèmes à colonne d'eau oscillante (côtiers ou flottants), les dispositifs oscillants (flottant en surface ou immergés) et les dispositifs à déferlement (côtiers ou flottants). [6.2.3] Les principes de fonctionnement sont présentés dans la figure TS.6.2.

Pour récupérer l'énergie marémotrice, il convient d'adapter la conception des barrages hydroélectriques fluviaux de façon à pouvoir fermer un estuaire. Le barrage peut produire de l'électricité à marée montante comme à marée descendante, et





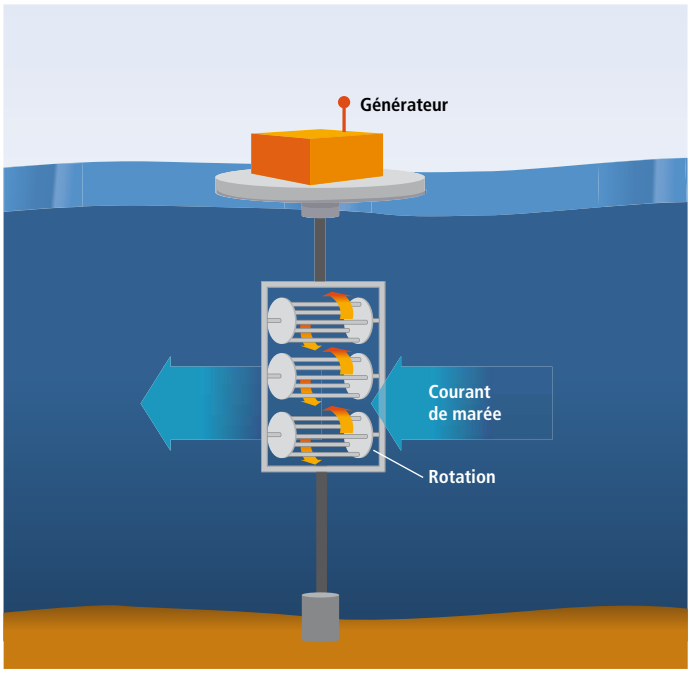


Figure TS.6.3 | Divers convertisseurs d'énergie des courants de marée et leur mode de fonctionnement: (en haut à gauche) système à deux hydroliennes à axe horizontal; (en bas) dispositif à impulsions radiales; (à droite) dispositif à axe vertical. [Figure 6.8]

il est prévu qu'à l'avenir certains barrages soient dotés de bassins multiples pour permettre une production quasi continue. Les concepts les plus récents consistent à créer des «lagunes à marée» autonomes au large des côtes. [6.3.3]

On s'emploie également à mettre au point des technologies de récupération de l'énergie engendrée par les courants de marée et les courants océaniques, mais les turbines marémotrices en sont à un stade d'élaboration plus avancé. Si certaines des technologies de conversion de l'énergie de ces divers courants sont analogues à celles employées pour les éoliennes classiques, les turbines sous-marines doivent aussi tenir compte de l'inversion du flux, du phénomène de cavitation à l'extrémité des pales et de l'environnement sous-marin, particulièrement hostile. Les courants de marée sont le plus souvent bidirectionnels, varient au gré du cycle de la marée et sont relativement rapides, contrairement aux courants océaniques, généralement unidirectionnels, lents et continus. Les convertisseurs d'énergie marine se répartissent en diverses catégories selon leur principe de fonctionnement: turbines axiales, turbines à impulsions radiales et dispositifs à double effet, présentés dans la figure TS.6.3. [6.3.4].

Les centrales de conversion de l'énergie thermique des mers (ETM) mettent à profit le gradient de température entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides des profondeurs (1 000 m est souvent le niveau de référence) pour produire de l'électricité. Les systèmes ETM à cycle ouvert utilisent directement l'eau de mer comme fluide de travail, tandis que les systèmes à cycle fermé font appel à des échangeurs de chaleur et à un fluide de travail secondaire (de l'ammoniac le plus souvent) pour actionner une turbine. Les systèmes hybrides fonctionnent à la fois en cycle ouvert et en cycle fermé. Les technologies ETM ont déjà fait l'objet d'essais, qui ont mis en évidence les problèmes que posent le maintien des vides d'air, les biosalissures dans les échangeurs de chaleur et la corrosion. Des recherches sont menées actuellement dans le but de surmonter ces problèmes. [6.3.5]

Le gradient de salinité entre l'eau douce des cours d'eau et l'eau de mer peut être mis à profit pour produire de l'énergie. Deux principes au moins sont à l'étude dans ce domaine. L'électrodialyse inversée est un principe selon lequel la différence de potentiel chimique entre les deux solutions constitue la force motrice (figure TS.6.4). Quant à la pression osmotique retardée, elle repose sur le phénomène d'osmose naturelle, selon lequel l'eau douce migre vers l'eau de mer en raison de la différence de teneur en sel des deux milieux, ce qui engendre une surpression dans le volume d'eau de mer (figure TS.6.5). [6.3.6]

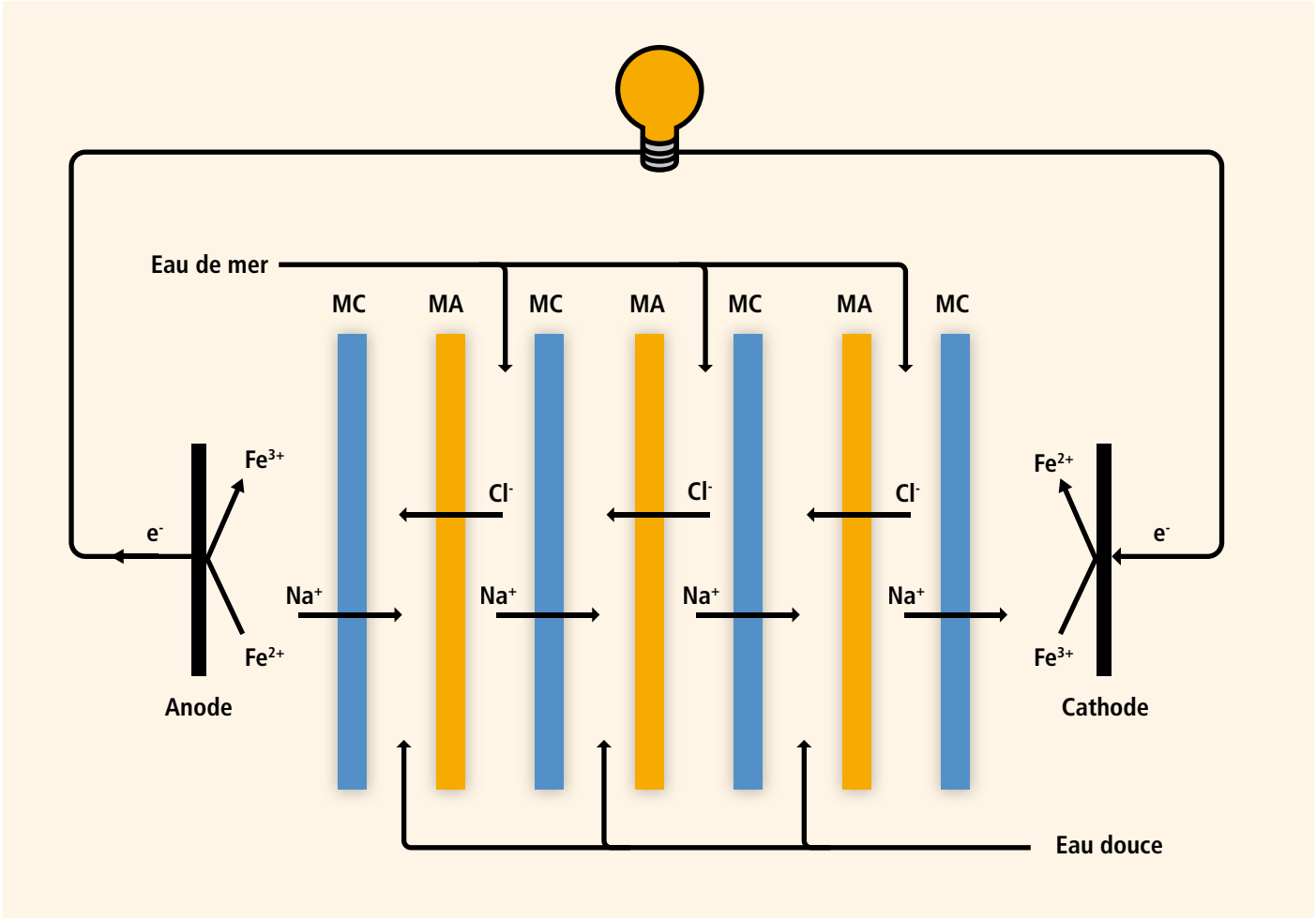


Figure TS.6.4 | Système d'électrodialyse inversée. [Figure 6.9]

Notes: MC = membrane cationique; MA = membrane anionique; Na = sodium; Cl = chlore; Fe = fer

6.4 État du marché et développement du secteur à l'échelle mondiale et régionale

Les projets de recherche-développement sur les technologies de mise en valeur de l'énergie des vagues et des courants de marée ont proliféré ces vingt dernières années, certains d'entre eux étant désormais parvenus au stade du prototype précommercial à part entière. À l'heure actuelle, la seule technologie d'exploitation de l'énergie marine accomplie et opérationnelle reste celle du barrage marémoteur, dont le meilleur exemple est celui de la Rance (240 MW) dans le nord-ouest de la France, achevé en 1966. D'une puissance de 254 MW, le barrage de Sihwa, en République de Corée, doit être mis en service en 2011. Quant aux technologies destinées à mettre en valeur d'autres sources d'énergie marine telles que l'énergie thermique des mers (ETM), les gradients de salinité et les courants océaniques, elles en sont encore au stade de la conceptualisation, de la recherche-développement ou des premiers prototypes. Aujourd'hui, plus de 100 technologies différentes destinées à tirer parti de l'énergie des océans sont en train d'être mises au point dans plus de 30 pays. [6.4.1]

Les principaux bailleurs de fonds pour les projets de recherche-développement et de mise en valeur sont les gouvernements nationaux, fédéraux ou d'État, suivis des grandes entreprises publiques du secteur de l'énergie et des sociétés d'investissement. Les gouvernements nationaux et régionaux appliquent des politiques volontaristes de soutien aux projets de mise en valeur de l'énergie marine qui se traduisent par un éventail de mesures à caractère financier, réglementaire et législatif. [6.4.7]

La participation du secteur privé reste embryonnaire, et il n'existe pas actuellement de véritable industrie manufacturière pour les technologies afférentes à l'énergie marine. L'intérêt croissant qu'elles suscitent pourrait favoriser un transfert de capacités et de compétences des secteurs apparentés, combiné à des innovations spécifiques. Chose intéressante, un certain nombre de centres nationaux d'expérimentation de l'énergie marine ont déjà vu le jour, qui sont en train de devenir des centres de test, d'homologation et de recherche-développement de pointe pour les technologies correspondantes. [6.4.1.2]

L'état d'avancement de ce secteur peut se mesurer à l'aune des déploiements récents ou en cours de systèmes d'exploitation de l'énergie marine.

Énergie des vagues: Un certain nombre de prototypes installés sur le rivage fonctionnent un peu partout dans le monde. Deux dispositifs à colonne d'eau oscillante sont opérationnels depuis une dizaine d'années au Portugal et en

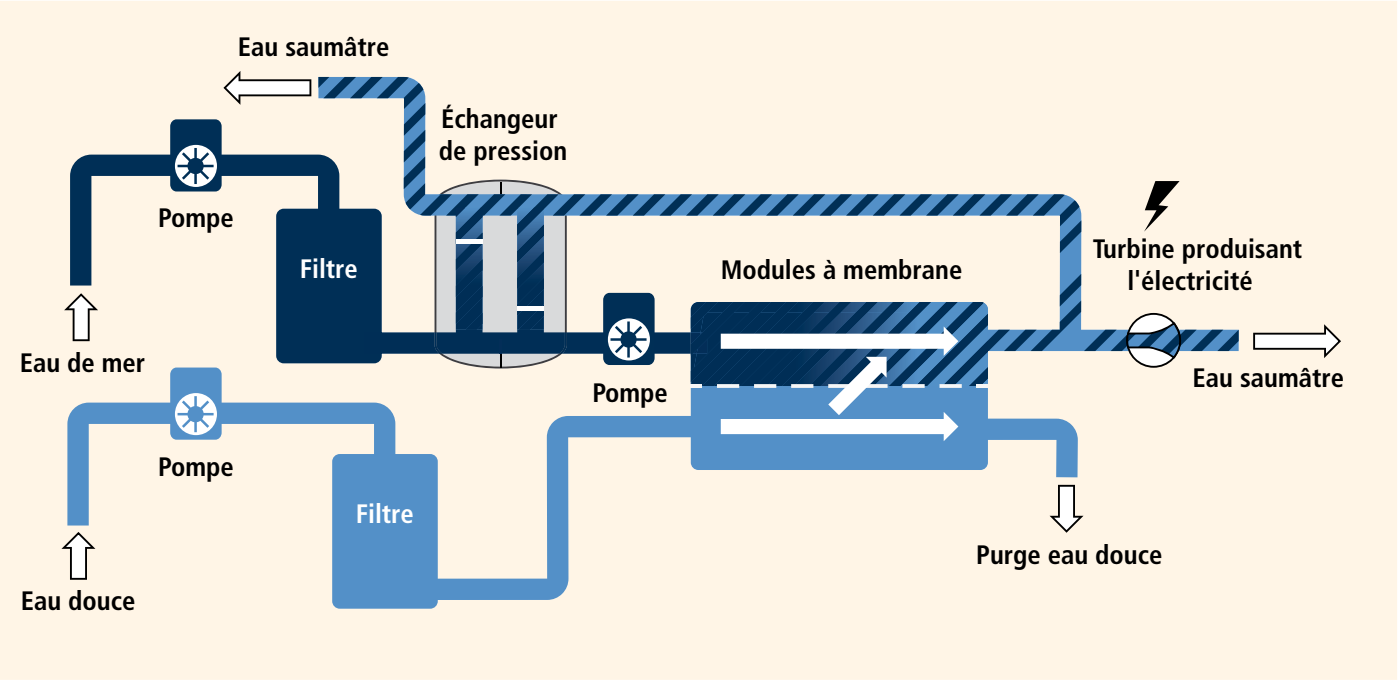


Figure TS.6.5 | Pression osmotique retardée. [Figure 6.10]

Écosse, et deux autres situés en pleine mer ont été testés à l'échelle du prototype en Australie et en Irlande. Un autre dispositif de ce type a fonctionné de 1990 à 2005 au large des côtes méridionales de l'Inde. Un certain nombre d'entreprises se sont attachées, en Australie, au Brésil, au Danemark, en Espagne, aux États-Unis d'Amérique, en Finlande, en Irlande, en Nouvelle-Zélande, en Norvège, au Portugal, au Royaume-Uni et en Suède, à tester en mer des prototypes pilotes ou précommerciaux, le plus grand affichant une puissance de 750 kW. [6.4.2]

Amplitude de marée: D'une puissance de 240 MW, l'usine marémotrice de la Rance, en France, est opérationnelle depuis 1966. D'autres installations, plus modestes, ont été mises en service depuis lors en Chine, au Canada et en Fédération de Russie. Le barrage de Sihwa en République de Corée, d'une puissance de 254 MW, sera mis en service en 2011, et plusieurs autres projets d'envergure sont à l'étude. [6.4.3]

Courants de marée et courants océaniques: Il existe probablement dans le monde plus de 50 dispositifs conçus pour récupérer l'énergie des courants de marée, qui en sont au stade de la validation de principe ou de la mise au point du prototype, mais il reste encore à déterminer les coûts d'une application à grande échelle. La turbine marémotrice SeaGen, installée au large de la côte de l'Irlande du Nord et alimentant depuis plus d'un an le réseau de distribution d'électricité, en est l'exemple le plus accompli. Une société irlandaise a testé en Écosse et, plus récemment, au Canada, sa turbine à centre ouvert. Deux entreprises ont fait la démonstration à pleine échelle de turbines à axe horizontal en Norvège et en Écosse, et une autre d'une turbine à axe horizontal en Italie. Enfin, un dispositif à double effet a fait l'objet d'une démonstration au Royaume-Uni en 2009. Aucune centrale pilote ou de démonstration n'a été implantée à ce jour pour exploiter l'énergie des courants océaniques, mais des projets à bien plus grande échelle sont envisagés si des technologies capables de capter l'énergie de ces courants plus lents sont mises au point. [6.4.4]

Énergie thermique des mers (ETM): Le Japon, l'Inde, les États-Unis d'Amérique et plusieurs autres pays ont testé des projets ETM pilotes, dont beaucoup ont posé des problèmes techniques liés au pompage, au maintien des vides d'air et aux canalisations. Des projets à plus grande échelle pourraient trouver de larges débouchés dans les pays tropicaux à façade maritime, notamment les îles du Pacifique et des Caraïbes et les pays d'Afrique et d'Amérique centrale, si la technologie progresse au point d'offrir une alternative économiquement viable pour l'approvisionnement énergétique. [6.4.5]

Gradients de salinité: Des travaux de recherche sur l'énergie osmotique se poursuivent en Norvège, où un prototype est exploité depuis 2009 dans la perspective de la mise en service d'une centrale osmotique commercialement viable. La technologie de l'électrodialyse inversée a été proposée par ailleurs dans l'optique du réaménagement de la digue d'Afsluitdijk, aux Pays-Bas, dont la construction remonte à 75 ans. [6.4.6]

6.5 Incidences sur la société et l'environnement

L'énergie marine n'engendre pas directement de CO_2 en phase d'exploitation, mais des émissions de gaz à effet de serre peuvent se produire lors des différentes phases du cycle de vie des systèmes de mise en valeur de cette forme d'énergie – extraction des matières premières, fabrication des éléments, construction, maintenance et démantèlement. Les études portant sur le cycle de vie des installations qui ont été publiées depuis 1980 ont été systématiquement passées en revue, et il en ressort que les émissions de gaz à effet de serre attribuables aux systèmes de captage de l'énergie des vagues et des marées sont inférieures à 23 g éqCO_2/kWh, l'estimation médiane étant de 8 g éqCO_2/kWh environ en ce qui concerne l'énergie des vagues. On manque encore du recul nécessaire pour évaluer les émissions produites durant le cycle de vie des autres types de technologies de conversion de l'énergie

Tableau TS.6.1 | Récapitulation des principaux paramètres de coût et de performance pour toutes les technologies relatives à l'énergie marine. [Tableau 6.3]

Technologies relatives à l'énergie marine	Coûts d'investissement (dollars É.-U. $_{2005}$/kW)	Frais d'exploitation et de maintenance (dollars É.-U. $_{2005}$/kW)	Coefficient d'utilisation (%)	Durée de vie nominale (années)
Énergie des vagues	6 200–16 100	180	25–40	20
Amplitude de marée	4 500–5 000	100	22,5–28,5	40
Courants de marée	5 400–14 300	140	26–40	20
Courants océaniques	ND	ND	ND	20
Énergie thermique des mers	4 200–12 300[1]	ND	ND	20
Gradients de salinité	ND	ND	ND	20

Note: 1) Les coûts relatifs à l'énergie thermique des mers n'ont pas été convertis en dollars É.-U.$_{2005}$.

marine. Quoiqu'il en soit, les émissions liées à l'exploitation de l'énergie des mers sont minimes si on les compare à celles produites par les énergies fossiles. [6.5.1]

Les conséquences locales pour la société et l'environnement des projets d'exploitation de l'énergie marine sont évaluées au fur et à mesure de la mise en œuvre concrète de ces projets, qui se multiplient, mais peuvent aussi être estimées sur la base de l'expérience acquise avec d'autres industries maritimes et offshore. Les risques pour l'environnement liés aux technologies afférentes à l'énergie marine s'avèrent relativement limités, mais comme la mise en valeur de cette forme d'énergie en est encore à un stade peu avancé, on ne sait pas très bien dans quelle mesure les inquiétudes suscitées par les éventuelles répercussions sociales et environnementales de ces technologies pourraient freiner leur développement. [6 ES]

Chaque technologie de conversion de l'énergie marine a des incidences particulières sur l'environnement et la société. Parmi les effets potentiellement bénéfiques, on peut mentionner la réduction des autres activités humaines néfastes à la faune et à la flore marines au voisinage des installations, un meilleur approvisionnement en énergie et la relance de la croissance économique, de l'emploi et du tourisme au niveau régional. Au nombre des effets négatifs on peut citer l'impact visuel sur le paysage, la confiscation de l'espace au détriment des autres usagers, les nuisances sonores lors de la construction, les bruits et vibrations causés par le fonctionnement des installations, les champs électromagnétiques, la perturbation de la faune et de la flore ainsi que de leurs habitats, l'altération de la qualité de l'eau, les risques de pollution liés à d'éventuelles fuites d'huile ou de substances chimiques, et les autres répercussions, aussi limitées soient-elles, sur les écosystèmes locaux. [6.5.2]

6.6 Perspectives d'amélioration, d'innovation et d'intégration technologiques

En tant que technologies émergentes, les systèmes de conversion de l'énergie marine se prêtent à des améliorations substantielles. Non seulement les activités de recherche-développement et les applications spécifiques aux différents systèmes seront-elles déterminantes à cet égard, mais les améliorations et innovations apportées à ces convertisseurs de l'énergie marine seront par ailleurs probablement favorisées par les progrès enregistrés dans les disciplines connexes. [6.6]

Pour intégrer l'énergie marine dans les grands réseaux énergétiques, il faudra tenir compte des caractéristiques de production extrêmement variables des

Tableau TS.6.2 | Caractéristiques principales des scénarios à moyen et long terme tirés des grandes études publiées qui prennent en considération l'énergie marine. [Tableau 6.5]

	Mise en valeur (TWh/an ((PJ/an))				GW	
Scénario	2010	2020	2030	2050	2050	Notes
Energy [R]evolution – Scénario de référence	ND	3 (10,8)	11 (36,6)	25 (90)	ND	Politiques inchangées
Energy [R]evolution	ND	53 (191)	128 (461)	678 (2 440)	303	Fondé sur une réduction de 50 % du carbone
Energy [R]evolution – Scénario avancé	ND	119 (428)	420 (1 512)	1 943 (6 994)	748	Fondé sur une réduction de 80 % du carbone
WEO 2009	ND	3 (10,8)	13 (46,8)	ND	ND	Fondement du scénario de référence d'E[R]
ETP: BLUE Map 2050	ND	ND	ND	133 (479)	ND	Secteur de l'électricité pratiquement décarboné
ETP: BLUE Map 2050 (sans CSC)	ND	ND	ND	274 (986)	ND	BLUE Map (variante) – Captage et stockage du carbone jugés impossibles
ETP: BLUE Map 2050 (part élevée du nucléaire)	ND	ND	ND	99 (356)	ND	BLUE Map (variante) – Part de l'énergie nucléaire portée à 2 000 GW
ETP: BLUE Map 2050 (part élevée des ÉR)	ND	ND	ND	552 (1 987)	ND	BLUE Map (variante) – Part des énergies renouvelables portée à 75 %
ETP: BLUE Map (3 %)	ND	ND	ND	401 (1 444)	ND	BLUE Map (variante) – Taux d'actualisation fixé à 3% pour les projets de production d'énergie.

différentes sources d'énergie concernées. Par exemple, la production d'électricité à partir de l'énergie marémotrice présente une très grande variabilité sur des laps de temps de une à quatre heures, mais une variabilité infime à l'échelle mensuelle ou à plus long terme. [6.6]

6.7 Évolution des coûts

Le développement des technologies de conversion de l'énergie marine n'est pas encore déterminé par le marché. Ce sont les activités de recherche-développement subventionnées par l'État et les politiques nationales d'incitation qui jouent un rôle moteur dans ce domaine. Dans la mesure où aucune de ces technologies, à l'exception des barrages marémoteurs, n'est encore parfaitement maîtrisée (l'expérience acquise à leur propos ne permet de procéder qu'à la validation de dispositifs de démonstration ou de prototypes), il est difficile de déterminer avec précision la viabilité économique de la plupart d'entre elles. [6.7.1]

Le tableau TS.6.1 contient les meilleures données disponibles sur certains des principaux facteurs de coût qui ont une incidence sur le coût moyen actualisé de l'électricité pour chacune des formes d'énergie marine. Dans la plupart des cas, ces paramètres de coût et de performance ne reposent que sur de maigres informations, en raison de la pénurie de données de référence validées par des spécialistes et du manque d'expérience concrète en matière d'exploitation. Ils correspondent en fait le plus souvent à des estimations hypothétiques qui s'appuient sur des connaissances techniques. Les coûts d'investissement actuels, qui sont indiqués pour quelques formes d'énergie marine, ne reposent cependant que sur un petit nombre de projets et d'études qui ne sont pas forcément représentatifs de l'ensemble du secteur. [6.7.1]

Sur la base d'une méthodologie normalisée exposée dans l'annexe II et des facteurs de coût et de performance récapitulés dans l'annexe III, le coût moyen actualisé de l'électricité dans le cas des usines marémotrices (seule technologie de conversion de l'énergie marine actuellement disponible sur le marché), tel qu'il a été calculé sur un large éventail de paramètres, se situe entre 12 et 32 cents É.-U.$_{2005}$/kWh. Il ne s'agit toutefois que d'une fourchette indicative, étant donné la maigre expérience acquise à ce jour sur le terrain. [1.3.2, 6.7.1, 6.7.3, 10.5.1, annexe II, annexe III]

Comme les technologies considérées sont encore balbutiantes, les estimations relatives aux coûts futurs de l'énergie marine ne doivent être considérées que comme de simples suppositions. Ces coûts devraient toutefois décroître avec le temps, à mesure que progresseront la recherche-développement et les activités de démonstration et de mise en place. [6.7.1–6.7.5]

6.8 Potentiel de mise en valeur

Jusque vers 2008, l'énergie marine n'était prise en considération dans aucun des grands scénarios énergétiques mondiaux modélisés, et l'on ne fait donc qu'amorcer l'étude de son impact potentiel sur les approvisionnements énergétiques futurs à l'échelle du globe et sur l'atténuation du changement climatique. Aussi, les résultats publiés de scénarios relatifs à l'énergie marine sont-ils sommaires et provisoires, reflétant un large éventail d'éventualités. Les scénarios de mise en valeur de l'énergie marine considérés ici ne proviennent que de trois grandes publications: Energy [R]evolution (E[R]) 2010, World Energy Outlook (WEO) 2009, de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), et Energy Technology Perspectives (ETP) 2010. Des scénarios multiples sont étudiés dans les rapports E[R] et ETP, tandis qu'un scénario de référence unique est documenté dans le rapport WEO. Chaque scénario est résumé dans le tableau TS.6.2.

Cette présentation préliminaire de divers scénarios de mise en valeur de l'énergie marine constitue une des premières tentatives visant à passer en revue le rôle potentiel de cette forme d'énergie tel qu'il est envisagé dans les scénarios à moyen ou long terme publiés dans la littérature spécialisée. Il s'agit en effet de déterminer la contribution que l'énergie des mers pourrait apporter aux futurs approvisionnements énergétiques et à la lutte contre le changement climatique. Comme en font état le petit nombre de scénarios disponibles, l'énergie marine pourrait contribuer à atténuer sur le long terme les changements climatiques en compensant les émissions de gaz à effet de serre au moyen de projets d'exploitation qui se traduiraient par un approvisionnement énergétique pouvant atteindre 1 943 TWh/an (~7 EJ/an) d'ici à 2050. D'autres scénarios ont été établis, qui tablent sur une mise en valeur de l'énergie marine n'excédant pas 25 TWh/an (0,9 EJ/an). La grande diversité des résultats obtenus découle en partie du fait que l'on ne sait pas exactement dans quelle mesure l'impératif de lutte contre le changement climatique favorisera la mutation du secteur de l'énergie. S'agissant de l'énergie marine, se pose aussi la question de savoir si les diverses technologies concernées deviendront un jour économiquement compétitives et, si c'est le cas, à quelle échéance. Pour mieux comprendre le rôle que l'énergie marine pourrait être appelée à jouer dans l'atténuation du changement climatique, il faudra non seulement que les technologies continuent d'évoluer, mais aussi que les activités de modélisation de scénarios tiennent de plus en plus compte de tout l'éventail des technologies afférentes à cette forme d'énergie, avec des données aussi précises que possible sur les ressources potentiellement disponibles, les coûts d'investissement actuels et futurs, les frais d'exploitation et de maintenance et les coefficients d'utilisation escomptés. Enfin, pour que l'énergie marine soit mieux prise en compte dans les scénarios énergétiques, il est important de pouvoir disposer d'une plus grande quantité de données à l'échelle mondiale et régionale. [6.8.4]

7. L'énergie éolienne

7.1 Introduction

L'énergie éolienne est utilisée depuis des millénaires dans une vaste gamme d'applications. L'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité à l'échelle commerciale n'est cependant devenue viable que dans les années 1970, grâce aux avancées technologiques et à l'appui des pouvoirs publics. Il existe différentes technologies permettant de convertir l'énergie éolienne pour diverses applications, mais, dans la perspective d'une atténuation des changements climatiques, l'énergie éolienne est utilisée principalement pour produire de l'électricité à partir de grandes éoliennes raccordées au réseau, mises en place soit à terre (éoliennes terrestres), soit sur l'eau – en mer ou en eau douce (éoliennes au large des côtes).[11] [7.1]

L'énergie éolienne offre un potentiel important en matière de réduction des émissions des GES à court terme (2020) et à long terme (2050). La capacité éolienne installée à la

11 Les petites éoliennes, l'électricité éolienne en altitude et l'utilisation de l'énergie éolienne pour des applications mécaniques et de propulsion ne sont que brièvement abordées au chapitre 7.

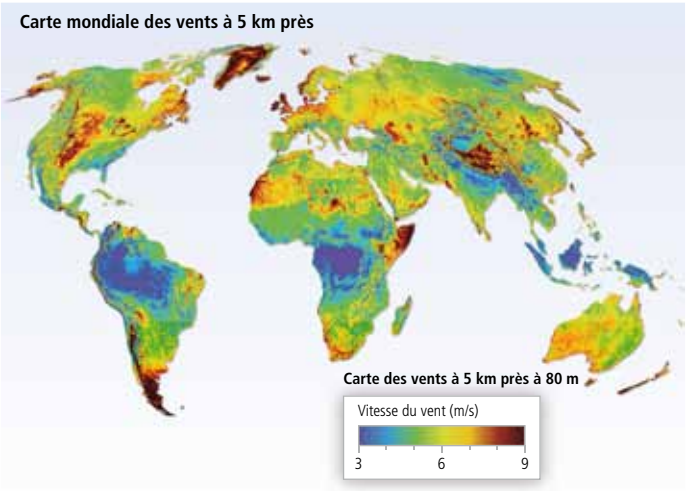


Figure TS.7.1 | Exemple de carte des ressources éoliennes mondiales, avec une résolution de 5 km x 5 km. [Figure 7.1]

fin de 2009 couvrait environ 1,8 % des besoins mondiaux en électricité, et cette contribution pourrait passer à plus de 20 % en 2050 si des efforts ambitieux sont consentis pour réduire les émissions de GES et pour s'attaquer aux autres obstacles qui freinent la mise en valeur de cette forme d'énergie. L'énergie éolienne terrestre se développe déjà à un rythme rapide dans de nombreux pays, et il n'existe aucun obstacle technique insurmontable empêchant l'augmentation de la part de l'énergie éolienne dans les systèmes d'approvisionnement en électricité. En outre, bien que la vitesse moyenne des vents varie considérablement selon le lieu, la plupart des régions du monde disposent d'un vaste potentiel technique à même d'assurer une mise en valeur satisfaisante de l'énergie éolienne. Dans certaines régions bénéficiant de bonnes ressources éoliennes, le coût de l'énergie éolienne peut déjà concurrencer les prix du marché actuels de l'énergie, même sans prendre en compte les effets relatifs sur l'environnement. Néanmoins, dans la plupart des régions du monde, des mesures de politique générale sont encore nécessaires pour mettre en valeur rapidement cette énergie. Des progrès continus des technologies de conversion de l'énergie éolienne à terre et au large des côtes sont cependant à prévoir, qui réduiront encore le coût de cette forme d'énergie et amélioreront son potentiel de réduction des émissions de GES. [7.9]

7.2 Potentiel

Le potentiel technique mondial de l'énergie éolienne n'est pas fixe; il est fonction des avancées techniques et des hypothèses concernant les autres obstacles au développement de cette énergie. Néanmoins, un nombre croissant d'évaluations mondiales de la ressource éolienne démontrent que le potentiel technique de la planète dans ce domaine excède la production actuelle d'électricité dans le monde. [7.2]

Aucune approche normalisée n'a été élaborée pour estimer le potentiel technique mondial de l'énergie éolienne: la diversité des données, des méthodes, des hypothèses et même des définitions du potentiel technique ne favorise pas les comparaisons. Le quatrième Rapport d'évaluation a estimé le potentiel technique de l'énergie éolienne terrestre à 180 EJ/an (50 000 TWh/an). D'autres estimations du potentiel technique mondial de l'énergie éolienne qui prennent en compte un certain nombre d'obstacles supplémentaires au développement varient de 70 EJ/an (19 400 TWh/an) (terrestre uniquement) à 450 EJ/an (125 000 TWh/an) (à terre et à proximité des côtes). Cette fourchette représente approximativement une à six fois la production mondiale d'électricité en 2008 et sous-estime probablement le potentiel technique, étant donné que plusieurs de ces études se fondent sur des hypothèses dépassées, ne tiennent pas compte ou ne tiennent comptent qu'en partie de l'énergie éolienne au large des côtes et présentent des insuffisances sur le plan des méthodes et du calcul. Les estimations du potentiel technique de la seule énergie éolienne au large des côtes varient de 15 EJ/an à 130 EJ/an (4 000 à 37 000 TWh/an), si l'on ne tient compte que des applications en eaux peu profondes ou près des côtes; le potentiel technique s'accroît si l'on envisage également des applications en eaux profondes, avec un recours éventuel à des éoliennes flottantes. [7.2.1]

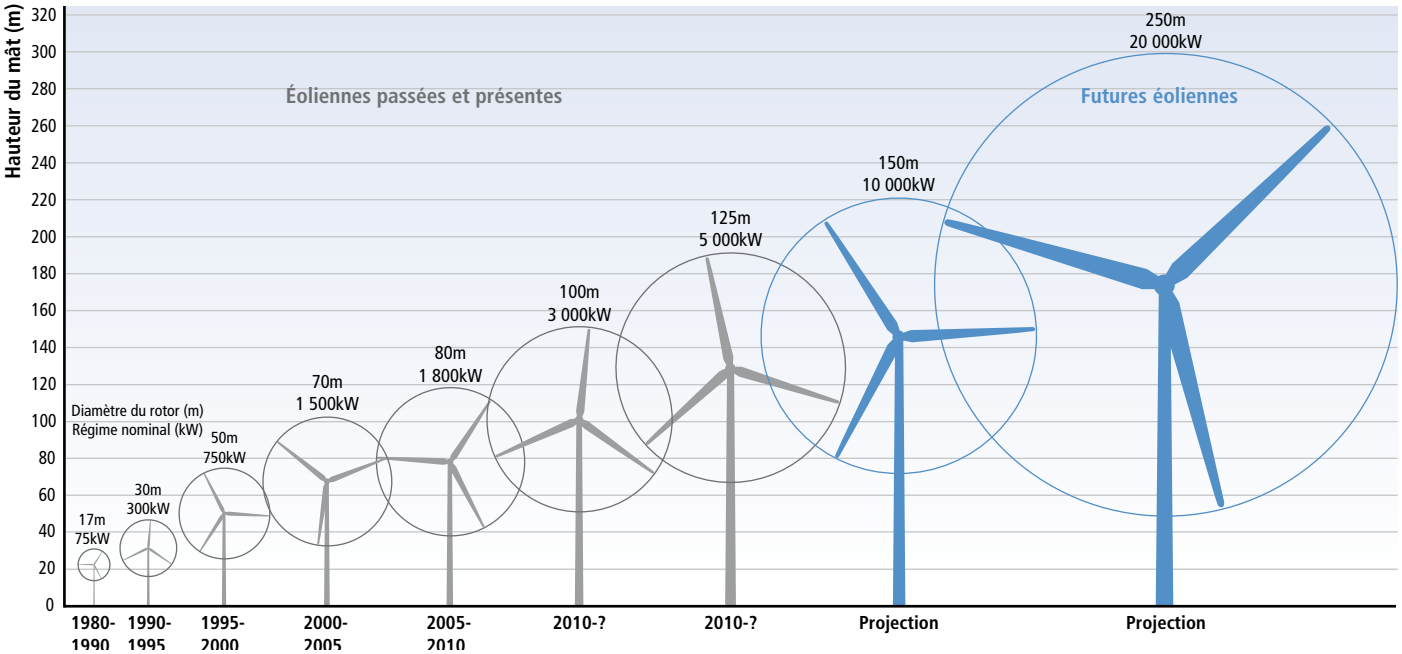


Figure TS.7.2 | Augmentation de la taille moyenne des éoliennes commerciales. [Figure 7.6]

Que les estimations existantes surestiment ou sous-estiment le potentiel technique de l'énergie éolienne et qu'il soit par ailleurs nécessaire d'améliorer les méthodes d'évaluation de la ressource éolienne, il n'en reste pas moins évident que le potentiel technique de la ressource même ne devrait pas constituer une entrave à la mise en valeur de l'énergie éolienne à l'échelle du globe. En revanche, les contraintes économiques liées au coût de l'énergie éolienne, les obstacles institutionnels et les coûts relatifs à l'accès au transport et à l'intégration opérationnelle ainsi que les questions liées à l'acceptation sociale et aux conséquences environnementales sont susceptibles d'entraver le développement, bien avant qu'on ne se heurte à une quelconque limite absolue du potentiel technique mondial. [7.2.1]

De plus, il existe un potentiel technique d'une ampleur suffisante dans la plupart des régions du monde pour permettre une mise en valeur satisfaisante de l'énergie éolienne. Toutefois, les ressources éoliennes ne sont pas également réparties à la surface du globe, ni uniformément situées près des centres de population, et l'énergie éolienne ne pourra donc pas contribuer équitablement à la satisfaction des besoins des divers pays. Les potentiels techniques de l'énergie éolienne terrestre dans les pays d'Amérique du Nord, d'Europe de l'Est et d'Eurasie faisant partie de l'OCDE s'avèrent particulièrement importants, alors qu'ils semblent plus limités dans certaines régions de l'Asie ne faisant pas partie de l'OCDE et dans certains pays d'Europe membres de l'OCDE. La figure TS.7.1 présente une carte des ressources éoliennes dans le monde, qui fait également état d'un potentiel technique limité dans certaines zones d'Amérique latine et d'Afrique, bien que d'autres parties de ces continents semblent bénéficier d'un potentiel technique important. Des évaluations régionales récentes et détaillées concluent généralement que les ressources éoliennes sont plus importantes que ce qu'on avait estimé dans de précédentes évaluations. [7.2.2]

Les changements climatiques mondiaux sont susceptibles de modifier la distribution géographique et/ou la variabilité intra-annuelle et interannuelle des ressources éoliennes, la qualité de ces ressources ou encore la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, ce qui pourrait avoir des incidences sur la conception et l'exploitation des éoliennes. À ce jour, les recherches indiquent qu'il est peu probable que les valeurs annuelles moyennes sur plusieurs années de la vitesse du vent varient de plus de ± 25 % sur la majeure partie de l'Europe et de l'Amérique du Nord au cours du XXIe siècle, tandis que les recherches portant sur l'Europe du Nord semblent indiquer que les valeurs annuelles moyennes sur plusieurs années de la puissance énergétique du vent ne dépasseront probablement pas de plus de ± 50 % les valeurs actuellement observées. Pour les autres régions du monde, les études sont plus rares. Bien que la recherche dans ce domaine n'en soit encore qu'à ses débuts et que des études supplémentaires s'imposent, les recherches menées jusqu'à présent semblent indiquer que les changements climatiques mondiaux pourraient modifier la distribution géographique des ressources éoliennes, mais qu'il est peu probable que les conséquences soient d'une ampleur telle que le potentiel mondial de mise en valeur de l'énergie éolienne en soit grandement affecté. [7.2.3]

7.3 Technologie et applications

Consistant au départ en de petits appareils très simples, les éoliennes commerciales modernes raccordées au réseau sont devenues des machines imposantes et extrêmement sophistiquées. Cette évolution technologique a été favorisée par le progrès des connaissances scientifiques et techniques ainsi que par l'amélioration des outils de calcul, des normes de conception, des méthodes de fabrication et des modes d'exploitation et de maintenance. [7.3]

Pour produire de l'électricité éolienne, il faut convertir l'énergie cinétique de l'air en mouvement en énergie électrique; or toute la difficulté technique, pour le secteur de l'énergie éolienne, consiste à concevoir des éoliennes et des centrales électriques rentables pour effectuer cette conversion. Bien qu'on ait étudié différentes configurations de turbines, les éoliennes commerciales se présentent généralement sous la forme d'un dispositif à axe horizontal muni de trois pales situées du côté du mat exposé au vent. Afin de réduire le coût moyen actualisé de l'énergie éolienne, la taille moyenne des éoliennes a considérablement augmenté (figure TS.7.2), la plus grande partie des éoliennes terrestres installées dans le monde en 2009 ayant une capacité nominale comprise entre 1,5 et 2,5 MW. Depuis 2010, les éoliennes terrestres sont généralement installées sur des mâts de 50 à 100 mètres de haut, avec des rotors mesurant souvent entre 50 et 100 mètres de diamètre; des appareils commerciaux dont le diamètre du rotor et la hauteur du mât dépasse les 125 mètres sont en exploitation, et des machines encore plus grandes sont en phase de développement. La technologie éolienne terrestre est déjà produite commercialement et déployée à grande échelle. [7.3.1]

La technologie éolienne au large des côtes est moins maîtrisée que la technologie terrestre, et ses coûts d'investissement sont plus élevés. Les disponibilités en matière de centrales électriques sont généralement moindres et les coûts d'exploitation et de maintenance, plus élevés à cause du manque relatif de maturité de cette technologie et des difficultés logistiques intrinsèquement plus grandes que posent le maintien en service et l'entretien des éoliennes au large des côtes. Néanmoins, cette forme d'énergie éolienne suscite un intérêt considérable dans l'UE et, de plus en plus, dans d'autres régions. La motivation première pour le développement de l'énergie éolienne au large des côtes est la possibilité d'accéder à de nouvelles ressources éoliennes dans des zones où le développement de l'énergie éolienne terrestre est entravé par la limitation du potentiel technique et/ou par des conflits de planification ou d'implantation avec d'autres modes d'utilisation des sols. Parmi les autres motivations figurent la meilleure qualité des ressources éoliennes en mer; la possibilité d'utiliser des éoliennes encore plus grandes et de réaliser ainsi des économies d'échelle supplémentaires; la possibilité de construire de plus grandes centrales électriques qu'à terre et de faire également des économies d'échelle à ce niveau; et enfin la possibilité de réduire le besoin en infrastructures nouvelles de transport sur de longues distances pour accéder à l'énergie éolienne terrestre lorsqu'elle est produite dans des zones isolées. Jusqu'à présent, la technologie éolienne au large des côtes ne s'est guère distinguée des conceptions adoptées pour l'éolien terrestre, avec seulement quelques modifications et des fondations spéciales. Avec l'expérience, il sera possible d'installer des éoliennes dans des eaux plus profondes et à des endroits plus exposés où les vents sont plus forts. Une technologie éolienne conçue spécialement pour les applications au large des côtes se développera à mesure que ce marché s'élargira, et il est à prévoir que des turbines plus grandes, d'une capacité de l'ordre de 5 à 10 MW, domineront à terme ce segment du marché. [7.3.1.3]

Parallèlement à l'évolution de la conception des éoliennes, des méthodes améliorées de conception et d'expérimentation ont été codifiées en normes de la Commission électrotechnique internationale. Les organismes de certification s'appuient sur des organes accrédités de conception et d'expérimentation pour fournir des documents traçables prouvant la conformité aux normes, afin de certifier que les turbines, les éléments ou les centrales éoliennes dans leur ensemble se conforment aux directives communes en matière de sécurité, de fiabilité, de performance et d'expérimentation. [7.3.2]

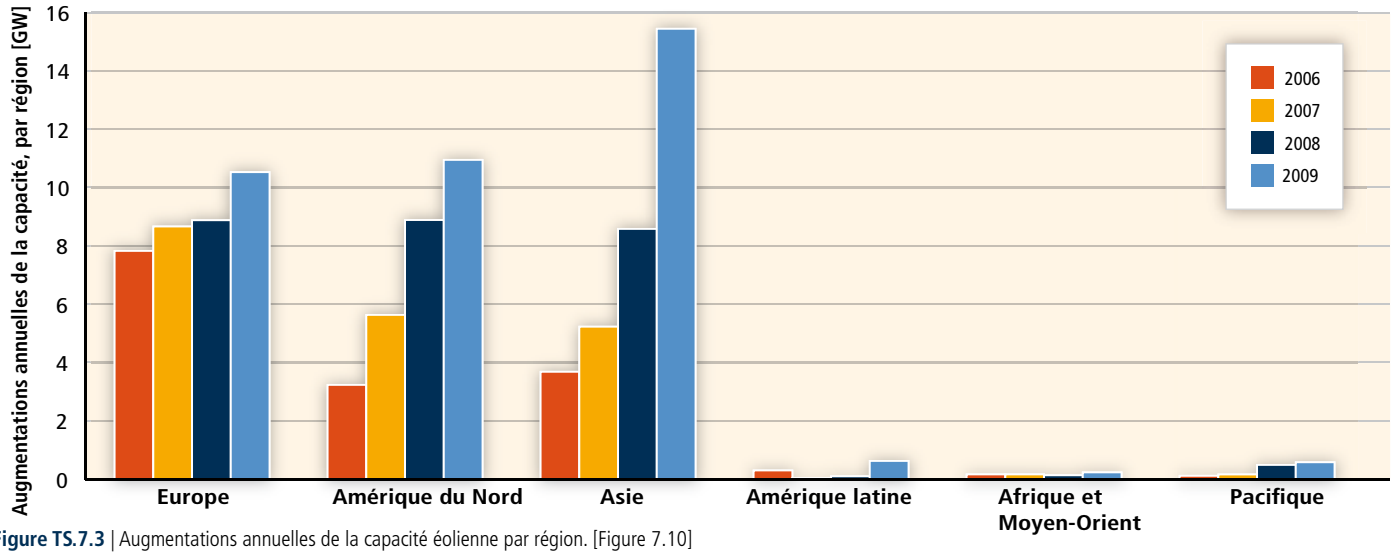


Figure TS.7.3 | Augmentations annuelles de la capacité éolienne par région. [Figure 7.10]

Note: Les régions présentées dans la figure sont définies par l'étude.

Sur le plan de la fiabilité du système électrique, un élément important des éoliennes est le système de conversion électrique. S'agissant des éoliennes modernes, les machines à vitesse variable dominent aujourd'hui le marché, permettant un approvisionnement en puissance active et réactive et offrant une certaine capacité de maintien de l'alimentation en cas d'anomalie, mais sans apporter cependant de réponse inertielle intrinsèque (c'est-à-dire que les turbines ne sont pas en mesure d'augmenter ni de diminuer leur puissance de sortie en fonction des fluctuations de puissance du réseau); les fabricants d'éoliennes ont pris conscience de ce problème et étudient un certain nombre de pistes pour y remédier. [7.3.3]

7.4 État du marché et développement du secteur à l'échelle mondiale et régionale

Le marché de l'énergie éolienne s'est considérablement développé, démontrant la viabilité commerciale et économique de la technologie et du secteur. L'expansion de l'énergie éolienne s'est toutefois concentrée dans un nombre restreint de régions, et la poursuite de son expansion, en particulier dans les régions où l'énergie éolienne est encore peu mise en valeur et dans les zones au large des côtes, nécessitera probablement de nouvelles mesures de politique générale. [7.4]

L'énergie éolienne s'est rapidement imposée comme un élément à part entière du secteur de l'électricité. D'une capacité cumulée de 14 GW fin 1999, la capacité installée au niveau mondial a été multipliée par douze en dix ans, pour atteindre près de 160 GW fin 2009. La majeure partie de cette capacité est installée à terre, les installations au large des côtes se trouvant essentiellement en Europe et totalisant 2,1 GW. Les pays disposant de la plus grande capacité installée à la fin de 2009 étaient les États-Unis d'Amérique (35 GW), la Chine (26 GW), l'Allemagne (26 GW), l'Espagne (19 GW) et l'Inde (11 GW). Le coût d'investissement total des nouvelles centrales éoliennes installées en 2009 s'élevait à 57 milliards de dollars É.-U.$_{2005}$, tandis que le nombre d'emplois directs dans le secteur était estimé à environ 500 000 en 2009. [7.4.1, 7.4.2]

En Europe et aux États-Unis d'Amérique, l'énergie éolienne représente une nouvelle source majeure d'augmentation de la capacité de production d'électricité. En 2009, environ 39 % de toutes les extensions de capacité aux États-Unis d'Amérique et dans l'Union européenne relevaient de l'énergie éolienne; en Chine, toujours en 2009, 16 % des extensions nettes de capacité provenaient de cette forme d'énergie. Au niveau mondial, de 2000 à 2009, approximativement 11 % de toutes les extensions nettes de la capacité de production d'électricité nouvellement installées provenaient de nouvelles centrales éoliennes; pour l'année 2009 uniquement, ce chiffre dépassait probablement les 20 %. En conséquence, plusieurs pays commencent à atteindre des niveaux relativement élevés de pénétration annuelle de la production d'électricité d'origine éolienne dans leurs réseaux électriques respectifs. Fin 2009, la capacité énergétique éolienne pouvait satisfaire quelque 20 % de la demande annuelle en électricité au Danemark, 14 % au Portugal, 14 % en l'Espagne, 11 % en l'Irlande et 8 % en Allemagne. [7.4.2]

Malgré cette évolution, l'énergie éolienne représente encore une part relativement faible de l'approvisionnement en électricité dans le monde. La capacité installée totale pour cette forme d'énergie à la fin de l'année 2009 permettrait de répondre à environ 1,8 % de la demande mondiale d'électricité pour une année moyenne. En outre, même si le secteur de l'énergie éolienne est parvenu avec le temps à atténuer sa dépendance à l'égard des marchés européens, comme en témoigne sa forte expansion récente aux États-Unis d'Amérique et en Chine, le marché reste concentré dans certaines régions: ainsi, l'Amérique latine, l'Afrique, le Moyen-Orient et les régions du Pacifique ont une capacité éolienne installée relativement faible, malgré leur potentiel technique important en la matière (figure TS.7.3). [7.4.1, 7.4.2]

La mise en valeur de l'énergie éolienne doit faire face à un certain nombre de difficultés, dont le coût relatif de cette forme d'énergie comparé aux prix du marché de l'énergie, du moins si les conséquences environnementales ne sont pas internalisées ni monétisées; les préoccupations relatives à l'incidence de la variabilité de l'énergie éolienne; les difficultés liées à la mise en place de nouveaux moyens de transport de l'énergie; la lourdeur et la lenteur des procédures de planification, d'implantation et d'obtention de permis; la nécessité de nouvelles avancées techniques et le coût plus élevé de la technologie éolienne au large des côtes; et le manque de connaissances institutionnelles et techniques dans les régions où l'énergie éolienne n'a pas encore été suffisamment mise en valeur. Par conséquent, la progression de ce secteur est tributaire d'un large éventail de politiques gouvernementales. [7.4.4]

7.5 Problèmes à court terme concernant l'intégration au réseau

À mesure que l'énergie éolienne se développe, les préoccupations quant à l'intégration de cette énergie dans les réseaux électriques se font plus vives. La nature et l'ampleur des problèmes d'intégration dépendront des caractéristiques du système électrique existant et du niveau de pénétration de l'énergie éolienne. De plus, comme on le verra au chapitre 8, les questions d'intégration ne concernent pas uniquement l'énergie éolienne. Néanmoins, d'après les analyses et l'expérience concrète acquise essentiellement par certains pays de l'OCDE, il semble bien que, lorsque le niveau de pénétration de l'électricité éolienne est bas ou moyen (niveau défini à 20 % ou moins de la demande moyenne totale annuelle en énergie électrique)[12], l'intégration de l'énergie éolienne ne pose généralement pas de problèmes techniques insurmontables et est économiquement maîtrisable. Par ailleurs, même à un niveau bas ou moyen de pénétration de l'électricité éolienne, certaines difficultés techniques et/ou institutionnelles (parfois propres au réseau) doivent être surmontées. Les inquiétudes concernant l'intégration de l'énergie éolienne – et les coûts connexes – iront croissant à mesure que l'énergie éolienne sera mise en valeur, et l'augmentation du niveau de pénétration dépendra ou bénéficiera de la mise à disposition de nouvelles options technologiques et institutionnelles, afin que la flexibilité soit améliorée et que l'équilibre entre l'offre et la demande soit maintenu, comme on le verra dans le chapitre 8 (section 8.2). [7.5]

Certaines caractéristiques de l'énergie éolienne présentent des problèmes d'intégration, et cet aspect doit être pris en compte dans la planification et l'exploitation des réseaux électriques, afin d'assurer une exploitation fiable et économique de ces réseaux. Il importe en particulier de prendre en compte le caractère localisé de la ressource éolienne, avec d'éventuelles répercussions sur les nouvelles infrastructures de transport de l'énergie éolienne terrestre et au large des côtes; la variabilité de la production d'électricité éolienne sur des échelles de temps multiples; et la moins bonne prévisibilité de la production d'électricité éolienne comparée à celle correspondant à de nombreux autres types de centrales électriques. La variabilité et l'incertitude globales de la production d'électricité éolienne dépendent en partie du degré de corrélation entre la production de différentes centrales éoliennes géographiquement dispersées: généralement, les niveaux de production des centrales éoliennes qui sont plus éloignées les unes des autres sont moins bien corrélés entre eux, et la variabilité sur des périodes courtes (minutes) est moins bien corrélée que la variabilité sur des périodes plus longues (plusieurs heures). Les prévisions de la production d'électricité éolienne sont également plus précises sur des périodes plus courtes et quand plusieurs centrales sont prises en compte ensemble. [7.5.2]

On procède à une planification détaillée des réseaux pour ce qui est des nouvelles infrastructures de production et de transport, afin de veiller à ce que les réseaux électriques puissent être exploités de façon fiable et économique à l'avenir. À cet effet, les planificateurs ont besoin de modèles de simulation informatisés qui puissent déterminer avec précision les caractéristiques de l'énergie éolienne. En outre, avec l'augmentation de la capacité électrique éolienne, il est de plus en plus nécessaire que les centrales éoliennes jouent un rôle accru dans le maintien de l'exploitabilité et de la qualité énergétique du réseau électrique, et des normes techniques pour le raccordement au réseau ont été mises en œuvre pour tenter d'éviter que les centrales éoliennes n'aient des effets néfastes sur le système électrique dans des conditions d'exploitation normales et lors de circonstances imprévues. Les évaluations de conformité concernant le transport, dans l'intervalle, doivent tenir compte de la dépendance des ressources éoliennes à l'égard des sites et prendre en considération tout compromis entre les coûts de l'expansion des réseaux de transport pour accéder à des ressources éoliennes de meilleure qualité et les coûts de l'accès à des ressources éoliennes de moins bonne qualité qui nécessitent moins d'investissements dans le transport. Même à un niveau bas ou moyen de pénétration de l'électricité éolienne, l'ajout de quantités importantes d'énergie éolienne terrestre ou au large des côtes dans des zones où les ressources éoliennes sont de meilleure qualité peut nécessiter des extensions ou des mises à niveau importantes du système de transport. Suivant le cadre juridique et règlementaire propre à la région, les obstacles institutionnels à l'extension du système de transport peuvent s'avérer importants. Enfin, les planificateurs doivent tenir compte de la variabilité de la production d'électricité éolienne lors de l'évaluation de la contribution de l'énergie éolienne à l'équilibre de l'offre et de la demande et donc à la fiabilité à long terme du réseau électrique. Bien que les méthodes et les objectifs varient d'une région à l'autre, la contribution de l'énergie éolienne à l'équilibre de l'offre et de la demande dépend généralement de la corrélation de la production d'électricité éolienne avec les périodes où le risque de pénurie d'approvisionnement est élevé, en général quand la demande d'électricité est forte. La contribution marginale de l'énergie éolienne à l'équilibre de l'offre et de la demande se réduit généralement à mesure que la pénétration de l'électricité éolienne progresse, mais le regroupement des centrales éoliennes sur des zones plus grandes peut limiter ce recul si la capacité de transport est suffisante. Le fait que la contribution moyenne de l'énergie éolienne à l'équilibre de l'offre et de la demande est relativement basse (par rapport aux unités fossiles) semble indiquer que les réseaux électriques disposant de grandes quantités d'énergie éolienne auront également tendance à avoir une capacité installée totale de production plus élevée pour répondre à la même demande d'électricité en période de pointe que les réseaux électriques n'en disposant pas. Une partie de cette capacité de production fonctionnera cependant de façon très intermittente, et la part des autres formes de production tendra donc (pour des raisons économiques) à passer de plus en plus à des ressources de type «charge de pointe» ou «intermédiaires», en se détournant des ressources de type «charge de base». [7.5.2]

Les caractéristiques uniques de l'énergie éolienne ont également des incidences importantes sur l'exploitation des réseaux électriques. Étant donné que l'énergie éolienne est produite avec un coût d'exploitation marginal très bas, elle est généralement utilisée pour répondre à la demande quand elle est disponible; d'autres générateurs sont alors mis en place pour répondre à la demande, diminuée de toute énergie éolienne disponible (c'est-à-dire la «demande nette»). À mesure que la pénétration de l'électricité éolienne progresse, la variabilité de l'énergie éolienne entraîne une augmentation globale de l'ampleur des fluctuations de la demande nette ainsi qu'une baisse de la demande nette minimale. En conséquence, les prix de gros de l'électricité ont tendance à baisser quand la production d'électricité éolienne est élevée et que la capacité d'interconnexion avec d'autres marchés énergétiques est réduite, et on recourra à d'autres unités de production pour intervenir de façon plus souple qu'en l'absence d'énergie éolienne. À des niveaux de pénétration de l'électricité éolienne bas ou moyens, l'augmentation de la variabilité à la minute devrait être plutôt modérée. Les difficultés opérationnelles les plus grandes sont liées à la nécessité de gérer les variations de la production d'électricité éolienne sur une à six heures. La prise en compte de prévisions relatives à l'énergie éolienne

12 Ce niveau de pénétration a été déterminé pour établir une distinction indicative entre, d'une part, les besoins d'intégration pour ce qui est de l'énergie éolienne à relativement court terme et, d'autre part, les débats plus larges, ne concernant pas nécessairement l'énergie éolienne, sur l'évolution des réseaux électriques à plus long terme abordés au chapitre 8.

dans les opérations du réseau électrique peut contribuer à réduire le besoin de flexibilité de la part des autres générateurs. Toutefois, même avec des prévisions de grande qualité, les exploitants de réseau devront disposer d'un vaste éventail de stratégies pour maintenir activement l'équilibre de l'offre et de la demande, notamment en ayant recours à des technologies flexibles de production d'électricité, à la réduction de la production éolienne et à une meilleure coordination et interconnexion entre les réseaux électriques. La réponse à la demande des marchés de masse, les technologies de stockage de l'énergie, le déploiement à grande échelle des véhicules électriques et les contributions qu'ils peuvent apporter à la flexibilité du système grâce au chargement maîtrisé des batteries, la réorientation de l'énergie éolienne excédentaire vers la production de combustibles ou le chauffage local et la diversification géographique des implantations de centrales éoliennes apporteront de plus en plus d'avantages à mesure que la pénétration de l'électricité éolienne augmentera. Malgré les difficultés, les expériences actuelles d'exploitation dans différentes régions du monde prouvent que les réseaux électriques peuvent fonctionner de façon fiable avec une contribution accrue de l'énergie éolienne; dans quatre pays (Danemark, Portugal, Espagne et Irlande), l'énergie éolienne pouvait déjà satisfaire en 2010 de 10 à 20 % environ de la demande d'électricité annuelle. L'expérience est cependant limitée, notamment en cas de défaillance des réseaux à des niveaux élevés de pénétration instantanée, mais à mesure que l'énergie éolienne sera mise en valeur dans des régions et systèmes électriques divers, on en apprendra davantage sur l'intégration de cette forme d'énergie. [7.5.3]

Outre les expériences d'exploitation actuelles, un certain nombre d'études de grande qualité ont été réalisées sur le développement nécessaire des ressources en matière de transport et de production pour pouvoir intégrer l'énergie éolienne. Si ces études, qui concernent essentiellement les pays de l'OCDE, recourent à des méthodes très diverses et poursuivent des objectifs variés, leurs résultats démontrent que le coût de l'intégration d'un maximum de 20 % d'énergie éolienne est, dans la plupart des cas, modeste mais pas anodin. Notamment, lorsque le niveau de pénétration de l'électricité éolienne est bas ou moyen, les études disponibles (qui proviennent là encore essentiellement d'un petit nombre de pays de l'OCDE) indiquent que les coûts supplémentaires liés à la gestion de la variabilité et de l'incertitude des réseaux électriques de manière à garantir l'équilibre de l'offre et de la demande et à la mise en place de nouvelles infrastructures de transport permettant de mieux prendre en charge l'énergie éolienne varient selon le réseau, mais se situent généralement dans une fourchette de 0,7 à 3 cents É. $U._{2005}$/kWh. De plus, les difficultés techniques et les coûts d'intégration ont tendance à augmenter avec la pénétration de l'électricité éolienne. [7.5.4]

7.6 Conséquences environnementales et sociales

L'énergie éolienne dispose d'un potentiel important de réduction des émissions de GES (et les réduit d'ailleurs déjà). De plus, les efforts menés pour mesurer les conséquences relatives des différentes technologies de production d'électricité indiquent que l'énergie éolienne a généralement une empreinte environnementale comparativement faible [9.3.4, 10.6]. Cependant, comme d'autres activités industrielles, l'énergie éolienne peut avoir des effets néfastes sur l'environnement et sur les activités et le bien-être des êtres humains, et de nombreuses autorités locales et nationales ont mis en place des prescriptions en matière de planification et d'implantation pour réduire ces effets. À mesure que l'énergie éolienne se développe et que les centrales éoliennes deviennent plus grandes, les préoccupations existantes se font plus vives, et de nouvelles peuvent surgir. [7.6]

Bien que les principaux avantages environnementaux de l'énergie éolienne découlent de la réduction de la production d'électricité à partir de centrales alimentées par des combustibles fossiles, toute estimation de ces avantages se complique quelque peu en raison des caractéristiques d'exploitation du réseau électrique et des décisions d'investissement qui sont prises au sujet des nouvelles centrales. À court terme, le développement de l'énergie éolienne aura tendance à réduire l'activité des centrales à combustibles fossiles. À plus long terme, cependant, de nouvelles centrales de production pourraient s'avérer nécessaires, et la présence de l'énergie éolienne peut influer sur le type de centrales à construire. Les conséquences de la fabrication, du transport, de l'installation, de l'exploitation et du démantèlement des éoliennes doivent aussi être prises en compte, mais un examen approfondi des études disponibles montre que l'énergie utilisée et les émissions de GES produites au cours de ces étapes sont faibles par rapport à l'énergie générée et aux émissions évitées pendant la durée de vie des centrales éoliennes. Selon les estimations, l'intensité des émissions de GES dues à l'énergie éolienne est comprise entre 8 et 20 g CO_2/kWh dans la plupart des cas, tandis que le temps de retour énergétique se situe entre 3,4 et 8,5 mois. En outre, il s'avère que la gestion de la variabilité de la production d'électricité éolienne ne réduit pas notablement les avantages de l'énergie éolienne en matière d'émissions de GES. [7.6.1]

D'autres études se sont penchées sur les conséquences écologiques locales de la mise en valeur de l'énergie éolienne. La construction et l'exploitation de centrales éoliennes terrestres et au large des côtes ont des effets sur la faune en raison des collisions d'oiseaux et de chauves-souris et des modifications des habitats et écosystèmes, la nature et l'ampleur de ces conséquences dépendant du site et des espèces. En ce qui concerne l'énergie éolienne au large des côtes, il est nécessaire de prendre en considération les incidences sur les ressources benthiques, les pêches et la faune et la flore marines en général. Des recherches sont également en cours au sujet des conséquences éventuelles des centrales éoliennes pour le climat local. Les décès d'oiseaux et de chauves-souris en raison de collisions avec les éoliennes sont l'une des préoccupations environnementales dont on parle le plus. Bien que beaucoup de zones d'ombre subsistent quant à la nature de ces incidences et à leurs conséquences pour les populations concernées, le taux de mortalité aviaire se situerait annuellement entre 0,95 et 11,67 par MW. Les collisions mortelles avec des rapaces, bien qu'elles soient moins nombreuses en valeur absolue, soulèvent des préoccupations particulières dans certains cas, et l'augmentation de la production éolienne au large des côtes a également suscité des préoccupations concernant les oiseaux de mer. Les décès de chauves-souris n'ont pas fait l'objet de recherches aussi poussées, mais le taux de mortalité se situerait dans une fourchette annuelle de 0,2 à 53,3 par MW; les effets des centrales éoliennes sur les chauves-souris suscitent actuellement une préoccupation particulière. L'ampleur des collisions d'oiseaux et de chauves-souris et leurs répercussions sur les populations concernées peuvent être également étudiées en parallèle avec les autres décès causés par des activités humaines. Le nombre des décès d'oiseaux causés par les centrales éoliennes existantes semble inférieur de plusieurs ordres de grandeur à celui des décès d'oiseaux dus à d'autres causes anthropiques. Il semblerait en outre que les centrales éoliennes au large des côtes ne causent pas de diminutions notables des populations aviaires, et les autres options en matière d'approvisionnement en énergie ont également des incidences sur les oiseaux et les chauves-souris en raison des collisions, des modifications d'habitats et de leur contribution aux changements climatiques. Il est nécessaire d'améliorer les méthodes d'évaluation des effets sur les populations d'espèces spécifiques et de leur éventuelle atténuation, mais aussi de procéder

à des comparaisons rigoureuses entre les conséquences de l'énergie éolienne et celles des autres modes d'alimentation en électricité. [7.6.2]

Les centrales éoliennes peuvent également avoir un impact sur les habitats et les écosystèmes en obligeant la faune et la flore à éviter une zone ou à s'en éloigner, en détruisant des habitats et en gênant la reproduction. En outre, les effets des centrales éoliennes sur la faune et la flore marines suscitent une attention accrue depuis que le développement des éoliennes au large des côtes s'intensifie. Les conséquences de l'énergie éolienne au large des côtes sur la faune et la flore marines varient entre les phases d'installation, d'exploitation et de démantèlement; elles dépendent grandement des conditions propres au site et peuvent être négatives ou positives. Parmi les conséquences négatives potentielles figurent les vibrations et sons sous-marins, les champs électromagnétiques, les obstacles physiques et l'établissement d'espèces envahissantes. Les structures physiques peuvent en revanche créer de nouvelles aires de reproduction ou de nouveaux abris et servir de récifs artificiels ou de dispositifs de concentration de poissons. Des recherches supplémentaires s'imposent à propos de ces conséquences et de leurs répercussions à long terme et sur les niveaux de population, qui ne semblent cependant pas disproportionnées par rapport à celles de l'énergie éolienne terrestre. [7.6.2]

D'après les sondages, l'énergie éolienne est toujours bien acceptée du grand public. Toutefois, transformer ce soutien en une accélération de la mise en valeur de cette énergie nécessite souvent l'appui des collectivités locales d'accueil et/ou des autorités responsables. Ainsi, outre les préoccupations écologiques, certaines inquiétudes sont souvent formulées à propos des incidences des centrales éoliennes sur les communautés locales. Plus important encore, peut-être, la technologie éolienne moderne nécessite d'immenses structures, et les éoliennes sont inévitablement visibles dans le paysage. D'autres sujets de préoccupation concernent les usages terrestres et maritimes (notamment les éventuelles interférences avec les radars), les conséquences à proximité (bruit, papillotements, etc.) et les effets sur la valeur des propriétés. Quels que soient le type et l'ampleur des préoccupations d'ordre environnemental et social, il est indispensable de les prendre en compte pour que le processus de planification de la production et d'implantation des centrales soit un succès, et la participation des résidents locaux fait souvent partie intégrante de ce processus. Bien que certaines de ces inquiétudes puissent être apaisées sans difficulté, d'autres – comme les conséquences visuelles – sont plus difficiles à tempérer. Il est nécessaire de faire des efforts pour mieux comprendre la nature et l'ampleur des répercussions restantes ainsi que pour les réduire au minimum, à mesure que l'énergie éolienne se développe. Dans la pratique, les réglementations concernant la planification et l'implantation varient considérablement d'un endroit à un autre, et les procédures de planification et d'implantation font parfois obstacle au développement de l'énergie éolienne dans certains pays et contextes. [7.6.3]

7.7 Perspectives d'améliorations et d'innovations technologiques

Ces trente dernières années, les innovations en matière de conception des éoliennes ont permis d'importantes réductions des coûts. Les programmes publics et privés de recherche-développement ont joué un rôle majeur dans ces avancées techniques, conduisant à des perfectionnements techniques au niveau des systèmes et de leurs composantes ainsi qu'à des améliorations dans des domaines tels que l'évaluation des ressources, les normes techniques, l'intégration aux réseaux électriques ou les prévisions en matière d'énergie éolienne. De 1974 à 2006, les budgets gouvernementaux de recherche-développement en matière d'énergie éolienne dans les pays membres de l'AIE ont totalisé 3,8 milliards de dollars É.-U.$_{2005}$, ce qui représente 1 % des dépenses totales de recherche-développement dans le domaine de l'énergie. En 2008, les financements des pays de l'OCDE dans la recherche sur l'énergie éolienne se sont élevés à 180 millions de dollars É.-U.$_{2005}$. [7.7, 7.7.1]

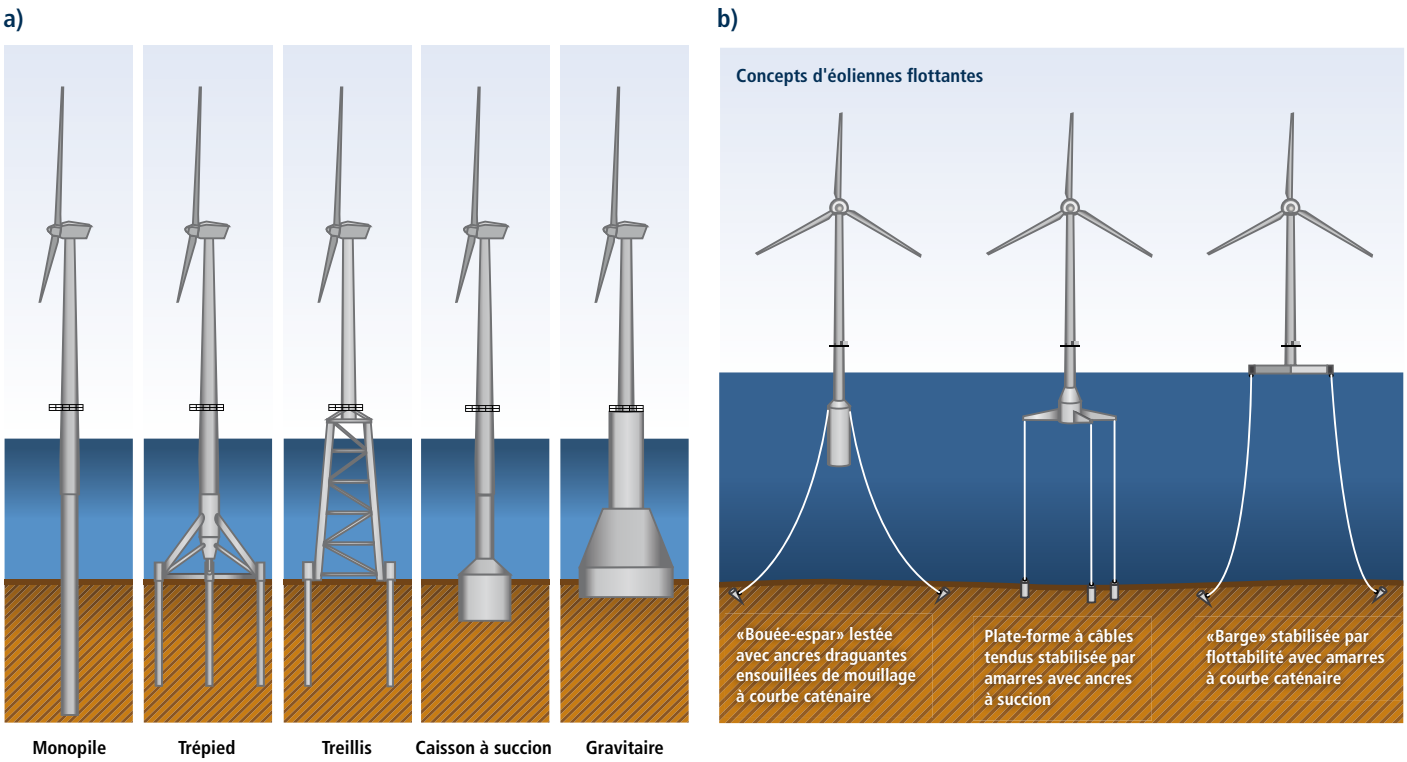


Figure TS.7.4 | Concepts de fondations pour éoliennes au large des côtes: a) concepts à court terme et b) concepts d'éoliennes flottantes au large des côtes. [Figure 7.19]

Bien que la technologie éolienne terrestre soit déjà produite commercialement et déployée à grande échelle, des progrès réguliers devraient se traduire par une amélioration des modes de conception des turbines, une utilisation plus efficace des matériaux, une fiabilité et un captage de l'énergie plus grandes, des coûts d'exploitation et de maintenance réduits et une durée de vie accrue des composantes. De plus, alors que l'énergie éolienne au large des côtes suscite une attention de plus en plus grande, de nouveaux défis technologiques se manifestent et des innovations techniques plus radicales sont possibles. Les centrales et turbines éoliennes sont des systèmes complexes qui nécessitent une approche intégrée de la conception, afin d'optimiser les coûts et les performances. Sur le plan de la centrale, il faut tenir compte du fait que l'éolienne choisie doit être adaptée à un régime particulier de ressource éolienne, mais aussi prendre en considération les procédures d'implantation, d'espacement et d'installation des éoliennes, les méthodes d'exploitation et de maintenance et l'intégration au réseau électrique. Des études ont défini plusieurs domaines dans lesquels les progrès techniques pourraient entraîner des changements en ce qui concerne le coût d'investissement, la production énergétique annuelle, la fiabilité, les coûts d'exploitation et de maintenance et l'intégration de l'énergie éolienne aux réseaux électriques. [7.3.1, 7.7.1, 7.7.2]

Au niveau des composantes, différentes pistes sont étudiées, et notamment: de nouveaux concepts de mâts qui limitent le recours au grandes grues et réduisent au minimum la demande de matériaux; des rotors et pales améliorés, grâce à une meilleure conception, couplée à des matériaux de meilleure qualité et à des méthodes de fabrication perfectionnées; une réduction des pertes d'énergie et une plus grande disponibilité grâce à un contrôle plus rigoureux des turbines et à un meilleur suivi des conditions; des organes de transmission, des générateurs et de l'électronique de puissance plus avancés; et des améliorations en matière d'apprentissage de la fabrication. [7.7.3]

En outre, il existe plusieurs domaines d'amélioration potentielle qui sont plus spécifiques à l'énergie éolienne au large des côtes, notamment les procédures d'exploitation et de maintenance, les modes d'installation et d'assemblage, la conception des structures de soutien et la mise au point de turbines plus grandes, éventuellement avec de nouveaux concepts de turbine. Les innovations en matière de structures de fondation, en particulier, offrent la possibilité d'accéder à des eaux plus profondes, accroissant ainsi le potentiel technique de l'énergie éolienne. Si la plupart des éoliennes au large des côtes ont d'abord été installées dans des eaux relativement peu profondes – moins de 30 mètres de profondeur – sur une structure monopieu qui constitue essentiellement une extension du mât, les structures gravitaires sont cependant de plus en plus courantes. Ces approches, ainsi que d'autres concepts mieux adaptés aux eaux plus profondes, comme les plates-formes flottantes, sont illustrées à la figure TS.7.4. De plus, la taille des éoliennes au large des côtes n'est pas limitée de la même manière que celle des éoliennes terrestres, et le coût relativement plus élevé des fondations au large des côtes justifie l'installation d'éoliennes plus grandes. [7.7.3]

Les éoliennes sont conçues pour résister à un large éventail de conditions difficiles avec une surveillance minimale. Des efforts soutenus sont donc nécessaires pour acquérir une meilleure compréhension en profondeur de l'environnement dans lequel les éoliennes sont exploitées, afin d'ouvrir la voie à une nouvelle génération de turbines fiables, sûres et rentables et d'optimiser davantage l'implantation et la conception des centrales éoliennes. Les recherches menées dans les domaines de l'aéroélasticité, de l'aérodynamique instationnaire, de l'aéroacoustique, des systèmes de contrôle avancés et des sciences de l'atmosphère, par exemple, devraient aboutir à une amélioration des outils de conception et, par là-même, renforcer la fiabilité de la technologie et favoriser de nouvelles innovations en matière de conception. Ce genre de recherche fondamentale permettra d'améliorer la

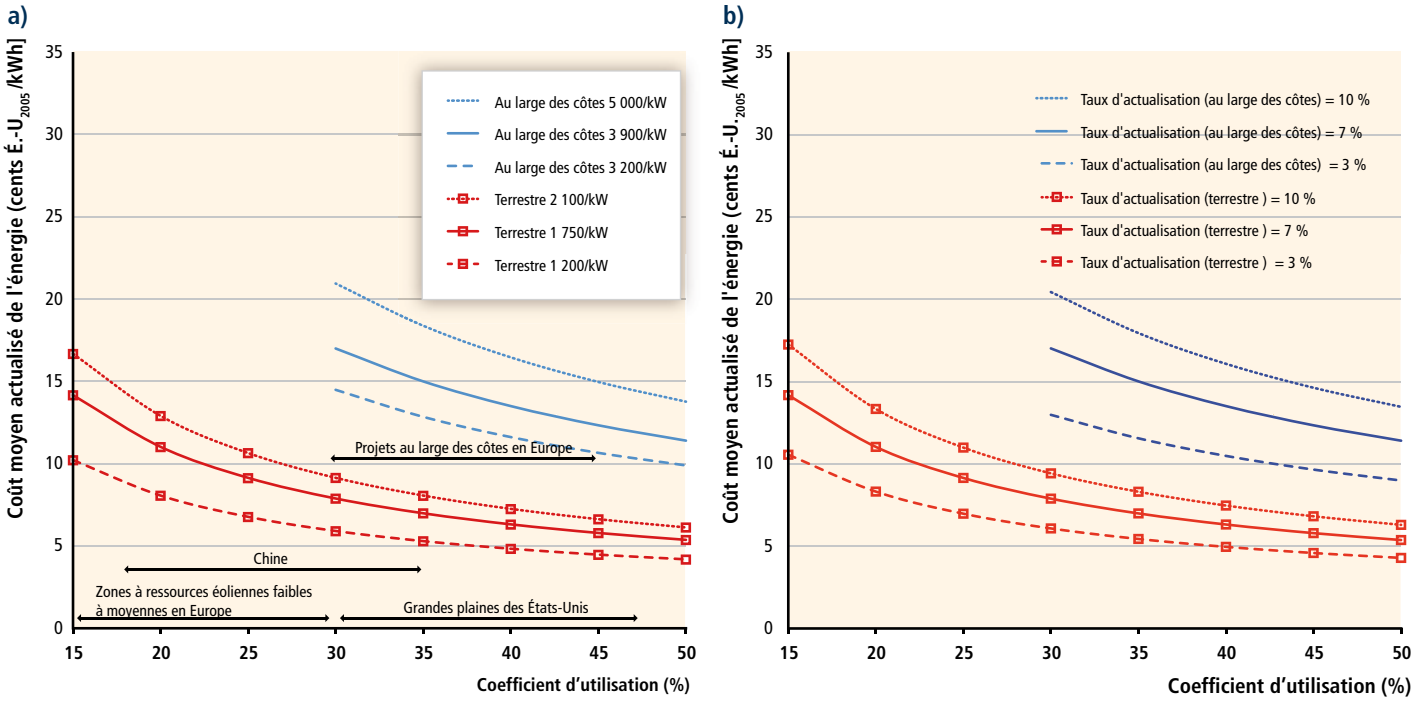


Figure TS.7.5 | Estimations du coût moyen actualisé de l'énergie éolienne terrestre et au large des côtes, 2009: a) en fonction du coefficient d'utilisation et du coût d'investissement* et (b) en fonction du coefficient d'utilisation et du taux d'actualisation**. [Figure 7.23]

Notes: * Avec un taux d'actualisation hypothétique de 7%.** Avec un coût d'investissement hypothétique de 1 750 dollars É.-U.$_{2005}$/kW pour les centrales terrestres et de 3 900 dollars É.-U.$_{2005}$/kW pour les centrales au large des côtes.

conception des éoliennes, les estimations des performance des centrales éoliennes, les évaluations de la ressource éolienne, les prévisions à court terme de l'énergie éolienne et les estimations des incidences d'une mise en valeur à grande échelle de cette forme d'énergie sur le climat local ainsi que des éventuelles répercussions des changements climatiques sur les ressources éoliennes. [7.7.4]

7.8 Évolution des coûts

Bien que le coût de l'énergie éolienne ait connu une baisse importante depuis les années 1980, des mesures de politique générale sont actuellement nécessaires pour assurer une mise en valeur rapide dans la plupart des régions du globe. Dans certaines régions bénéficiant de bonnes ressources éoliennes, le coût de l'énergie éolienne est cependant compétitif par rapport aux prix du marché actuels de l'énergie, même si l'on ne tient pas compte des conséquences environnementales connexes. De plus, des progrès techniques réguliers sont prévus, qui devraient accélérer la réduction de ce coût. [7.8]

Le coût moyen actualisé de l'énergie produite par des centrales éoliennes terrestres et au large des côtes dépend de cinq facteurs principaux: la production énergétique annuelle, les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et de maintenance, les coûts de financement et la durée de vie économique escomptée de la centrale électrique.[13] A partir des années 1980 jusqu'à l'année 2004 environ, les coûts d'investissement des centrales éoliennes terrestres ont chuté, avant d'augmenter de 2004 à 2009, notamment pour les raisons suivantes: augmentation du coût de la main d'œuvre et des matières utilisées; augmentation des marges bénéficiaires des fabricants d'éoliennes et de leurs fournisseurs; force relative de l'euro; et augmentation de la taille des rotors de turbines et de la hauteur des mâts. En 2009, le coût d'investissement moyen des centrales éoliennes terrestres installées dans le monde entier était d'environ 1 750 dollars É.-U.$_{2005}$/kW, beaucoup de centrales ayant un coût d'investissement compris entre 1 400 et 2 100 dollars É.-U.$_{2005}$/kW; en Chine, les coûts d'investissement en 2008 et 2009 tournaient autour de 1 000 à 1 350 dollars É.-U.$_{2005}$/kW. L'expérience est bien moindre dans le cas des centrales éoliennes au large des côtes, dont le coût d'investissement dépend largement du site d'implantation. Néanmoins, ce coût est traditionnellement supérieur de 50 % à plus de 100 % à celui des centrales terrestres; les coûts d'exploitation et de maintenance sont aussi plus élevés dans le cas des centrales au large des côtes. Les coûts de ces centrales sont également influencés par certains des facteurs qui sont à l'origine de la hausse des coûts des centrales terrestres entre 2004 et 2009, ainsi que par plusieurs autres facteurs qui leur sont propres. Le coût d'investissement des centrales au large des côtes installées tout dernièrement ou dont l'installation a été annoncée serait de l'ordre de 3 200 à 5 000 dollars É.-U.$_{2005}$/kW. Bien que les centrales au large des côtes soient mises en place à des profondeurs d'eau de plus en plus grandes, la majorité des centrales en exploitation ont été installées dans des eaux relativement peu profondes. La performance des centrales éoliennes dépend largement du site et est principalement tributaire des caractéristiques du régime éolien local, tout en étant également subordonnée à l'optimisation de la conception, aux performances et à la disponibilité des éoliennes ainsi qu'à l'efficacité des modes d'exploitation et de maintenance. La performance varie donc selon le site, mais s'est aussi généralement améliorée avec le temps. Les centrales éoliennes au large des côtes bénéficient souvent de meilleures ressources éoliennes. [7.8.1–7.8.3]

13 La compétitivité économique de l'énergie éolienne par rapport aux autres sources d'énergie, qui doit nécessairement prendre en compte d'autres facteurs tels que les subventions et les effets sur l'environnement, n'est pas traitée dans le présent chapitre.

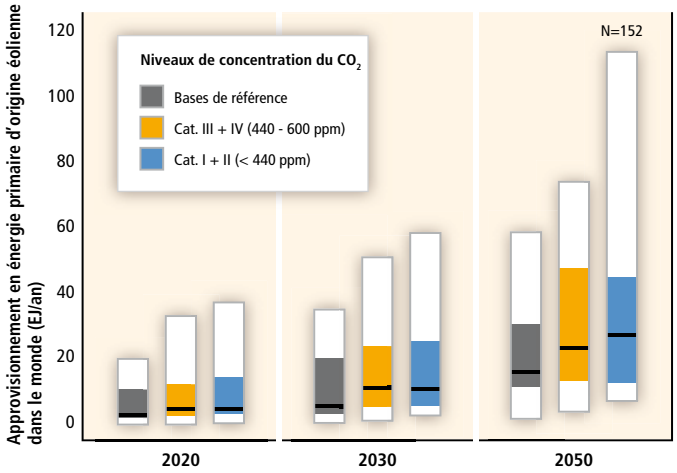


Figure TS.7.6 | Approvisionnement en énergie primaire d'origine éolienne dans le monde selon des scénarios à long terme (médiane, fourchette comprise entre le 25e et le 75e percentile et fourchette complète des résultats des scénarios; le codage couleur correspond aux diverses catégories de niveaux de concentration de CO_2 en 2100; le nombre précis de scénarios pris en compte pour la figure est indiqué dans le coin supérieur droit). [Figure 7.24]

Sur la base d'une méthodologie normalisée définie à l'annexe II et des données de coût et de performance résumées à l'annexe III, le coût moyen actualisé de l'énergie éolienne, pour un large éventail de paramètres d'entrée, est estimé à une valeur comprise entre 3,5 et 17 cents É.-U.$_{2005}$/kWh pour les centrales terrestres et entre 7,5 et 23 cents É.-U.$_{2005}$/kWh pour les centrales au large des côtes. [1.3.2, 10.5.1, annexe II, annexe III]

La figure TS.7.5 présente le coût moyen actualisé de l'énergie éolienne calculé selon un ensemble de paramètres légèrement différents et montre que ce coût varie considérablement en fonction des coûts d'investissement, de la production énergétique et des taux d'actualisation supposés. Pour l'énergie éolienne terrestre, les estimations concernent les centrales construites en 2009; pour l'énergie éolienne au large des côtes, les estimations concernent les centrales construites de 2008 à 2009 ainsi que les centrales dont l'achèvement était prévu au début des années 2010. Le coût moyen actualisé de l'énergie éolienne terrestre pour des régimes de ressources éoliennes bons à excellents est estimé en moyenne à 5 à 10 cents É.-U.$_{2005}$/kWh environ et peut atteindre plus de 15 cents É.-U.$_{2005}$/kWh dans les zones où les ressources sont moindres. Bien que les estimations de coût pour l'énergie éolienne au large des côtes soient plus incertaines, on estime que le coût moyen actualisé type se situe dans une fourchette de 10 à plus de 20 cents É. U.$_{2005}$/kWh pour les centrales récemment construites ou planifiées qui se situent dans des eaux relativement peu profondes. Là où les ressources éoliennes terrestres exploitables sont limitées, les centrales au large des côtes peuvent parfois concurrencer les centrales terrestres. [7.8.3, annexe II, annexe III]

Plusieurs études ont établi des projections d'évolution des coûts pour l'énergie éolienne terrestre et au large des côtes, en se fondant sur différentes combinaisons d'estimations de courbes d'apprentissage, de prototypes et/ou de jugements d'experts. Dans ces études, l'année de départ des prévisions, les approches méthodologiques et le niveau hypothétique de mise en valeur de l'énergie éolienne varient. Néanmoins, un examen de cette documentation appuie l'idée selon laquelle, avec plus de recherche-développement, d'essais et d'expérience, le coût moyen actualisé de l'énergie éolienne terrestre pourrait diminuer de 10 à 30 % d'ici 2020. On s'attend à ce que l'énergie éolienne au large des côtes connaisse une baisse encore plus importante, de l'ordre de 10 à 40 % d'ici 2020, bien que certaines études présentent des scénarios dans lesquels des facteurs de marché entraînent des augmentations de coût à court ou moyen terme. [7.8.4]

7.9 Potentiel de mise en valeur

Compte tenu de la maturité commerciale et du coût de la technologie éolienne terrestre, le recours croissant à l'énergie éolienne permet d'envisager des réductions importantes à court terme des émissions de GES: ce potentiel n'est pas tributaire de progrès techniques quelconques, et il n'existe aucun obstacle technique insurmontable qui empêche la pénétration de l'énergie éolienne de progresser dans les réseaux de distribution d'électricité. Par conséquent, de nombreuses études estiment qu'à court ou moyen terme, l'augmentation rapide qu'a connue la capacité éolienne entre 2000 et 2009 se poursuivra. [7.9, 7.9.1]

En outre, plusieurs études ont évalué le potentiel à plus long terme de l'énergie éolienne, souvent dans le cadre de scénarios de stabilisation de la concentration de GES [10.2, 10.3]. Après un examen de ces études (qui comprennent 164 scénarios à long terme différents), et comme le résume la figure TS.7.6, on estime que l'énergie éolienne pourrait jouer un rôle majeur à long terme dans la réduction des émissions mondiales de GES. D'ici à 2050, la valeur médiane de la contribution de l'énergie éolienne, selon les scénarios correspondant à une fourchette de stabilisation de la concentration de GES comprise entre 440 et 600 ppm de CO_2 et inférieure à 440 ppm de CO_2, varie de 23 à 27 EJ/an (6 500 à 7 600 TWh/an), cette contribution passant à une valeur de 45 à 47 EJ/an pour le 75^e percentile des scénarios (12 400 à 12 900 TWh/an) et atteignant plus de 100 EJ/an dans l'étude la plus favorable (31 500 TWh/an). Pour que cette contribution se concrétise, il faudrait que l'énergie éolienne assure environ 13 à 14 % de l'approvisionnement mondial en électricité d'ici 2050 selon le résultat du scénario médian, part qui passerait à 21 à 25 % pour le 75^e percentile des scénarios passés en revue. [7.9.2]

Pour atteindre la partie supérieure de cette fourchette d'utilisation de l'énergie éolienne à l'échelle du globe, il faudrait non seulement des politiques de soutien économique d'une envergure et d'une prévisibilité appropriées, mais aussi une intensification de l'utilisation de l'énergie éolienne au niveau régional, un recours accru à l'énergie éolienne au large des côtes dans certaines régions, des solutions techniques et institutionnelles aux problèmes de transport de l'énergie et d'intégration opérationnelle ainsi que des efforts de prévention pour gérer et atténuer les préoccupations sociales et environnementales. L'augmentation des dépenses de recherche-développement devrait entraîner des réductions graduelles des coûts pour l'énergie éolienne terrestre, mais pourrait surtout avoir des effets sur la technologie de l'énergie éolienne au large des côtes. Enfin, pour les marchés disposant d'un bon potentiel de ressources éoliennes mais où l'énergie éolienne est mise en valeur depuis peu, des transferts de connaissances et de technologies pourraient faciliter l'installation à court terme de centrales éoliennes. [7.9.2]

8. Intégration des énergies renouvelables dans les systèmes énergétiques actuels et à venir

8.1 Introduction

Dans de nombreux pays, les systèmes de production d'énergie ont évolué au cours des décennies, ce qui a permis, grâce à la répartition efficace – notamment en matière de coût – des vecteurs énergétiques que sont l'électricité, le gaz et la chaleur ainsi qu'à ceux utilisés pour les transports, de fournir des services énergétiques appropriés

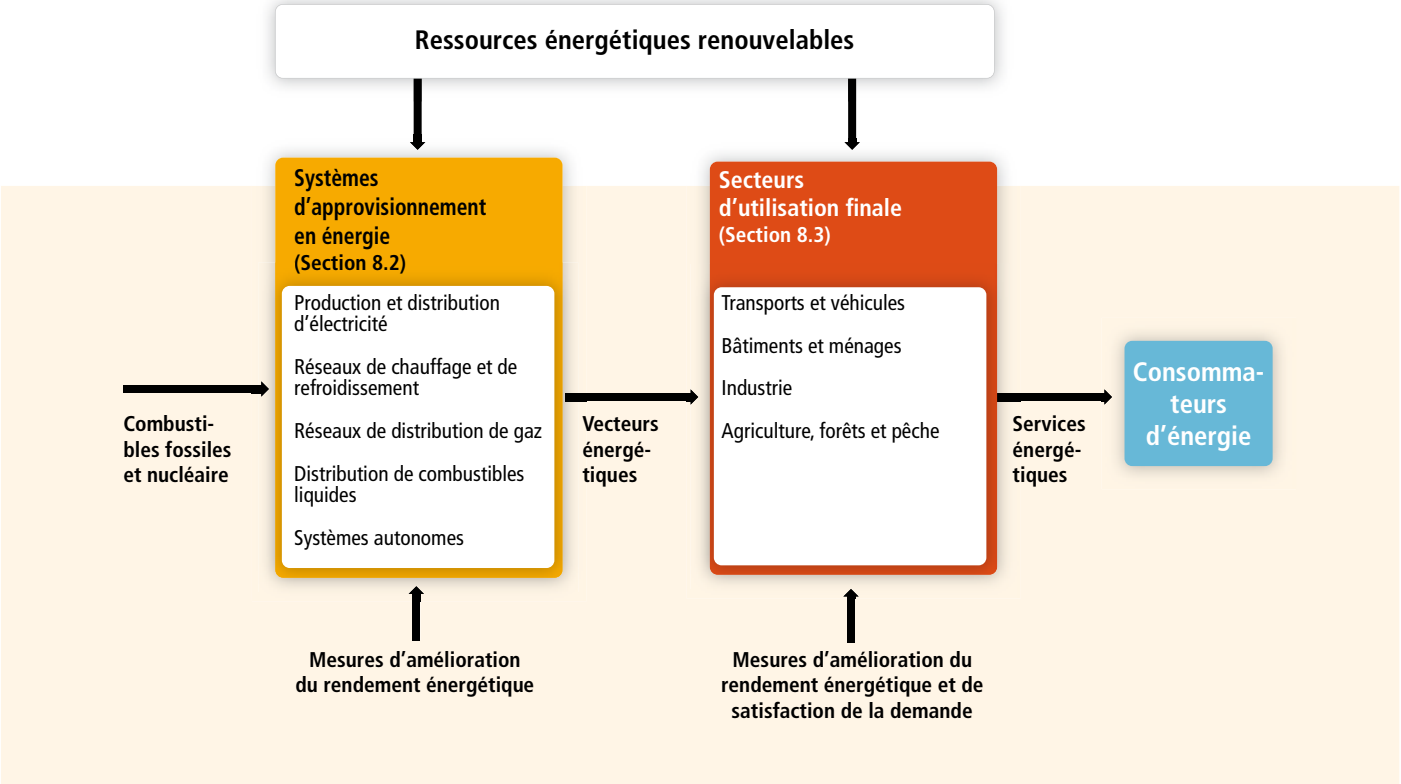


Figure TS.8.1 | Modes d'intégration des ÉR en vue de la fourniture de services énergétiques soit aux systèmes d'approvisionnement en énergie, soit sur site à l'intention des secteurs d'utilisation finale. [Figure 8.1]

aux utilisateurs finals. Pour passer à un avenir énergétique caractérisé par de faibles émissions de carbone et faisant largement appel aux ÉR, il faudra peut-être réaliser des investissements considérables dans de nouvelles technologies et infrastructures axées sur ces formes d'énergie, et en particulier dans des réseaux de distribution d'électricité plus souples, des systèmes de chauffage et de refroidissement urbains de plus grande envergure, des systèmes de distribution pour les gaz et les combustibles liquides issus d'ÉR, des systèmes de stockage d'énergie, des modes de transport inédits et des réseaux électriques et systèmes de contrôle distribués novateurs dans les bâtiments. Une meilleure intégration des ÉR peut permettre de fournir toute la gamme des services énergétiques aux communautés, grandes ou petites, des pays développés ou en développement. Indépendamment du système d'approvisionnement en énergie existant, que ce soit dans des communautés richement ou chichement dotées en énergie, tout semble indiquer qu'à long terme et grâce à des mesures appropriées en matière de planification et d'intégration des systèmes, il y a peu de limites techniques (si tant est qu'il y en ait) à l'augmentation de la part des ÉR aux niveaux national, régional et local ou dans les bâtiments, même s'il est possible qu'il faille surmonter d'autres obstacles. [8.1, 8.2]

Les systèmes d'approvisionnement en énergie évoluent constamment dans le but d'accroître le rendement des techniques de conversion, de réduire les pertes et d'abaisser les coûts de la prestation de services énergétiques aux utilisateurs finals. Pour fournir davantage de chauffage, de refroidissement, de carburants et d'électricité à partir d'ÉR, il faudra peut-être modifier progressivement les politiques, les marchés et les systèmes de production d'énergie existants, afin de leur permettre de s'accommoder de taux supérieurs de mise en valeur et d'assurer ainsi un meilleur approvisionnement en ÉR. [8.1]

Tous les pays ont accès à des ressources énergétiques renouvelables, qui sont d'ailleurs abondantes en de nombreux endroits du globe. Nombre de ces ressources ont des caractéristiques qui les distinguent des combustibles fossiles et des systèmes nucléaires: ainsi, certaines, comme l'énergie solaire ou l'énergie marine, ont une vaste répartition géographique, tandis que d'autres, comme l'énergie hydroélectrique à grande échelle, sont limitées par leur situation géographique, ce qui fait que leurs possibilités d'intégration sont plus centralisées. Certaines de ces ressources sont variables, et leur prévisibilité est limitée. D'autres ont une densité énergétique plus faible et des spécifications techniques différentes de celles des combustibles fossiles solides, liquides ou gazeux. Ces caractéristiques risquent de compliquer l'intégration des ressources énergétiques renouvelables et impliquent des coûts systémiques supplémentaires, surtout lorsque la proportion des ÉR s'accroît. [8.1, 8.2]

Le chapitre 8 s'articule autour de l'idée selon laquelle les ressources énergétiques renouvelables peuvent être utilisées via leur intégration dans des réseaux d'approvisionnement énergétique qui fournissent de l'énergie aux consommateurs par le biais de vecteurs d'énergie incorporant une proportion variable d'ÉR ou via leur intégration directe dans les secteurs d'utilisation finale que sont les transports, les bâtiments, l'industrie et l'agriculture (figure TS.8.1). [8.2, 8.3]

Les conditions générales et particulières qui permettent de mieux intégrer les ÉR dans les systèmes d'approvisionnement en énergie sont assez bien comprises. Cependant, étant donné que les facteurs d'intégration dépendent généralement du site, il existe peu d'analyses portant sur les coûts supplémentaires habituellement induits par les possibilités d'intégration de ces énergies, et il faudra donc mener des travaux de recherche pour pouvoir modéliser des scénarios. Par exemple, on ne voit pas encore clairement de quelle façon une éventuelle évolution vers des systèmes d'approvisionnement en énergie plus décentralisés pourrait influer sur les coûts futurs de développement de nouveaux systèmes d'alimentation thermique et électrique centralisés ou sur la possibilité de ne pas devoir construire de nouvelles infrastructures. [8.2]

Les systèmes énergétiques centralisés, qui fonctionnent principalement au moyen de combustibles fossiles, ont évolué pour fournir aux utilisateurs finals des services énergétiques d'un rapport coût-efficacité raisonnable grâce à une série de vecteurs d'énergie comprenant, entre autres, les combustibles solides, liquides ou gazeux, l'électricité et la chaleur. Pour mettre davantage en valeur les technologies ÉR, il faut intégrer celles-ci dans les systèmes déjà en place en surmontant les obstacles techniques, économiques, environnementaux et sociaux qui leur sont associés. L'avènement de systèmes énergétiques décentralisés pourrait ouvrir de nouvelles possibilités d'application. [8.1, 8.2]

Dans certaines régions, les réseaux électriques alimentés par des ÉR pourraient devenir le principal mode d'approvisionnement énergétique, surtout si l'on a recours à l'électricité pour satisfaire la demande en matière de chauffage et de transports. Cette évolution pourrait être stimulée par le développement parallèle des véhicules électriques, l'emploi accru de l'électricité (y compris les pompes à chaleur) pour le chauffage et le refroidissement, des services souples de prise en compte de la demande (y compris l'usage de compteurs intelligents) et d'autres techniques innovantes. [8.1, 8.2.1.2, 8.2.2, 8.3.1–8.3.3]

Les divers systèmes énergétiques diffèrent très nettement d'un pays et d'une région du monde à l'autre, et chacun d'eux est complexe. Il faut donc adopter une série d'approches différentes pour encourager l'intégration des ÉR, qu'elle soit centralisée ou non. Avant de modifier en profondeur un système d'approvisionnement énergétique en intégrant davantage ces énergies, il convient d'évaluer soigneusement la disponibilité des ressources énergétiques renouvelables; la pertinence des technologies dont on dispose; les contraintes institutionnelles, économiques et sociales; les risques potentiels; et la nécessité de renforcer les capacités connexes et d'assurer une formation professionnelle en conséquence. [8.1, 8.2]

D'après la majorité des scénarios de stabilisation de la concentration de GES dans l'atmosphère aux alentours de 450 ppm éqCO_2, les ÉR représenteront plus de 50 % de l'énergie primaire à faible intensité de carbone en 2050. Cette transition peut être illustrée par de nombreux scénarios, l'exemple d'accroissement des parts de marché donné à la figure TS.8.2 étant tiré du "Scénario 450" des Perspectives énergétiques mondiales de l'AEI de 2010. Pour augmenter à ce point les proportions d'énergie primaire et de consommation issue des ÉR d'ici 2035, la croissance excédentaire annuelle moyenne de l'énergie primaire renouvelable devrait plus que tripler par rapport au niveau actuel pour s'établir à environ 4,0 EJ/an. [8.1, 10.2, 10.2.2.4]

Pour mieux mettre en valeur les ÉR dans les secteurs des transports, des bâtiments, de l'industrie et de l'agriculture, il s'agit de mieux en comprendre les éléments stratégiques ainsi que les aspects sociaux. Les voies à suivre pour augmenter la part de chacune des technologies ÉR par le biais de l'intégration dépendent du secteur considéré, de la technologie et de la région. L'objectif ultime devrait être de faciliter une intégration plus harmonieuse dans les systèmes d'approvisionnement énergétique et d'offrir de multiples avantages aux utilisateurs finals. [8.2, 8.3]

Plusieurs technologies ÉR arrivées à maturité ont déjà été intégrées avec succès dans toute une série de systèmes d'approvisionnement énergétique, pour la plupart dans des proportions assez modestes, bien que cette proportion puisse dépasser les 30 %

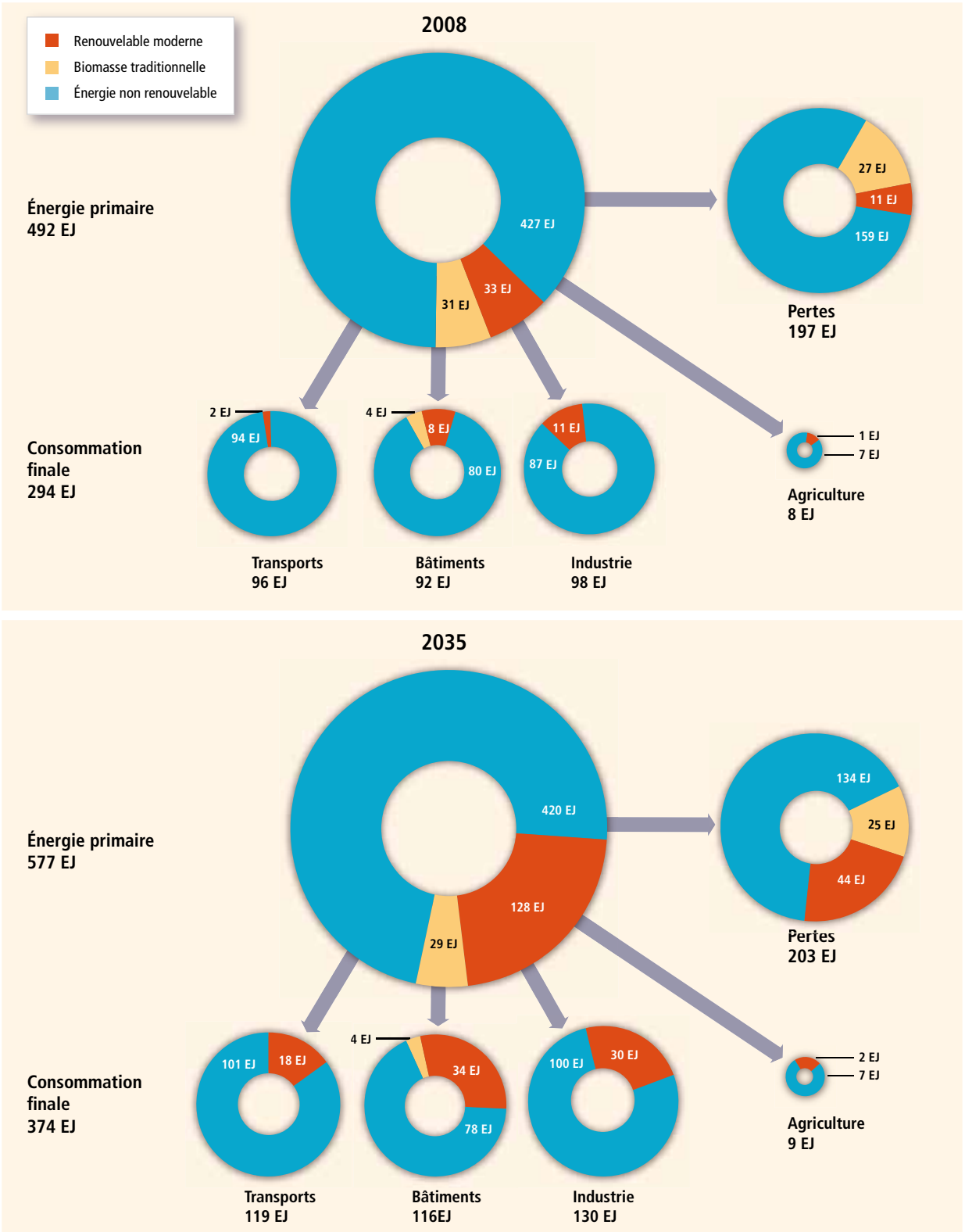


Figure TS.8.2 | Part des ÉR (en rouge) pour ce qui concerne l'énergie primaire et l'énergie au stade de la consommation finale dans les transports, les bâtiments (y compris la biomasse traditionnelle), l'industrie et l'agriculture en 2008, avec indication de l'augmentation prévue des proportions d'ÉR nécessaires en 2035 pour correspondre à un niveau de stabilisation de 450 ppm éqCO_2. [Figure 8.2]

Notes: La taille des cercles est à peu près à l'échelle. Les pertes des systèmes énergétiques se produisent au cours de la conversion, du raffinage et de la distribution des sources d'énergie primaire aux fins de la production de services énergétiques destinés à la consommation finale. Les énergies «non renouvelables» (en bleu) comprennent le charbon, le pétrole, le gaz naturel (avec ou sans captage et stockage du carbone en 2035) et l'énergie nucléaire. Cet exemple de scénario se fonde sur des chiffres tirés des Perspectives énergétiques mondiales de l'AIE pour 2010, convertis en équivalent direct [annexe II.4]. Des améliorations du rendement énergétique par rapport à la base de référence figurent dans la projection établie pour 2035. Parmi les ÉR utilisées dans le secteur des bâtiments figurent les combustibles solides issus de la biomasse traditionnelle (en jaune), utilisés pour la cuisson des aliments et le chauffage par 2,7 milliards de personnes dans les pays en développement [2.2], ainsi que le charbon. En 2035, une partie de la biomasse traditionnelle a été remplacée par des systèmes de conversion de la bioénergie moderne. À part la biomasse traditionnelle, le rendement global des systèmes d'ÉR (lors de la conversion de l'énergie primaire en énergie utilisable par les consommateurs) reste aux alentours de 66 %.

dans certains cas (parmi lesquels l'énergie hydroélectrique à petite et à grande échelle, l'énergie éolienne, la chaleur et l'électricité géothermiques, les biocombustibles de première génération et les systèmes de production d'eau chaude par chauffage solaire). La raison principale en est leur meilleur rapport coûts-compétitivité, l'intensification des mesures de soutien et l'adhésion croissante de la population en raison des menaces que font peser l'insécurité de l'approvisionnement énergétique et les changements climatiques. Parmi les exemples exceptionnels figurent l'énergie hydroélectrique à grande échelle en Norvège et l'énergie hydroélectrique et géothermique en Islande, qui approchent les 100 % de l'électricité produite à partir d'ÉR, ce qu'ont aussi réussi à faire plusieurs petites îles et petites villes. [8.2.1.3, 8.2.5.5, 11.2, 11.5]

D'autres technologies moins maîtrisées nécessitent des investissements constants dans la recherche, le développement et la démonstration, les infrastructures et le renforcement des capacités ainsi que d'autres mesures de soutien à plus long terme. Il s'agit notamment des technologies concernant les biocombustibles avancés, les piles à combustible, les combustibles solaires, les systèmes distribués de contrôle de la production d'électricité en réseau, les véhicules électriques, la réfrigération solaire par absorption et les systèmes géothermiques améliorés. [11.5, 11.6]

L'état actuel de l'utilisation des ÉR varie en fonction de chaque secteur d'utilisation finale. Il y a aussi de très fortes disparités régionales en ce qui concerne les futures voies à suivre pour intensifier encore l'intégration en levant les obstacles existants. Dans le secteur des bâtiments, par exemple, l'intégration des technologies ÉR est très différente selon qu'il s'agit de tours à usage commercial et d'habitations situées dans des mégalopoles ou de modestes habitations villageoises situées dans des pays en développement n'ayant actuellement qu'un accès limité aux services énergétiques. [8.3.2]

La plupart des systèmes d'approvisionnement en énergie se prêtent à une plus grande proportion d'ÉR que ce n'est le cas aujourd'hui, surtout si la part de ces ÉR est relativement faible (ce qui s'entend habituellement d'une proportion inférieure à 20 % de l'électricité, de la chaleur, de mélanges de gaz de réseau de transport ou de mélanges de biocarburants). Afin de tenir compte d'une plus forte proportion d'ÉR à l'avenir, la plupart de ces systèmes vont devoir évoluer ou être adaptés. Dans tous les cas, la proportion maximale d'ÉR, dans la pratique, dépendra des technologies utilisées, des ressources énergétiques renouvelables disponibles ainsi que du type et de l'âge du système énergétique actuel. Des initiatives locales, nationales et régionales peuvent favoriser une intégration plus poussée et de meilleurs taux de mise en valeur. Le chapitre 8 a globalement pour objectif de présenter, aux gouvernements qui souhaitent mettre au point un cadre cohérent en prévision de la future progression de la pénétration des ÉR, l'état actuel des connaissances sur les possibilités et les difficultés d'intégration de ces formes d'énergie. Les systèmes d'alimentation électrique, les réseaux de distribution de gaz naturel, les systèmes de chauffage et de refroidissement, les réseaux de distribution de carburants dérivés du pétrole et les véhicules existants peuvent tous être adaptés pour s'accommoder d'approvisionnements accrus en ÉR. Les technologies ÉR vont des technologies bien maîtrisées à celles qui n'en sont encore qu'au stade précoce de la démonstration du concept. De nouvelles technologies pourraient permettre d'utiliser davantage les ÉR, dont l'intégration dépendra de l'amélioration de leur rapport coût-efficacité, de leur meilleure acceptation par la société, de leur fiabilité et d'un plus grand soutien politique de la part des gouvernements nationaux et des administrations locales afin de gagner davantage de parts de marché. [8.1.2, 11.5]

Pour pouvoir intégrer les ÉR de façon efficace et souple, il va peut-être falloir appréhender le système énergétique dans sa globalité. Cela suppose notamment un soutien mutuel des différents secteurs énergétiques, une stratégie intelligente en matière de prévision et de contrôle et une planification cohérente à long terme. Tout cela permettrait d'assurer une interconnexion plus étroite des approvisionnements pour ce qui concerne l'électricité, le chauffage et le refroidissement et la mobilité. L'association optimale de technologies et de mécanismes sociaux propres à assurer l'intégration d'une part élevée d'ÉR varie en fonction des limites imposées par les particularités des sites, les caractéristiques des ressources énergétiques renouvelables disponibles et la demande énergétique au niveau local. La façon la plus opportune d'adapter et de développer les systèmes actuels d'offre et de demande énergétiques pour qu'ils puissent prendre en charge des proportions d'ÉR plus élevées tout comme les coûts supplémentaires induits par l'intégration de ces formes d'énergie sont en fait tributaires des circonstances et nécessitent d'autres études. C'est surtout vrai pour le secteur de l'électricité, du fait du grand nombre de systèmes et d'échelles de production d'énergie électrique existants, qui varient d'un pays et d'une région à l'autre. [8.2.1, 8.2.2, 8.3]

8.2 Intégration des énergies renouvelables dans les systèmes d'alimentation électrique

Les systèmes d'alimentation électrique évoluent depuis la fin du XIX^{e} siècle. Aujourd'hui, ces systèmes, dont la taille et le degré de perfectionnement technique sont très variables, vont de l'Eastern Interconnection synchronisée en Amérique du Nord à de petits systèmes autonomes individuels alimentés au gazole, certains systèmes connaissant, comme c'est le cas en Chine, une extension et une transformation rapides. Malgré ces différences, ces systèmes sont toutefois exploités et planifiés dans un même but: fournir un approvisionnement en électricité fiable et d'un bon rapport coût-efficacité. Si l'on se projette dans l'avenir, ils devraient continuer à se développer, car ils fournissent une énergie moderne, assurent le transport de l'énergie sur de longues distances et offrent des possibilités d'approvisionnement énergétique à faible intensité de carbone. [8.2.1]

Les systèmes d'alimentation électrique présentent plusieurs caractéristiques importantes qui influent sur les enjeux liés à l'intégration des ÉR. La majorité d'entre eux fonctionne en courant alternatif (c.a.), la plus grosse part de la production étant synchronisée et exploitée à une fréquence d'environ 50 ou 60 Hz, selon la région. La demande d'électricité varie au cours de la journée, de la semaine et de la saison, en fonction des besoins des utilisateurs. À la variation globale de la demande correspond une variation des horaires et des instructions de répartition de la production, afin de maintenir un équilibre constant entre l'offre et la demande. Les générateurs et autres dispositifs des systèmes d'alimentation servent à assurer la régulation de la puissance active, afin de stabiliser la fréquence du système, et de la puissance réactive, afin de maintenir la tension dans des limites bien précises. Les variations d'une minute à l'autre de l'offre et de la demande sont gérées, grâce à la régulation automatique de la production, par des services dits de régulation et de suivi de charge, tandis que les variations sur des échelles de temps plus longues – allant de plusieurs heures à plusieurs jours – le sont en répartissant et en planifiant la production (notamment en démarrant ou en arrêtant cette production, selon une technique connue sous le nom d'«engagement d'unités»). Cette recherche constante d'un équilibre est nécessaire, quel que soit le mécanisme utilisé pour ce faire. Certaines régions optent pour des marchés de l'électricité organisés, permettant de déterminer quelles centrales doivent être engagées et/ou comment elles doivent être réparties. Même les systèmes autonomes doivent employer des méthodes qui leur permettent de maintenir un équilibre entre production et demande (par le biais de générateurs contrôlables, de charges contrôlables ou de moyens de stockage comme des piles ou des batteries). [8.2.1.1]

Tableau TS.8.1 | Synthèse des caractéristiques d'intégration d'un certain nombre de technologies ÉR [Tableau 8.1]

Technologie		Gamme de puissance des centrales (MW)	Variabilité: échelles temporelles caractéristiques de l'exploitation des systèmes d'alimentation électrique (échelle temporelle)	Capacité de répartition (voir la légende)	Potentiel de diversité géographique (voir la légende)	Prévisibilité (voir la légende)	Fourchette du coefficient d'utilisation %	Fourchette de la marge excédentaire %	Régulation de puissance active et de fréquence (voir la légende)	Régulation de tension et de puissance réactive (voir la légende)
Bioénergie		0,1–100	Saisons (en fonction de la biomasse disponible)	+++	+	++	50–90	Similaire à l'énergie thermique et à la cogénération	++	++
Énergie solaire directe	Photovoltaïque	0,004–100 modulaire	De plusieurs minutes à plusieurs années	+	++	+	12–27	<25–75	+	+
	Solaire thermodynamique avec stockage de la chaleur[1]	50–250	De plusieurs heures à plusieurs années	++	+[2]	++	35–42	90	++	++
Énergie géothermique		2–100	Plusieurs années	+++	s.o.	++	60–90	Similaire à l'énergie thermique	++	++
Énergie hydroélectrique	Au fil de l'eau	0,1–1 500	De plusieurs heures à plusieurs années	++	+	++	20–95	0–90	++	++
	Réservoir	1–20 000	De plusieurs jours à plusieurs années	+++	+	++	30–60	Similaire à l'énergie thermique	++	++
Énergie marine	Amplitude de marée	0,1–300	De plusieurs heures à plusieurs années	+	+	++	22,5–28,5	<10%	++	++
	Courant de marée	1–200	De plusieurs heures à plusieurs années	+	+	++	19–60	10–20	+	++
	Énergie des vagues	1–200	De plusieurs minutes à plusieurs années	+	++	+	22–31	16	+	+
Énergie éolienne		5–300	De plusieurs minutes à plusieurs années	+	++	+	20-40 sur les côtes, 30-45 au large des côtes	5–40	+	++

Notes: 1) Dans l'hypothèse d'un système solaire thermodynamique avec six heures de stockage de la chaleur dans le sud-ouest des États-Unis d'Amérique. 2) Dans les zones bénéficiant d'une irradiation directe normale (DNI) supérieure à 2 000 kWh/m^2/an (7 200 MJ/m^2/an).

Puissance des centrales: limites de leur capacité nominale type.

Échelles temporelles caractéristiques: échelles temporelles auxquelles se produit une variabilité significative pour l'intégration dans les systèmes d'alimentation électrique.

Capacité de répartition: mesure dans laquelle la production d'énergie d'une centrale est répartissable: + faiblement et partiellement répartissable, ++ partiellement répartissable, +++ répartissable.

Potentiel de diversité géographique: mesure dans laquelle le lieu de mise en œuvre d'une technologie peut atténuer la variabilité et améliorer la prévisibilité, sans qu'il soit vraiment nécessaire d'étendre le réseau: + modéré, ++ élevé.

Prévisibilité: exactitude avec laquelle il est possible de prévoir la puissance d'une centrale à des échelles temporelles pertinentes afin de faciliter l'exploitation du système de production d'énergie: + exactitude modérée des prévisions (correspondant en général à un écart-type inférieur à 10 % de la puissance nominale à 24 heures), ++ grande exactitude des prévisions.

Régulation de puissance active et de fréquence: possibilités techniques qui permettent à une centrale de participer à la régulation de la puissance active et aux réponses en fréquence dans des situations normales (régime stable, dynamique) ou en cas de défaillance du réseau (compensation de puissance active en cas de creux de tension, par exemple): + bonnes possibilités, ++ possibilités de régulation totale.

Régulation de tension et de puissance réactive: possibilités techniques qui permettent à une centrale de participer à la régulation de la tension et de la puissance réactive dans des situations normales (régime stable, dynamique) ou en cas de défaillance du réseau (compensation de puissance réactive en cas de creux de tension, par exemple): + bonnes possibilités, ++ possibilités de régulation totale.

Outre le maintien d'un équilibre entre l'offre et la demande, les systèmes d'alimentation électrique doivent aussi transférer de l'électricité entre la production et la demande grâce à des réseaux de transport et de distribution d'une capacité limitée. L'assurance d'une capacité de production et de réseau suffisante nécessite une planification sur plusieurs années. Pour planifier ces systèmes, il faut garder à l'esprit que chacune de leurs composantes, y compris celles qui concernent la production et le réseau, tomberont régulièrement en panne (on parle alors d'impondérables). Il est toutefois possible de parvenir à un certain degré déterminé de fiabilité en se dotant de ressources appropriées. Pour déterminer la contribution de la production – qu'elle soit assurée par des combustibles fossiles ou des énergies renouvelables – à la satisfaction de la demande avec un degré de fiabilité fixé, on utilise un paramètre important qui s'appelle la marge excédentaire. [8.2.1.1]

Selon les particularités des systèmes d'alimentation électrique, plusieurs caractéristiques des ÉR sont importantes lorsqu'il s'agit d'intégrer ces dernières dans les systèmes de production d'énergie. En particulier, la variabilité et la prévisibilité (ou l'incertitude) des ÉR présentent un intérêt pour la planification et la répartition au sein des systèmes d'alimentation, l'emplacement géographique des ressources énergétiques renouvelables est un bon indicateur de l'incidence sur les besoins en réseaux électriques et, enfin, le coefficient d'utilisation, la marge excédentaire et les caractéristiques des centrales sont des indicateurs pertinents à des fins de comparaison, par exemple avec la production thermique. [8.2.1.2]

Certaines ressources énergétiques renouvelables permettant de produire de l'électricité (en particulier l'énergie marine, l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne) sont variables et ne sont que partiellement répartissables: la production d'énergie à partir de ces ressources peut être réduite en cas de besoin, mais la production maximum dépend de la disponibilité de la ressource en question (comme les courants de marée, le soleil ou le vent). La marge excédentaire peut être faible si la production n'est pas bien corrélée avec les moments de forte demande. En outre, étant donné les écarts que connaissent les ÉR, la variabilité et la prévisibilité partielle de certaines d'entre elles font qu'on a davantage recours à des énergies répartissables ou à d'autres ressources pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande. Bien souvent, cette variabilité et cette prévisibilité partielle sont quelque peu atténuées par la diversité géographique, les changements et les erreurs de prévision ne se produisant pas toujours au même moment ni dans la même direction. Un inconvénient de la plupart des ÉR est toutefois le fait que les ressources renouvelables diffèrent selon les lieux et qu'il se peut par conséquent qu'il faille transporter de l'électricité d'origine renouvelable sous forme concentrée sur de très longues distances, ce qui nécessite d'étendre le réseau. Les sources d'énergie renouvelable répartissables (dont l'énergie hydroélectrique, la bioénergie, l'énergie géothermique et le solaire thermodynamique avec stockage de la chaleur) peuvent, dans bien des cas, offrir une souplesse supplémentaire permettant au système d'intégrer d'autres sources d'énergie renouvelable et ont souvent une marge excédentaire plus importante. [8.2.1.2]

On trouvera une synthèse très succincte des caractéristiques de certaines de ces techniques au tableau TS.8.1. [8.2.1.3]

On dispose déjà d'une expérience significative en ce qui concerne l'exploitation de systèmes d'alimentation électrique comportant une large part de sources renouvelables, notamment en matière d'énergie hydroélectrique et d'énergie géothermique. Le stockage de l'énergie hydroélectrique, associé à de puissantes interconnexions, aide à gérer les fluctuations de débit des cours d'eau. L'équilibrage des coûts en cas de variation de la production se fait lorsqu'il y a des différences entre la production prévue (selon les prévisions) et la production réelle. La variabilité et l'incertitude augmentent les exigences en matière d'équilibrage. Dans l'ensemble, l'équilibrage devrait devenir plus difficile à réaliser au fur et à mesure de la pénétration d'ÉR partiellement répartissables. Les études montrent clairement que l'association de différentes sources d'énergie renouvelable variables et de ressources provenant de vastes régions géographiques contribuera à lisser la variabilité et à réduire l'incertitude globale pour les réseaux électriques. [8.2.1.3]

La question la plus importante est celle de l'infrastructure des réseaux, que ce soit pour acheminer l'électricité de la centrale au consommateur ou pour procéder à un équilibrage sur des zones très étendues. Renforcer les connexions au sein d'un système d'alimentation et mettre en place de nouvelles interconnexions avec d'autres systèmes peut avoir pour effet direct d'atténuer l'incidence de sources d'ÉR variables et incertaines. L'extension du réseau est un passage obligé pour la plupart des ÉR, même si l'ampleur de cette extension dépend de la ressource et de son emplacement par rapport à l'infrastructure du réseau existante. L'extension d'une telle infrastructure alors que l'opinion publique est opposée à une infrastructure aérienne fait partie des défis à relever. En règle générale, des changements majeurs devront être apportés à la part relative des différentes centrales dans la production d'électricité ainsi qu'à l'infrastructure et aux procédures d'exploitation des systèmes d'alimentation pour passer à une production renouvelable accrue, tout en gardant la même efficacité en matière de coût et d'environnement. Ces changements vont exiger des investissements très importants réalisés suffisamment à l'avance pour maintenir une alimentation électrique fiable et sûre. [8.2.1.3]

Outre l'amélioration de l'infrastructure des réseaux, l'expérience acquise en exploitation et diverses études ont fait apparaître plusieurs autres possibilités importantes en matière d'intégration:

Plus grande souplesse de la production: Qui dit pénétration accrue des sources d'énergie renouvelable variables dit nécessité accrue de gérer la variabilité et l'incertitude. Il faut une plus grande souplesse de la part relative des différentes sources dans la production d'électricité. L'essentiel de la souplesse qui permet à un réseau électrique de faire face aux problèmes posés par la variabilité et l'incertitude réside dans la possibilité d'augmenter ou de réduire la production et de l'adapter aux fluctuations en fonction des besoins. La nécessité de disposer de plus de souplesse peut nécessiter des investissements dans un mode de production plus souple ou une amélioration des centrales existantes afin de leur donner une plus grande souplesse de fonctionnement. [8.2.1.3]

Mesures relatives à la demande: Bien que des mesures relatives à la demande n'aient été appliquées par le passé que pour réduire la demande moyenne ou en période de pointe, elles peuvent potentiellement contribuer à répondre aux besoins résultant d'un accroissement de la production renouvelable variable. La mise au point de techniques de pointe en matière de télécommunications, avec des compteurs électriques intelligents liés aux centres de commande, permet de bénéficier de plus de souplesse du côté de la demande. Les utilisateurs peuvent être incités à modifier ou à réduire leur consommation grâce à la fixation de prix de l'électricité différents selon les heures, et notamment de prix plus élevés en période de forte demande. Cette diminution de la demande en période de pointe peut atténuer les effets de la faible marge excédentaire de certains types de production variable. Qui plus est, une demande qui peut être rapidement réduite sans avis préalable à n'importe quel moment de l'année peut contribuer à constituer des réserves au lieu d'exiger des ressources de

production pour ce faire. Une demande dont on peut prévoir qu'elle sera satisfaite à n'importe quel moment de la journée ou qui réagit aux prix de l'électricité en temps réel peut contribuer à l'équilibrage intrajournalier, atténuant par là même les difficultés d'exploitation qui devraient s'aggraver avec une production variable. [8.2.1.3]

Stockage de l'énergie électrique: En stockant l'énergie électrique quand la production obtenue à partir d'énergies renouvelables est élevée et la demande faible et en produisant de l'électricité quand la production obtenue à partir d'énergies renouvelables est faible et la demande élevée, il est possible de réduire le contingentement des ÉR et de faire en sorte que les unités de charge de base du réseau fonctionnent plus efficacement. Le stockage peut aussi atténuer l'engorgement des réseaux de transport d'électricité et rendre leur amélioration moins nécessaire ou moins urgente. Des technologies telles que les batteries ou les volants d'inertie, qui emmagasinent de plus petites quantités d'énergie (de plusieurs minutes à plusieurs heures), peuvent théoriquement servir à fournir de l'électricité en mode intrajournalier pour réguler l'équilibre entre l'offre et la demande. [8.2.1.3]

Amélioration des méthodes d'exploitation, de commercialisation et de planification: Pour contribuer à gérer la variabilité et l'incertitude propres aux sources de production variables, il est possible d'associer les prévisions liées à leur rendement à une amélioration des méthodes d'exploitation, afin de déterminer à la fois les réserves nécessaires pour maintenir l'équilibre entre demande et production et la planification optimale de la production. Si l'on parvient à se rapprocher d'une gestion en temps réel pour les décisions en matière de planification (c.-à-d. à obtenir une plus grande réactivité sur les marchés) et à augmenter la fréquence de ces décisions, on disposera de renseignements plus récents et plus précis pour assurer la répartition des unités de production. Il est également souhaitable, si l'on dispose de grandes quantités de production variable, d'élargir la zone géographique d'équilibrage ou de recourir à un système d'équilibrage entre plusieurs régions, en raison des avantages conjugués que présentent des sources d'énergie renouvelable multiples et dispersées. [8.2.1.3]

Pour résumer, on peut intégrer les ÉR dans tous les types de systèmes d'alimentation électrique, depuis de vastes réseaux reliés entre eux à l'échelle d'un continent jusqu'à de petits systèmes autonomes. Les caractéristiques des systèmes (infrastructure des réseaux, structure et emplacement géographique de la demande, part relative des différentes sources d'énergie dans la production d'électricité, capacité de contrôle et de communication, etc.), conjuguées à l'emplacement, à l'empreinte géographique, à la variabilité et à la prévisibilité des ressources renouvelables, déterminent l'ampleur des problèmes posés par l'intégration. À mesure que la quantité de ressources énergétiques renouvelables augmente, il faut généralement mettre en place des infrastructures supplémentaires en matière de réseau électrique (de transport et/ou de distribution). Les sources d'énergie renouvelable variables telles que l'énergie éolienne peuvent être plus difficiles à intégrer que les sources renouvelables répartissables telles que la bioénergie; de plus, à mesure que leur part s'accroît, le maintien de la fiabilité devient plus difficile et plus coûteux. Il est possible de réduire au minimum ces coûts et ces problèmes en gardant ouvert un large éventail de possibilités, dont l'interconnexion des réseaux, le développement d'une production souple et complémentaire, l'élargissement de la zone d'équilibrage de l'offre et de la demande,

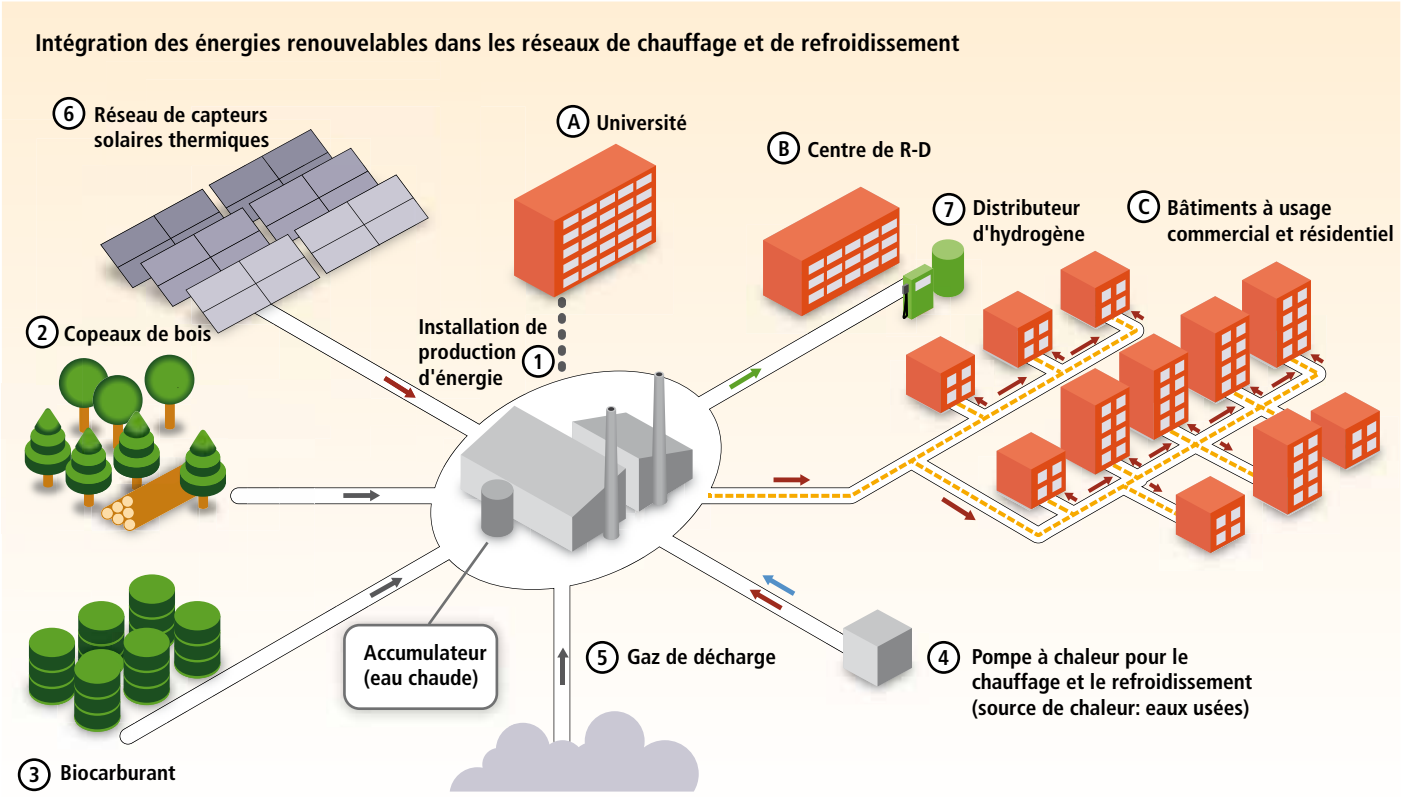


Figure TS.8.3 | Installation intégrée de production d'énergie à partir d'ÉR à Lillestrøm (Norvège), qui alimente l'Université, le Centre de recherche-développement et un ensemble de bâtiments à usage commercial et résidentiel grâce à un système de chauffage et de refroidissement urbain alliant une série de sources de chaleur à base d'ÉR, le stockage de la chaleur et un réseau de production et de distribution d'hydrogène (investissement total d'environ 25 millions de dollars É.-U.$_{2005}$; achèvement prévu en 2011). 1) Système énergétique central doté d'un réservoir d'eau chaude à accumulation de 1 200 m^3; 2) Centrale alimentée au bois de 20 MW$_{th}$ (avec récupération de la chaleur des gaz de combustion); 3) Chaudière au biofioul de 40 MW$_{th}$; 4) Pompe à chaleur de 4,5 MW$_{th}$; 5) Brûleur de gaz de décharge de 1,5 MW$_{th}$ et canalisation de 5 km; 6) Capteurs solaires à conversion thermique d'une superficie de 10 000 m^2; 7) Production d'hydrogène à partir d'ÉR (grâce à l'électrolyse de l'eau et au reformage de méthane à la vapeur à sorption améliorée) et système de mise à disposition de véhicules. [Figure 8.3]

la création de marchés dont le temps de réaction est inférieur à une heure, une demande pouvant varier selon la disponibilité de l'offre, des techniques de stockage et de meilleurs moyens de prévision, d'exploitation des systèmes et de planification.

8.3 Intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de chauffage et de refroidissement

Un réseau de chauffage ou de refroidissement urbain permet de connecter des sources d'énergie multiples (figure TS.8.3) à un grand nombre de consommateurs grâce au pompage des vecteurs énergétiques (eau chaude ou froide et parfois vapeur) dans des canalisations souterraines isolées. La production centralisée de chaleur peut faciliter l'utilisation de chaleur ÉR à faible coût et/ou de basse énergie, produite à partir de sources géothermiques ou héliothermiques ou de la combustion de biomasse (y compris de combustibles dérivés de déchets et de sous-produits de déchets souvent impropres à une utilisation dans des systèmes de chauffage individuels). La chaleur résiduelle dégagée par la cogénération ou par des procédés industriels peut également être utilisée. Cette souplesse entraîne une concurrence entre un certain nombre de sources de chaleur, de combustibles et de technologies. La production centralisée de chaleur peut aussi faciliter l'application de mesures efficaces par rapport au coût qui réduisent la pollution de l'air locale par rapport à la solution qui consisterait à avoir une multitude de petites chaudières individuelles. Faisant preuve de souplesse quant aux sources de chaleur ou de froid utilisées, les réseaux de chauffage et de refroidissement urbain permettent de mobiliser en continu plusieurs types d'ÉR, de sorte qu'il est souvent possible de remplacer progressivement ou rapidement des combustibles fossiles concurrents. [8.2.2]

Les occupants des immeubles et des bâtiments industriels reliés à un réseau peuvent tirer profit d'un système central géré de façon professionnelle, ce qui leur évite de faire fonctionner et d'entretenir leur propre installation de chauffage ou de refroidissement. Plusieurs pays situés à des latitudes élevées connaissent une pénétration de marché du chauffage urbain de 30 à 50 %, chiffre qui atteint 96 % en Islande grâce aux ressources géothermiques de ce pays. On estime à environ 11 EJ la fourniture annuelle de chauffage urbain à l'échelle de la planète, même si les données en la matière sont incertaines. [8.2.2.1]

Les réseaux de chauffage urbain peuvent fournir de l'électricité grâce à la conception de systèmes de cogénération et peuvent aussi apporter des solutions pour répondre à la demande susceptibles de faciliter l'intégration croissante des ÉR, notamment grâce à l'utilisation de l'électricité issue de ces dernières dans les pompes à chaleur et les chaudières électriques. Les systèmes de stockage de la chaleur peuvent combler l'écart entre l'offre et la demande dû au caractère variable, discontinu ou non synchronisé des systèmes de chauffage. Pour le stockage à court terme (heures ou jours), on peut avoir recours à la capacité thermique du réseau de distribution lui même. Les systèmes de stockage de la chaleur ayant une durée de stockage pouvant atteindre plusieurs mois à des températures pouvant atteindre des centaines de degrés Celsius font appel à toute une gamme de matériaux ainsi qu'à des dispositifs de stockage adaptés dont la capacité peut atteindre plusieurs TJ. La production combinée de chaleur, de froid et d'électricité (trigénération) de même que la possibilité de procéder à un stockage diurne et saisonnier de la chaleur et du froid semblent indiquer qu'une intégration accrue devrait permettre d'obtenir des systèmes d'une grande efficacité globale et d'utiliser des proportions plus importantes d'ÉR. [8.2.2.2, 8.2.2.3]

Un grand nombre de centrales commerciales de géothermie, de chauffage à la biomasse et de cogénération ont été intégrées avec succès dans des réseaux de chauffage urbain, sans l'aide des pouvoirs publics. On a également construit plusieurs systèmes thermosolaires à grande échelle dotés d'une surface de capteurs d'environ 10 000 m^2 (figure TS.8.3) au Danemark, en Norvège et ailleurs. La meilleure combinaison de sources chaudes et froides, tout comme les meilleures technologies de transfert et de stockage de la chaleur, dépendent fortement des conditions sur place, et notamment du profil de la demande des utilisateurs. Par conséquent, le bouquet énergétique en matière d'énergie thermique varie considérablement d'un système à l'autre. [3.5.3, 8.2.2]

Mettre en place ou développer un système de chauffage urbain exige d'engager de fortes dépenses d'investissement initiales pour le réseau de canalisations. Les coûts de distribution peuvent à eux seuls représenter plus ou moins la moitié du coût total, mais peuvent varier fortement en fonction de la densité de la demande de chaleur et des conditions locales d'aménagement d'un réseau de canalisations isolées. L'urbanisation croissante favorise le chauffage urbain, car les dépenses d'investissement consacrées au réseau sont plus faibles pour les sites en zone verte, tout comme les pertes de distribution par unité de chaleur fournie dans les zones à forte densité de demande de chaleur. Les pertes de distribution de chaleur varient habituellement de 5 à 30 %, mais la mesure dans laquelle des pertes élevées sont considérées comme problématiques dépend de la source de chaleur et de son coût. [8.2.2.1, 8.2.2.3]

L'utilisation accrue de centrales de cogénération fonctionnant à l'énergie géothermique et à la biomasse dans les réseaux de chauffage urbain peut contribuer à augmenter la part des sources d'ÉR, mais pour que cela soit viable économiquement, il faut généralement que le système dans son ensemble ait une charge thermique élevée. Certains gouvernements favorisent donc les investissements dans les réseaux de chauffage urbain en plus d'offrir des incitations supplémentaires pour l'utilisation d'ÉR dans le réseau. [8.2.2.4]

La conception et les modes d'utilisation des bâtiments modernes ont tendance à limiter leurs besoins en chauffage supplémentaire, alors que la demande de refroidissement au niveau planétaire tend à augmenter. La demande de refroidissement à des fins de

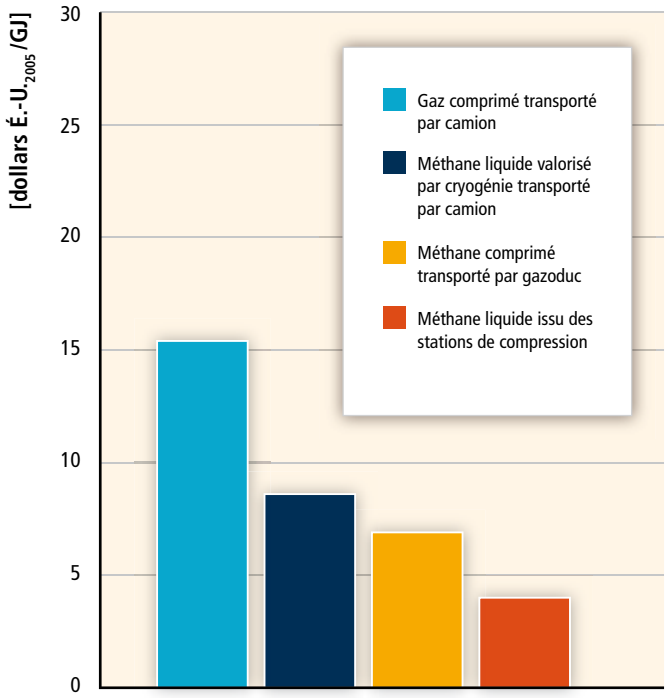


Figure TS.8.4 | Coûts relatifs du transport et de la distribution du biométhane (comprimé ou liquéfié) à moyenne échelle par camion ou par gazoduc en Europe. [Figure 8.9]

confort a progressé dans certaines régions de basses latitudes où les pays sont devenus plus prospères et de latitudes plus élevées où les étés sont devenus plus chauds. Il est possible de réduire la charge de refroidissement en appliquant des solutions en matière de conception des bâtiments qui font appel au refroidissement passif ou des solutions actives à base d'ÉR (notamment des refroidisseurs solaires par absorption). Comme dans le cas du chauffage urbain, la viabilité de la solution consistant à développer un réseau de refroidissement urbain sera fonction du taux d'application du rendement énergétique utilisé pour réduire la demande de refroidissement, de l'emploi de nouvelles technologies et de la structure du marché. Les systèmes modernes de refroidissement urbain, dont la capacité varie de 5 à 300 MW_{th}, fonctionnent depuis de nombreuses années à l'aide de sources de froid (aquifères naturels, cours d'eau, mer ou lacs profonds) considérées comme des formes d'ÉR. [8.2.2.4]

D'une manière générale, des réseaux de chauffage et de refroidissement urbain ont été mis en place dans des endroits et des circonstances caractérisés par une forte capacité de planification comme les pays à économie planifiée, les campus universitaires des États-Unis d'Amérique, les pays d'Europe occidentale dotés de services publics multiples ou les zones urbaines dirigées par des administrations municipales locales.

8.4 Intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution de gaz

Ces 50 dernières années, de grands réseaux de distribution de gaz naturel ont vu le jour en plusieurs endroits du globe. Plus récemment, le fait de les rendre «écologiques» en intégrant des gaz issus d'ÉR a suscité un intérêt croissant. Les combustibles gazeux tirés de sources d'ÉR proviennent en grande partie de la biomasse et peuvent être produits soit par digestion anaérobie en vue d'obtenir du biogaz (surtout du méthane et du CO_2), soit par procédé thermochimique afin d'obtenir du gaz de synthèse (ou du gaz pauvre de gazogène) (surtout de l'hydrogène et du monoxyde de carbone). Le biométhane, le gaz de synthèse et, à plus long terme, l'hydrogène produit à partir d'ÉR peuvent être injectés dans des gazoducs existants pour être distribués aux niveaux national, régional ou local. Les différences dans les infrastructures en place, la qualité du gaz et les niveaux de production et de consommation font qu'il est souvent difficile de planifier l'accroissement de la part des gaz tirés d'ÉR grâce à leur intégration dans des réseaux existants. [8.2.3, 8.2.3.1]

La production de biogaz augmente rapidement, et plusieurs sociétés gazières d'envergure font maintenant des projets visant à en valoriser de grandes quantités en vue de leur injection au niveau de qualité requis dans des gazoducs nationaux ou régionaux. La plus grande partie du biométhane actuellement produit dans le monde est déjà distribué dans des réseaux de gazoducs locaux destinés avant tout au chauffage. Suivant la distance et le volume annuel à transporter, cela peut constituer une solution plus économique par unité d'énergie fournie (figure TS.8.4) que le transport par camion (habituellement vers des stations-service pour alimenter les véhicules à gaz). [8.2.3.4]

Il peut être très efficace d'utiliser le gaz comme combustible pour en tirer de la chaleur ou pour produire de l'électricité en s'en servant pour alimenter moteurs, chaudières ou turbines à gaz, ou encore dans des véhicules, que ce soit sous forme comprimée ou transformé en toute une série de combustibles liquides à l'aide de divers procédés. Le biogaz ou le gaz de décharge, par exemple, peuvent être brûlés sur place pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité, épurés et valorisés pour en faire du biométhane ayant la qualité du gaz naturel aux fins d'injection dans les réseaux de distribution de gaz ou encore, après compression ou liquéfaction, distribués à des stations-service afin de ravitailler en carburant des véhicules à monocarburation ou des véhicules hybrides à gaz. [8.2.3.2–8.2.3.4]

Les difficultés techniques sont liées à la source, à la composition et à la qualité du gaz. Seuls le biogaz et le gaz synthétique d'une qualité bien précise peuvent être injectés dans les réseaux de distribution de gaz déjà en place: la phase d'épuration est donc d'une importance capitale pour enlever l'eau, le CO_2 (ce qui augmente le pouvoir calorifique) et les autres sous-produits issus du courant gazeux. Le coût de la valorisation varie suivant la taille de l'installation et le procédé, qui peut consommer environ 3 à 6 % du contenu énergétique du gaz. Les systèmes à gaz issu d'ÉR devraient nécessiter de grandes capacités de stockage pour tenir compte de la variabilité et de la saisonnalité de l'offre. La taille et la forme des installations de stockage ainsi que la qualité du gaz demandée dépendront de la source d'énergie primaire et de son utilisation finale. [8.2.3]

L'hydrogène gazeux peut être produit à partir de sources d'ÉR par plusieurs moyens, dont la gazéification de la biomasse, le reformage du biométhane ou l'électrolyse de l'eau. Pour l'hydrogène, la base potentielle de ressources énergétiques renouvelables est donc plus importante que pour le biogaz ou le gaz synthétique. La production future d'hydrogène à partir de ressources énergétiques renouvelables variables

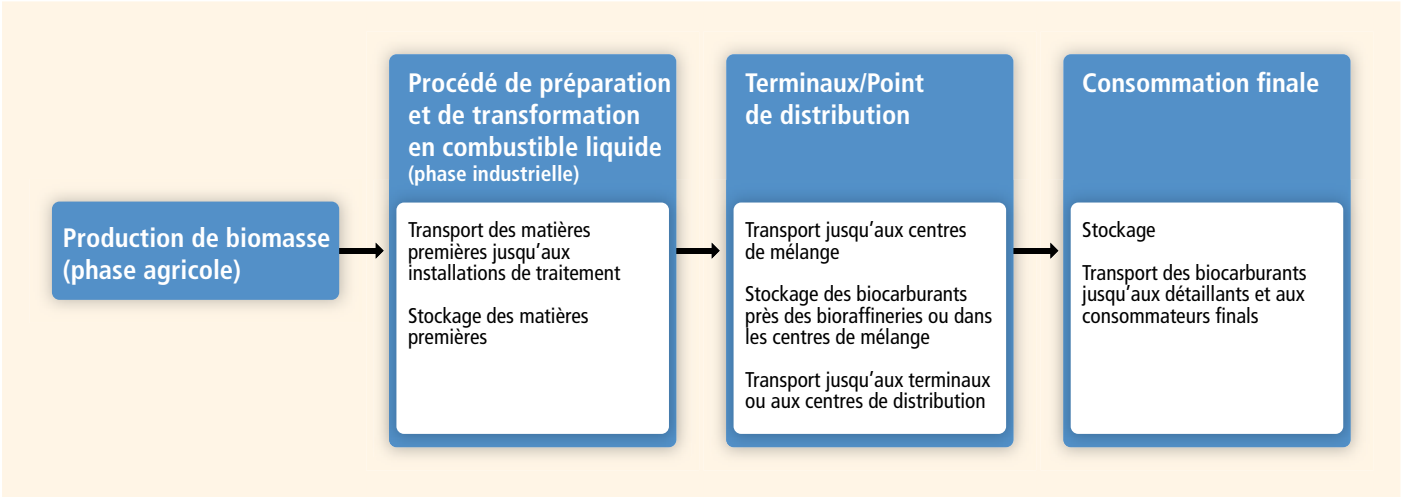


Figure TS.8.5 | Les système de production, de mélange et de distribution d'une série de biocarburants liquides sont similaires, quelles que soient les matières premières issues de la biomasse [8.2.4]. [Figure 8.11]

(comme l'énergie éolienne ou l'énergie solaire par électrolyse) dépendra très largement de l'interaction avec les réseaux électriques existants et du niveau de capacité excédentaire. À court terme, le mélange d'hydrogène et de gaz naturel (jusqu'à 20 % en volume) et son transport sur de longues distances au sein des réseaux existants de distribution du gaz pourraient être une solution. À plus long terme, il est possible de construire des conduites – fabriquées en aciers spéciaux pour éviter qu'elles ne se fragilisent – pour acheminer de l'hydrogène pur. Les facteurs de limitation de la mise en valeur de l'hydrogène risquent d'être les capitaux et le temps requis pour bâtir une nouvelle infrastructure adaptée ainsi que le surcoût induit par le stockage nécessaire pour prendre en compte des sources d'ÉR variables. [8.2.3.2, 8.2.3.4]

Pour mélanger un gaz issu d'ÉR dans un réseau de distribution de gaz, il faut que sa source soit située près du réseau existant, afin d'éviter les coûts élevés qu'entraînerait la construction d'un nouveau gazoduc. Dans les cas où l'installation est éloignée à cause de la disponibilité des ressources, il peut être plus judicieux d'exploiter le gaz sur place, si possible, afin de ne pas devoir l'acheminer et le valoriser. [8.2.3.5]

8.5 Intégration des énergies renouvelables dans les combustibles liquides

La plus grande partie de la demande prévue de biocombustibles liquides provient des transports, même si l'on peut voir apparaître une demande en biolubrifiants et en bioproduits chimiques (comme le méthanol) de la part de l'industrie. En outre, de grandes quantités de biomasse traditionnelle solide pourraient finir par être remplacée par des combustibles liquides plus pratiques, plus sûrs et moins néfastes pour la santé comme l'oxyde de diméthyle ou les gels d'éthanol tirés des ÉR. [8.2.4]

La production de bioéthanol et de biogazoles à partir de cultures normalement utilisées pour l'alimentation est un processus bien maîtrisé (figure TS.8.5). Les biocombustibles produits peuvent profiter des éléments d'infrastructure déjà mis en place pour les combustibles extraits du pétrole, notamment pour le stockage, le mélange, le transport et la distribution. Toutefois, utiliser des infrastructures conçues pour des produits pétroliers (réservoirs de stockage, oléoducs, camions) pour stocker ou acheminer de l'éthanol ou des mélanges peut engendrer des problèmes d'absorption d'eau et de corrosion du matériel, ce qui peut nécessiter des investissements dans des matériaux ou des revêtements pour oléoduc spécialisés. La production décentralisée de biomasse, la saisonnalité et l'éloignement des sites agricoles par rapport aux raffineries de pétrole ou aux centres de distribution de carburant déjà installés peuvent avoir des incidences sur la logistique de la chaîne d'approvisionnement et le stockage des biocombustibles. Les technologies continuent d'évoluer pour la production de biocombustibles à partir de matières premières non alimentaires et d'autres plus compatibles avec les infrastructures pétrolières et les combustibles extraits du pétrole existants. Il faut respecter des procédures de contrôle de la qualité pour s'assurer que ces biocombustibles satisfont à toutes les spécifications de produit applicables. [8.2.4.1, 8.2.4.3, 8.2.4.4]

L'utilisation de carburants mélangés, obtenus en remplaçant une partie (habituellement de 5 à 25 % mais pouvant atteindre 100 %) de l'essence par de l'éthanol, ou du gazole par du biogazole, nécessite des investissements dans les infrastructures, notamment dans des réservoirs et des pompes supplémentaires dans les stations-service. Bien que le coût de livraison du biocarburant ne représente qu'une petite partie du coût total, la logistique et les capitaux nécessaires à une intégration et à une extension généralisées pourraient présenter des difficultés majeures en cas de mauvaise planification. L'éthanol n'ayant que les deux tiers environ de la densité énergétique (en volume) de l'essence, il faut des systèmes de stockage plus importants, un plus grand nombre de wagons ou de navires et des oléoducs d'une plus grande capacité pour transporter la même quantité d'énergie, ce qui augmente les coûts de stockage et de livraison. Même si, théoriquement, les oléoducs seraient le mode de livraison le plus économique, et même si l'on a réussi à acheminer de l'éthanol par oléoduc, un certain nombre de difficultés techniques et logistiques demeurent. En règle générale, les volumes d'éthanol actuellement produits dans une région agricole pour satisfaire la demande locale ou pour l'exportation sont trop faibles pour justifier les coûts d'investissement et les difficultés d'exploitation qu'entraîne la construction d'un oléoduc spécialisé. [8.2.4.3]

8.6 Intégration des énergies renouvelables dans les systèmes autonomes

Les systèmes autonomes d'approvisionnement en énergie sont d'ordinaire de taille modeste et souvent implantés dans des régions reculées situées hors réseau, sur de petites îles ou dans des bâtiments individuels où il n'est pas facile de s'approvisionner en énergie commerciale par le biais de réseaux. Il existe plusieurs types de systèmes autonomes, qui peuvent faire appel à un seul vecteur énergétique (électricité, chaleur, combustibles liquides, gazeux ou solides, etc.) ou à une combinaison de différents vecteurs. [8.2.5, 8.2.5.1]

En principe, les problèmes d'intégration des ÉR pour les systèmes autonomes sont semblables à ceux que présentent les systèmes centralisés en ce qui concerne, par exemple, l'équilibrage de l'offre et de la demande des systèmes d'approvisionnement en électricité, le choix des formules de chauffage et de refroidissement, la production de gaz à partir d'ÉR et celle de biocombustibles liquides destinés à un usage local. En revanche, contrairement aux grands réseaux d'alimentation, les petits systèmes autonomes ont souvent moins de possibilités d'approvisionnement en ÉR qui soient facilement disponibles sur place. En outre, certaines des solutions techniques et institutionnelles envisageables pour la gestion de l'intégration des énergies renouvelables dans des réseaux plus importants (comme la prévision de l'offre d'ÉR, les procédures probabilistes d'engagement d'unités, la rigueur des normes de qualité des combustibles et carburants et les effets de lissage de la diversité géographique et technique) deviennent plus difficiles à appliquer, voire inapplicables, pour des systèmes autonomes plus petits. [8.2.1–8.2.5]

Les solutions en matière d'intégration des ÉR sont généralement plus limitées au fur et à mesure que la taille des réseaux d'approvisionnement diminue. Il convient donc de tabler davantage sur les solutions qui existent déjà. Comme ils recourent surtout aux ressources énergétiques renouvelables en raison du caractère limité des possibilités d'interconnexion et des procédures d'exploitation et de planification, les systèmes autonomes ont naturellement tendance à privilégier les possibilités de stockage de l'énergie, les divers moyens de répondre à la demande et la production de combustibles fossiles d'une grande souplesse pour faciliter l'équilibrage de l'offre et de la demande. Il se peut que l'on opte pour des modes d'approvisionnement en ÉR mieux adaptés aux profils de charge locaux ou qui sont répartissables, de préférence à d'autres moins coûteux, mais qui concordent moins avec les courbes de charge ou qui sont variables. Toutes choses égales par ailleurs, il est plus onéreux de gérer l'intégration des ÉR dans des systèmes autonomes que dans de grands réseaux intégrés à cause du nombre limité d'options, mais dans la plupart des cas, comme sur des îles ou dans des zones rurales éloignées, les utilisateurs n'ont pas le choix. Les utilisateurs et concepteurs de systèmes

d'alimentation en électricité autonomes peuvent donc être amenés à devoir faire des compromis difficiles entre le souhait d'assurer un approvisionnement fiable et continu et celui de réduire au minimum les coûts globaux d'approvisionnement. [8.2.5]

Dans un système énergétique autonome, l'intégration des technologies de conversion des ÉR, les possibilités d'équilibrage et les technologies d'utilisation finale utilisées dépendent des disponibilités en ressources énergétiques renouvelables du site considéré et de la demande locale d'énergie. Ces facteurs peuvent varier en fonction du climat et du mode de vie local. L'équilibre entre coût et fiabilité est de toute première importance pour concevoir et mettre en place des systèmes d'alimentation électrique autonomes, en particulier dans les zones rurales des pays en développement, car le surcoût induit par la distribution fiable et continue d'électricité peut devenir plus important pour des petits systèmes autonomes. [8.2.5.2]

8.7 Les secteurs d'utilisation finale: éléments stratégiques pour trouver des voies de transition

Le progrès des technologies ÉR se poursuit, ce qui se traduit par leur utilisation accrue dans les transports, les bâtiments, l'industrie et les secteurs de l'agriculture, de la foresterie et des pêches. Pour parvenir à une mise en valeur optimale des ÉR dans tous les secteurs, il convient de s'employer à résoudre des problèmes tant techniques que d'un autre ordre. Chaque secteur connaît des variations régionales en raison de l'état actuel de la mise en valeur des ÉR, de l'élargissement de l'éventail des types de systèmes énergétiques, de l'infrastructure connexe actuellement en place, des différentes voies possibles pour favoriser l'intégration des ÉR, des problèmes de transition qu'il reste à résoudre et des tendances futures, sensibles à la diversité des aspirations et des cultures aux niveaux national et local. [8.3, 8.3.1]

8.7.1 Transports

Les tendances et projections récentes mettent en évidence une forte hausse de la demande de transport, et notamment une augmentation rapide du nombre de véhicules à travers le monde. Pour répondre à cette demande tout en assurant un approvisionnement énergétique sûr et à faible émission en carbone, il faudra des mesures de politique générale énergiques, une évolution technologique rapide, des incitations monétaires et/ou la volonté, de la part des clients, d'acquitter des coûts supplémentaires. [8.3.1]

En 2008, l'utilisation de combustibles fossiles pour le transport a représenté environ 19 % de l'énergie primaire utilisée dans le monde, soit 30 % de l'énergie de consommation totale, et a produit environ 22 % des émissions de GES, plus une

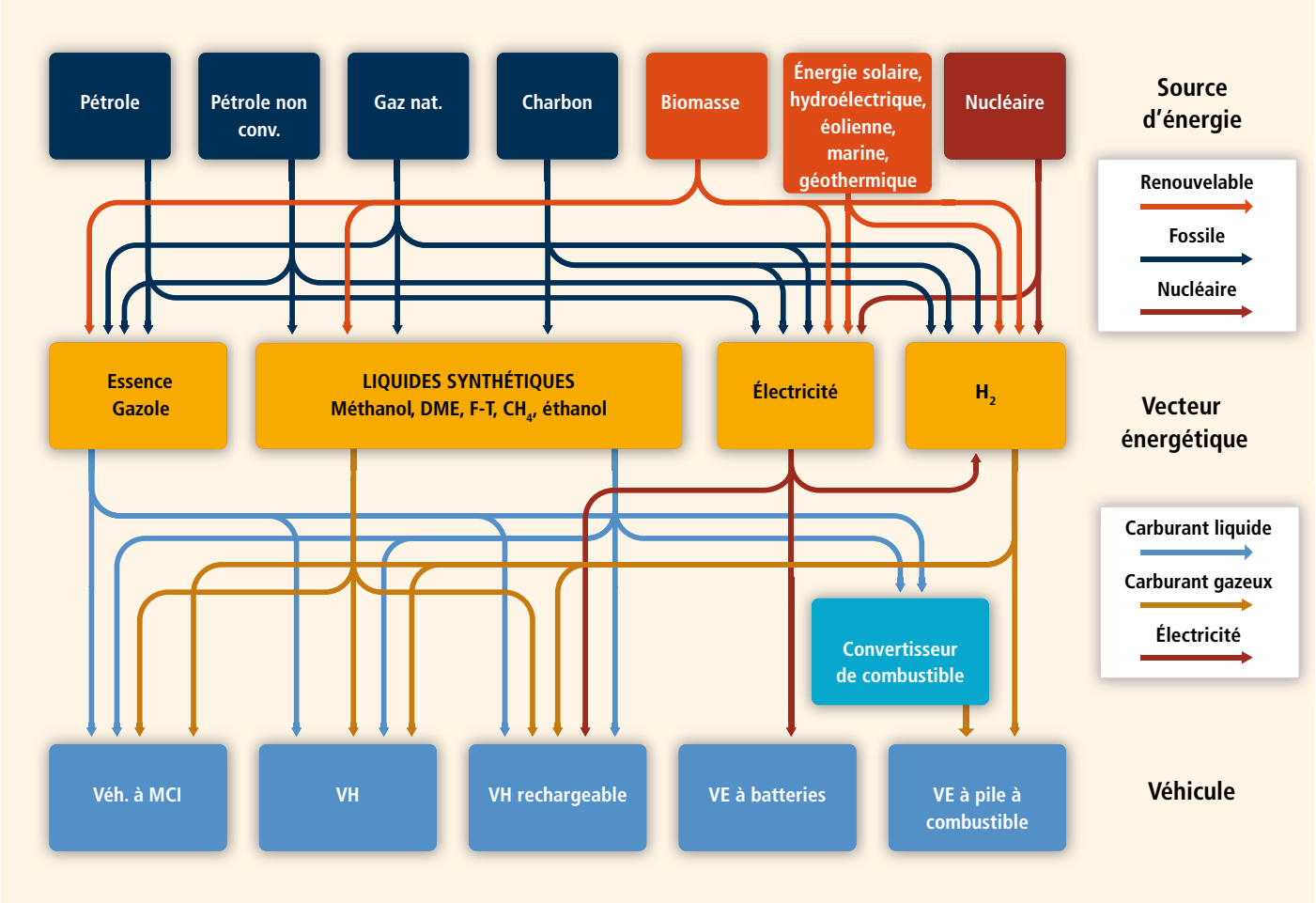


Figure TS.8.6 | Série de voies possibles pour les carburants destinés aux véhicules légers, depuis les sources d'énergie primaire (en haut) jusqu'aux différentes formes de propulsion des véhicules au stade de l'utilisation finale (en bas) en passant par les vecteurs énergétiques (les ressources énergétiques renouvelables sont indiquées en rouge). [Figure 8.13]

Notes: F-T= procédé Fischer Tropsch; DME = oxyde de méthyle; MCI = moteur à combustion interne; VH = véhicule hybride; VE = véhicule électrique; par «pétrole non conventionnel», on entend les sables et schistes bitumineux et autres pétroles bruts lourds.

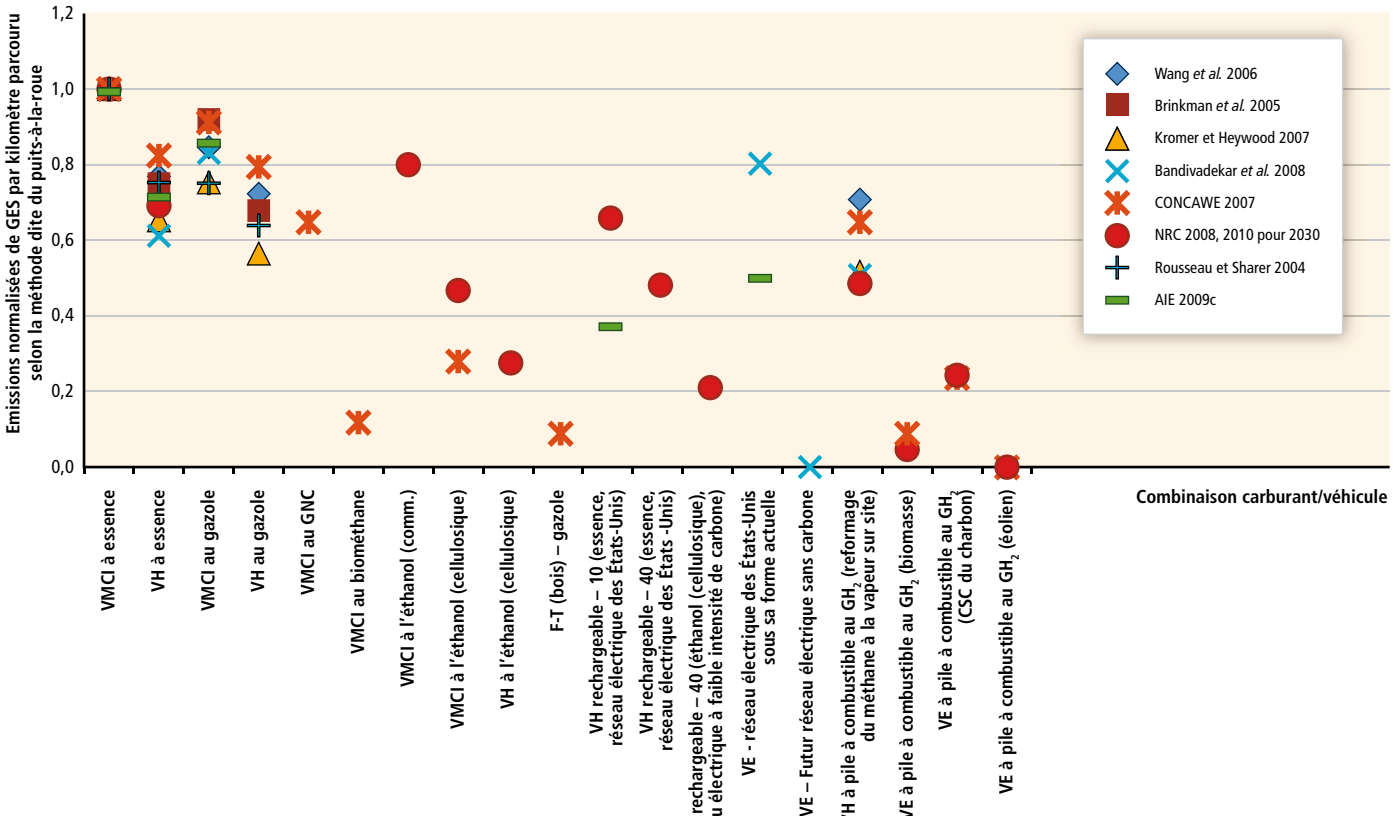


Figure TS.8.7 | Réductions des émissions de GES par kilomètre parcouru mesurées selon la méthode dite du puits-à-la-roue (WTW) (les fourchettes indiquées sont tirées d'une série d'études portant sur diverses combinaisons de véhicules légers et de carburants) et rapportées aux émissions de GES produites par un véhicule léger équipé d'un moteur à combustion interne à essence. [Figure 8.17]

Notes: Pour pouvoir comparer plus facilement les études, les émissions de GES par km mesurées selon la méthode WTW ont été rapportées aux émissions produites par un VMCI à essence (de telle sorte que «VMCI à essence» = 1) qui figurent dans chaque étude (et qui sont comprises entre 170 et 394 g CO_2/km). Pour toutes les combinaisons où figure l'hydrogène, celui-ci est stocké à bord du véhicule sous forme de gaz comprimé (GH_2). GNC = gaz naturel comprimé; SMR = reformage du méthane à la vapeur.

partie non négligeable des émissions de polluants atmosphériques à l'échelle locale. Les véhicules légers ont représenté plus de la moitié de la consommation mondiale de carburants, les véhicules lourds en représentant 24 %, l'aviation 11 %, les transports maritimes 10 % et le rail 3 %. La demande de mobilité croît rapidement, le nombre de véhicules à moteur devant tripler d'ici à 2050 et le transport aérien devant connaître la même évolution. Assurer un approvisionnement énergétique sûr est donc une préoccupation majeure pour le secteur des transports, puisque près de 94 % des carburants proviennent actuellement de produits pétroliers qui, dans la plupart des pays, sont importés. [8.3.1]

Il existe plusieurs voies possibles en matière de carburants et de véhicules, qui vont de la conversion de la source d'énergie primaire à l'utilisation finale en passant par un vecteur énergétique (ou carburant), que ce soit dans des véhicules évolués à moteur à combustion interne, des véhicules électriques à batteries, des véhicules hybrides, des véhicules hybrides rechargeables ou des véhicules électriques à piles à combustible à hydrogène (figure TS.8.6). [8.3.1.2]

De l'avis général, il est absolument indispensable d'améliorer l'efficacité des transports et d'en réduire l'intensité de carbone si l'on veut réussir à diminuer fortement et à long terme les émissions mondiales de GES. Les approches qui peuvent être adoptées pour réduire les émissions liées aux transports sont multiples: on peut notamment réduire la demande de déplacement, accroître l'efficacité des véhicules, passer à des modes de transport plus efficaces ou remplacer les carburants extraits du pétrole par d'autres carburants sans carbone ou à faible teneur en carbone (y compris les biocarburants, l'électricité ou l'hydrogène produits à partir de sources d'énergie primaire pauvres en carbone). Les études fondées sur divers scénarios laissent fortement penser qu'il faudra associer plusieurs technologies pour parvenir à réduire de 50 à 80 % (par rapport aux taux actuels) les émissions de GES d'ici à 2050, tout en satisfaisant la demande croissante d'énergie pour les transports (figure TS.8.7). [8.3.1.1]

L'utilisation qui est actuellement faite des ÉR dans les transports ne représente qu'un faible pourcentage de la demande totale d'énergie et est surtout le fait des chemins de fer électriques et du mélange de biocarburants liquides avec des produits pétroliers. Des millions de véhicules légers capables d'utiliser des mélanges à forte teneur en biocarburants sont déjà présents dans le parc automobile mondial, et la technologie des biocarburants est bien maîtrisée sur le plan commercial, tout comme l'utilisation du biométhane comprimé dans des véhicules conçus pour fonctionner au gaz naturel comprimé. [8.2.3]

Cependant, le passage à de nouveaux carburants et à de nouveaux types de moteurs est un processus complexe dans lequel interviennent des facteurs tels que le développement technique, le coût, les infrastructures, l'accueil favorable des consommateurs et les incidences sur l'environnement et les ressources. Les problèmes que pose cette transition ne sont pas les mêmes pour les biocarburants, l'hydrogène ou les véhicules électriques (tableau TS.8.2), aucune option n'étant sans conteste supérieure aux autres alors que toutes ont besoin de plusieurs décennies pour être utilisées à grande échelle. Si les biocarburants ont largement fait leurs preuves, leur part dans les carburants destinés aux transports routiers étant d'environ 2 % en 2008, ils présentent

Tableau TS.8.2 | Problèmes posés par le passage aux biocarburants, à l'hydrogène et à l'électricité utilisés comme carburants destinés aux véhicules légers [synthèse établie d'après 8.3.1]

État de la technique	Biocarburants	Hydrogène	Électricité
Ressources primaires existantes ou potentielles	Sucre, amidon, cultures oléagineuses; cultures cellulosiques; résidus forestiers et agricoles et déchets solides; huiles d'algues et autres huiles biologiques.	Combustibles fossiles; nucléaire; toutes les ÉR. Grande base de ressources énergétiques renouvelables potentielle, mais les imperfections et les coûts de la conversion en H_2 peuvent poser problème.	Combustibles fossiles; nucléaire; toutes les ÉR. Grande base de ressources énergétiques renouvelables potentielle.
Production de carburants	Première génération: éthanol tiré des cultures destinées à la production de sucre et d'amidon, biométhane, biogazole. Biocarburants de pointe de deuxième génération, tirés p.ex. de la biomasse cellulosique, de biodéchets, de biohuiles et d'algues, pas avant 2015 au plus tôt.	H_2 commercial d'origine fossile destiné à des applications industrielles à grande échelle, mais pas compétitif comme carburant. Le H_2 renouvelable est généralement plus cher.	Énergie commerciale aisément disponible. L'électricité tirée des ÉR peut être plus chère, mais est préférée dans le cadre des transports en raison des faibles émissions de GES pendant le cycle de vie.
Véhicules	Il existe des millions de véhicules à alimentation polyvalente qui utilisent de fortes proportions d'éthanol. Les VMCI conventionnels ne peuvent utiliser que des mélanges à faible teneur en éthanol (< 25 %). Un certain nombre de tracteurs et de machines agricoles disponibles dans le commerce peuvent fonctionner au biogazole pur.	Véhicules électriques à piles à combustible à hydrogène de démonstration. Il n'y aura pas de version commerciale avant 2015 à 2020.	VHR de démonstration. Il n'y aura pas de version commerciale avant 2012 à 2015. Recours aux VE actuellement limité. Pas de version commerciale avant 2015 à 2020.
Coûts[1] comparés à ceux des VMCI à essence			
Augmentation du prix du véhicule par rapport aux futurs VMCI à essence (dollars É.-U.$_{2005}$	Prix similaire.	Les véhicules électriques à piles à combustible à hydrogène connaîtront (d'ici à 2035) une augmentation de prix > 5 300 dollars É.-U.	Connaîtront (d'ici à 2035) une augmentation de prix > 5 900 dollars É.-U. (VHR) et > 14 000 dollars É.-U. (VE)
Coût du carburant (dollars É.-U.$_{2005}$/km)	Le coût du carburant par km varie en fonction du type de biocarburant et du niveau des subventions agricoles. Le biocarburant peut être compétitif si le prix unitaire de l'énergie est égal à celui de l'essence ou du gazole. Au Brésil, l'éthanol est compétitif sans subventions.	Coût cible du carburant fixé à 3 à 4 dollars É.-U./kg pour une infrastructure H_2 bien développée, ce qui peut s'avérer optimiste. Utilisé dans les véhicules électriques à piles à combustible à hydrogène, il est compétitif par rapport à l'essence dans les véhicules hybrides et électriques disponibles dans le commerce à un prix de 0,40 à 0,53 dollar É.-U. /l. Fondé sur l'hypothèse selon laquelle un véhicule électrique à piles à combustible à hydrogène consomme deux fois moins de carburant qu'un VMCI à essence. L'hydrogène obtenu à partir d'ÉR est environ 1,5 à 3 fois plus cher que l'hydrogène provenant d'autres sources.	Le coût de l'électricité par km, quand le prix d'achat de l'énergie varie de 0,10 à 0,30 dollar É.-U./kWh, est compétitif par rapport à l'essence si celle-ci s'achète au prix de 0,3 à 0,9 dollar É.-U./l (en supposant que les VE consomment 3 fois moins de carburant que les VMCI à essence).
Compatibilité avec les infrastructures existantes	Partiellement compatibles avec le réseau existant de distribution de pétrole. Il se peut qu'une infrastructure de distribution et de stockage distincte soit nécessaire pour l'éthanol.	Besoin d'une nouvelle infrastructure H_2, ainsi que de sources de production de H_2 renouvelables. La mise en place de l'infrastructure doit être coordonnée avec la croissance du marché des véhicules.	Importante infrastructure électrique en place. Nécessité d'ajouter le coût des appareils de rechargement à domicile et publics, des sources d'ÉR et de la modernisation du transport et de la distribution (surtout pour les chargeurs rapides).
Accueil favorable des consommateurs	Dépend du coût comparatif des carburants. Les véhicules fonctionnant à l'alcool peuvent avoir un rayon d'action moindre que ceux à essence. Effet de coût possible sur les cultures vivrières. Les questions relatives à l'utilisation des terres et à l'eau peuvent jouer un rôle.	Dépend du coût comparatif des véhicules et des carburants. Idée que se fait le public de la sécurité. Peu de stations publiques de ravitaillement en carburant sur les premiers marchés.	Coût initial du véhicule élevé. Coût de l'électricité élevé en cas de chargement pendant les périodes de pointe. Rayon d'action limité sauf pour les VHR. Temps de rechargement raisonnable à long, mais possibilité de recharger à domicile. Forte dégradation des performances lors d'hivers très rigoureux ou d'étés très chauds. Peu de stations publiques de ravitaillement en carburant sur les premiers marchés.
Émissions de GES	Dépendent des matières premières, du procédé et de la question de l'utilisation des terres[2]. Faibles pour les carburants tirés de résidus de la biomasse, notamment la canne à sucre. À court terme, les émissions peuvent être élevées pour l'éthanol de maïs. Probablement plus faibles pour les biocarburants de pointe de deuxième génération.	Dépendent du mélange de l'approvisionnement en énergie pour la production de H_2. Par rapport aux futurs VMCI à essence hybrides, les émissions de GES des véhicules électriques à piles à combustible à hydrogène utilisant du H_2 de gaz naturel, mesurées selon la méthode WTW, peuvent être un peu plus faibles ou un peu plus fortes, selon les hypothèses. Peuvent être quasi nulles pour les ÉR ou le nucléaire.	Dépendent du mélange de l'approvisionnement en énergie du réseau électrique. En cas de mélange où le charbon prédomine, les VE et VHR rejettent autant ou plus d'émissions de GES, mesurées selon la méthode WTW, que les VH à essence. Avec une plus forte proportion d'ÉR et une électricité à faible intensité de carbone, les émissions mesurées selon cette méthode sont plus faibles.
Consommation de pétrole	Faible pour les mélanges	Très faible	Très faible
Considérations concernant l'environnement et la durabilité			
Pollution de l'air	Similaire à celle de l'essence. Problèmes supplémentaires pour l'éthanol en raison de la perméation de composés organiques volatils à travers les joints d'étanchéité des réservoirs de carburant. Émissions d'aldéhyde.	Véhicule à émissions nulles.	Véhicule à émissions nulles.
Utilisation de l'eau	Supérieure à l'essence, en fonction des besoins en matières premières et en irrigation des cultures.	Potentiellement faible, mais dépendant de la filière choisie, l'électrolyse et le reformage à la vapeur nécessitant de l'eau.	Potentiellement faible, mais dépendant de la filière choisie pour la production d'électricité.
Utilisation des terres	Pourrait faire concurrence à la production de produits alimentaires et de fibres sur les terres cultivées.	Fonction de la filière choisie.	Fonction de la filière choisie.
Utilisation des matériaux		Platine dans les piles à combustible. Néodyme et autres terres rares dans les moteurs électriques. Recyclage des matériaux.	Lithium dans les batteries. Néodyme et autres terres rares dans les moteurs électriques. Recyclage des matériaux.

Notes: 1) Les coûts indiqués ne comprennent pas toujours le remboursement des coûts supplémentaires liés à l'achat d'un premier véhicule. 2) Les émissions de GES indirectes liées à l'utilisation des terres en rapport avec les biocarburants ne sont pas comptabilisées.

des problèmes de durabilité [2.5]. De nombreux véhicules à piles à combustible à hydrogène ont fait l'objet de démonstrations, mais il est peu probable qu'ils soient commercialisés avant 2015 à 2020 au plus tôt en raison des obstacles que constituent la longévité des piles à combustible, leur coût, les problèmes posés par le stockage de l'hydrogène à bord et l'existence d'infrastructures adaptées. Pour les VE et les VHR (véhicules hybrides rechargeables), le coût et la durée de vie relativement courte des batteries actuelles, le rayon d'action limité des véhicules entre deux rechargements et le temps que ces rechargements prennent peuvent faire obstacle au bon accueil que pourraient leur réserver les consommateurs. La conception des VE et des VHR évolue rapidement, stimulée par de récentes mesures de politique générale dans le monde entier, et plusieurs entreprises ont fait part de leur intention de les commercialiser. Une stratégie pourrait consister à introduire d'abord les VHR tout en développant et en renforçant la technologie des batteries. Pour les véhicules électriques et à hydrogène, la mise en place à grande échelle de l'infrastructure nécessaire pour développer un système de transport pratique pourrait prendre plusieurs décennies.

Un avantage des biocarburants est leur relative compatibilité avec l'infrastructure des combustibles liquides déjà en place. Les biocarburants peuvent être mélangés aux produits pétroliers, et la plupart des véhicules à MCI peuvent rouler avec des mélanges, certains même avec du biocarburant pur. Ils sont similaires à l'essence ou au gazole en matière de performance des véhicules et de temps nécessaire pour assurer le ravitaillement en carburant, bien que certains soient limités quant aux concentrations qui peuvent être mélangées et qu'ils ne soient d'ordinaire pas facilement transportables sans modifications des conduites d'acheminement du carburant existantes. Pour certains biocarburants, la question de la durabilité de la ressource en biomasse disponible se pose sérieusement. [2.5, 8.2.4, 8.3.1.2]

L'*hydrogène* permet d'exploiter de nouvelles et vastes ressources énergétiques afin d'offrir des transports à émissions nulles ou pratiquement nulles. La technologie de production d'hydrogène par gazéification de la biomasse est en cours de développement et pourrait devenir compétitive après 2025. L'hydrogène tiré de sources d'ÉR par électrolyse présente des obstacles liés au coût plutôt que des problèmes de faisabilité technique ou de disponibilité des ressources. Au départ, les technologies ÉR et autres technologies pauvres en carbone serviront probablement à produire de l'électricité, ce qui pourrait permettre de coproduire de l'hydrogène à intensité de carbone quasi nulle en même temps que de l'électricité ou de la chaleur dans les complexes énergétiques du futur. L'hydrogène n'est pas encore disponible à grande échelle comme peuvent l'être l'électricité, le gaz naturel, l'essence, le gazole ou les biocarburants, mais pourrait à l'avenir se voir accorder la préférence pour de grands véhicules lourds à long rayon d'action qui nécessitent une durée de ravitaillement en carburant relativement courte. Pour faire bénéficier un grand nombre de véhicules de l'hydrogène, il faudrait édifier une nouvelle infrastructure de ravitaillement, dont la construction pourrait prendre plusieurs décennies. Plusieurs pays ont pris les premières mesures pour en faire bénéficier des parcs de véhicules à titre expérimental et faire la démonstration des technologies de ravitaillement lors de mini-ateliers. [2.6.3.2, 8.3.1, 8.3.1.2]

Pour que l'*électricité* tirée d'ÉR alimente un grand nombre de VE et de VHR sur les marchés futurs, il faudra plusieurs innovations, telles que la mise au point de batteries et un approvisionnement en électricité peu coûteuse pour recharger les VE quand c'est nécessaire. En cas de rechargement de nuit pendant les heures creuses, il est moins probable que de nouvelles capacités soient nécessaires et, à certains endroits, il se peut qu'il y ait une bonne concordance dans le temps avec des ressources éoliennes ou hydroélectriques. Il se peut aussi qu'un réseau souple et/ou un stockage de l'énergie soient nécessaires pour équilibrer la demande d'électricité aux fins du rechargement des véhicules et la disponibilité des sources d'ÉR. [8.2.1]

Outre les véhicules légers, les autres composantes du secteur des transports – véhicules lourds, aviation, transport maritime et rail – peuvent aussi tirer profit de solutions faisant intervenir les ÉR et d'une réduction des émissions de GES. Il est indispensable d'avoir recours aux biocarburants si l'on veut augmenter la part des ÉR dans ces sous-secteurs, mais il faudra probablement modifier la conception actuelle des MCI pour leur permettre de fonctionner avec des mélanges à forte teneur en biocarburants (plus de 80 %). L'aviation est peut-être moins bien placée que les autres sous-secteurs pour changer de carburant en raison des exigences en matière de sécurité et de la nécessité de réduire au minimum le poids et le volume du carburant utilisé. Plusieurs compagnies aériennes et constructeurs d'avions ont cependant procédé à des vols d'essai de démonstration utilisant différents mélanges de biocarburants, mais ceux-ci nécessitent beaucoup plus de traitement que les carburants routiers pour garantir que les normes très strictes des carburéacteurs soient respectées, en particulier à basses températures. Pour le transport par rail, comme à peu près 90 % du secteur est alimenté au gazole, les deux solutions qui s'imposent d'entrée de jeu pour mettre en valeur les ÉR sont le développement de l'électrification et le recours accru au biogazole. [8.3.1.5]

Eu égard à toutes ces incertitudes et aux difficultés que soulève la réduction des coûts, il importe de garder à l'esprit une série d'options à longue échéance, et notamment des changements de comportement (réduction du nombre de véhicules-kilomètres par an ou du nombre de kilomètres parcourus en avion, par exemple), des véhicules à meilleur rendement énergétique ou une gamme de carburants à faible émission de carbone, par exemple. [8.3.1.5]

8.7.2 Bâtiments et ménages

Le secteur des bâtiments offre un logement et toute une gamme de services énergétiques pour soutenir les moyens de subsistance et contribuer au bien-être des populations des pays développés comme des pays en développement. En 2008, il a représenté à peu près 120 EJ, soit environ 37 % du total de la consommation mondiale d'énergie finale (dont 30 à 45 EJ d'énergie primaire issue de la biomasse traditionnelle utilisée pour la cuisson des aliments et le chauffage). Ce sont généralement les combustibles fossiles (brûleurs à mazout, chauffe-eau à gaz) et l'électricité (ventilateurs et climatiseurs) qui satisfont la large part de la demande énergétique totale de ce secteur se rapportant à la cuisson des aliments et au chauffage. Dans de nombreuses régions, ces sources d'énergie peuvent être remplacées avantageusement par des systèmes de chauffage et de refroidissement urbain ou par l'emploi direct de systèmes faisant appel aux ÉR dans les bâtiments, tels que les granulés tirés de la biomasse moderne et les poêles fermés, les pompes à chaleur (y compris géothermiques), le chauffage solaire de l'eau et des espaces domestiques ou les systèmes de réfrigération solaire par sorption. [2.2, 8.2.2, 8.3.2]

Les technologies de production d'électricité à partir d'ÉR intégrées dans les bâtiments (comme les panneaux photovoltaïques) permettent à ces derniers de fournir de l'énergie au lieu d'en consommer. L'intégration des ÉR dans le milieu urbain existant, associée à des appareils efficaces sur le plan énergétique et à la conception de «constructions écologiques», est un élément clé de leur mise en valeur. Pour le sous-secteur des bâtiments à usage résidentiel ou commercial, les vecteurs d'énergie et les systèmes de fourniture de services énergétiques varient en fonction des caractéristiques locales et des ressources énergétiques renouvelables d'une région donnée, de sa richesse et de l'âge moyen des bâtiments et des infrastructures actuels, qui influe sur la rotation du parc immobilier. [8.3.2]

Les caractéristiques et conditions de la demande énergétique dans les bâtiments neufs ou existants, tout comme les perspectives d'intégration des ÉR, diffèrent selon le lieu et la conception architecturale. Dans les établissements urbains et ruraux des pays développés, la plupart des bâtiments sont reliés aux réseaux d'alimentation en électricité, d'adduction d'eau et d'évacuation des eaux usées. Avec un faible taux de rotation du parc immobilier de 1 % par an à peu près dans les pays développés, la conversion future des bâtiments existants devra jouer un grand rôle dans l'intégration des ÉR, tout comme les améliorations en matière de rendement énergétique. Parmi les exemples possibles de telles conversions, citons l'installation de chauffe-eau solaires et de pompes à chaleur géothermiques ou la mise au point ou l'extension de systèmes de chauffage et de refroidissement urbain qui, grâce à leur souplesse d'utilisation par rapport aux sources de froid ou de chaleur, permettent de passer, avec le temps, à une plus grande proportion d'ÉR. Cela peut exiger des investissements initiaux relativement élevés et de longues durées de remboursement, qui peuvent être éventuellement atténués par la modification des permis de construire et des réglementations en matière d'urbanisme dans un sens plus favorable, par des conceptions architecturales allant dans le sens d'un meilleur rendement énergétique et par l'application de mesures d'incitation économiques et de mesures financières. [8.2.2, 8.3.2.1]

La plupart des zones urbaines des pays en développement disposent d'un réseau d'alimentation en électricité, même si le système d'approvisionnement a souvent une capacité limitée et est rarement fiable. Une meilleure intégration des technologies ÉR faisant appel aux ressources énergétiques renouvelables locales pourrait contribuer à garantir la sûreté de l'approvisionnement énergétique, tout en améliorant l'accès à l'énergie. Dans les établissements urbains et ruraux des pays en développement, l'emploi non durable de biomasse et de charbon de bois fait souvent partie des modes de consommation énergétique. Le défi consiste à inverser la tendance à consommer de plus en plus de biomasse traditionnelle en donnant plus largement accès à des vecteurs et à des services énergétiques modernes et en faisant une plus grande place aux ÉR grâce à des mesures d'intégration appropriées. La très large répartition de l'énergie solaire et d'autres ressources énergétiques renouvelables est favorable à leur intégration dans des bâtiments nouveaux ou existants, si modestes soient-ils, y compris dans des habitations en zone rurale non reliées aux réseaux d'alimentation en énergie. [8.2.2.2, 8.2.5]

8.7.3 Industrie

Les industries manufacturières représentent quelque 30 % de la consommation mondiale d'énergie finale, même si la proportion varie très nettement d'un pays à l'autre. Ce secteur est très divers, mais environ 85 % de l'énergie utilisée à des fins industrielles l'est par les industries «lourdes» qui consomment le plus d'énergie (sidérurgie, métaux non ferreux, produits chimiques et engrais, raffinage du pétrole, extraction de minerais, pâtes et papier, etc.). [8.3.3.1]

Techniquement parlant, rien ne s'oppose à ce qu'à l'avenir, l'utilisation directe et indirecte des ÉR soit davantage répandue dans l'industrie. Leur intégration peut néanmoins être limitée, à court terme, par des facteurs comme le manque de terres et d'espace ou des exigences en faveur d'une grande fiabilité et d'un fonctionnement en continu. Outre l'intégration de plus fortes proportions d'ÉR, les principales mesures pour réduire la demande d'énergie de l'industrie et/ou les émissions de GES sont en particulier l'amélioration du rendement énergétique, le recyclage des matériaux, le CSC pour les industries qui émettent du CO_2 (par exemple les cimenteries) et le remplacement des matières premières obtenues au moyen de combustibles fossiles. De plus, l'industrie peut fournir des dispositifs de prise en compte de la demande qui joueront probablement un rôle plus important dans les futurs réseaux d'alimentation électrique où les sources d'ÉR variables tiendront une plus grande place. [8.3.3.1]

Principales possibilités d'intégration des ÉR dans l'industrie:

- Utilisation directe de combustibles tirés de la biomasse et de résidus de procédé en vue d'une production sur place et utilisation de biocombustibles, de la chaleur et de la cogénération; [2.4.3]
- Utilisation indirecte par le biais d'un usage accru de l'électricité produite à partir d'ÉR, notamment au moyen de procédés électrothermiques; [8.3.3]
- Utilisation indirecte par le biais de l'achat d'autres vecteurs énergétiques à base d'ÉR, dont la chaleur, les combustibles liquides, le biogaz et, peut-être plus largement à l'avenir, l'hydrogène; [8.2.2–8.2.4]
- Utilisation directe de l'énergie thermique solaire pour répondre à la demande de chaleur et de vapeur à des fins industrielles, bien qu'il en existe peu d'exemples à ce jour; [3.3.2]
- Utilisation directe des ressources géothermiques pour répondre à la demande de chaleur et de vapeur à des fins industrielles. [4.3.5]

L'industrie n'est pas seulement un utilisateur potentiel d'ÉR, mais est aussi un fournisseur potentiel de bioénergie sous forme de coproduit. Actuellement, l'utilisation directe des ÉR dans l'industrie est dominée par la biomasse produite dans les industries des pâtes et papier, du sucre et de l'éthanol sous forme de sous-produits de procédé et sert à la cogénération de chaleur et d'électricité, principalement sur place, qui sera utilisée dans le procédé, mais aussi vendue hors site. La biomasse

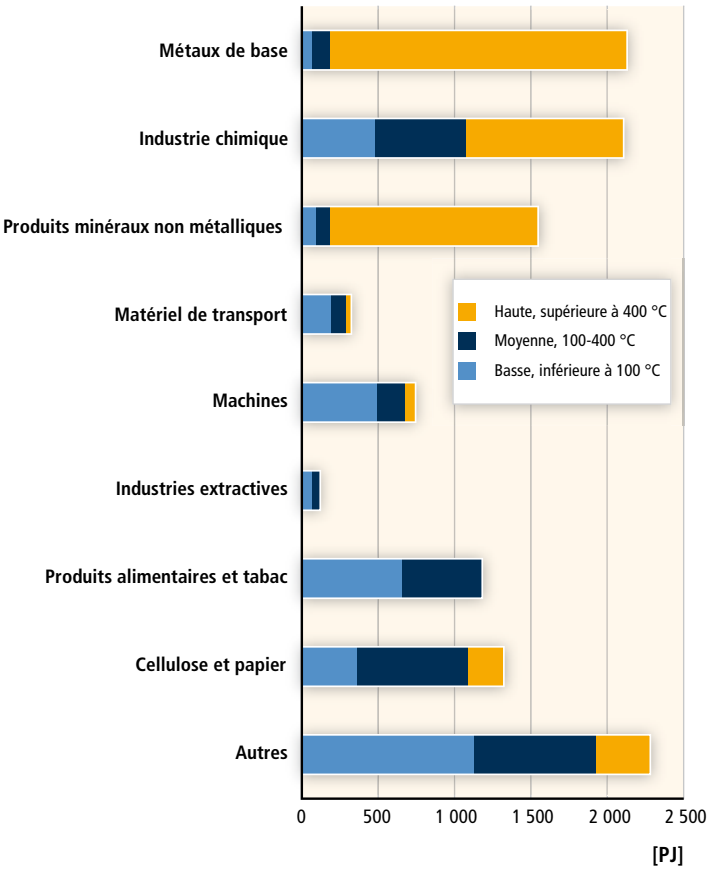


Figure TS.8.8 | Demande de chaleur industrielle pour divers intervalles de température émanant des sous-secteurs de l'industrie lourde et de l'industrie légère, d'après un évaluation faite dans 32 pays européens. [Figure 8.23]

est également un combustible important pour de nombreuses petites et moyennes entreprises comme les briqueteries, notamment sous forme de charbon de bois dans les pays en développement. [8.3.3.1]

Pour les industries à forte intensité énergétique, les voies possibles vers une utilisation accrue des ÉR varient selon les différents sous-secteurs industriels. La biomasse, par exemple, est techniquement capable de remplacer les combustibles fossiles dans les chaudières et les fours ou encore d'assurer le remplacement des produits pétrochimiques par des produits et matériaux biochimiques. Cependant, vu la taille de nombre de procédés industriels, il peut être difficile de se procurer des volumes suffisants de biomasse locale. Le recours à des techniques solaires peut être limité, en certains endroits, par le faible nombre d'heures d'ensoleillement annuel. S'il n'est pas rare que de l'énergie hydroélectrique soit fournie directement aux usines d'aluminium, la meilleure solution, pour nombre de procédés à forte intensité énergétique, consiste à intégrer indirectement les ÉR en passant à l'électricité issue d'ÉR fournie par le réseau ou, à plus long terme, à l'hydrogène. Le vaste éventail de possibilités de production d'électricité à faible intensité de carbone, tout comme la souplesse d'utilisation de cette forme d'énergie, permettent de supposer que les procédés électrothermiques pourraient se développer, à l'avenir, et remplacer les combustibles fossiles dans toute une série de procédés industriels. [8.3.3.2]

Les industries «légères» qui consomment moins d'énergie – parmi lesquelles figurent l'industrie alimentaire, les textiles, les industries légères de fabrication d'appareils et d'électronique, les usines de montage automobile et les scieries –, représentent, malgré leur nombre, une plus faible proportion de la consommation totale d'énergie que les industries lourdes. Une grande partie de leur demande énergétique correspond à la consommation d'énergie des bâtiments à usage commercial pour l'éclairage, le chauffage des locaux, la climatisation, la ventilation et le matériel de bureau. En général, ces industries sont plus souples et offrent des possibilités accrues d'intégration des ÉR par rapport aux industries à forte intensité énergétique. [8.3.3.3]

L'intégration des ÉR en ce qui concerne la chaleur industrielle est réalisable à des températures inférieures à 400 °C environ: pour ce faire, on utilise la combustion de biomasse (notamment du charbon de bois) ainsi que l'énergie thermique solaire ou l'énergie géothermique directe. Pour répondre à la demande de chaleur industrielle au-dessus de 400 °C, les ressources en ÉR, à l'exception de l'énergie solaire à haute température, sont moins indiquées (figure TS.8.8). [8.3.3.3]

La complexité et la diversité des activités industrielles ainsi que la diversité des conditions géographiques et des conditions climatiques locales font que l'on connaît mal les possibilités et les coûts liés à une utilisation accrue des ÉR dans l'industrie. Les perspectives à court terme de parvenir à des proportions plus élevées d'ÉR pourraient résulter de l'utilisation accrue de résidus de procédé, de la cogénération dans les industries basées sur la biomasse et du remplacement des combustibles fossiles utilisés pour le chauffage. Les technologies héliothermiques sont prometteuses, et la mise au point de nouveaux capteurs, le stockage thermique, les systèmes auxiliaires, l'adaptation et l'intégration des procédés sont en cours d'évaluation. Il se peut que l'intégration des ÉR grâce à l'électricité produite à partir de sources d'ÉR pour les électrotechnologies ait la plus grande incidence, aussi bien à court qu'à long terme. [8.3.3.2, 8.3.3.3]

Dans bon nombre de régions, l'utilisation des ÉR dans l'industrie a eu du mal à faire face à la concurrence par le passé en raison du prix relativement faible des combustibles fossiles ainsi que de la faiblesse, voire de l'absence, des taxes sur l'énergie et le carbone. Les politiques d'appui aux énergies renouvelables pratiquées dans différents pays ont tendance à se concentrer davantage sur les secteurs des transports et des bâtiments que sur l'industrie, de sorte que le potentiel d'intégration des ÉR est relativement incertain. Là où de telles politiques ont été appliquées, on a pu observer une mise en valeur réussie de ces énergies. [8.3.3.3]

8.7.4 Agriculture, foresterie et pêches

L'agriculture est un secteur qui consomme relativement peu d'énergie, puisqu'il n'utilise qu'environ 3 % du total de l'énergie consommée à l'échelle du globe. Ce secteur englobe de grandes exploitations et de vastes forêts en propriété collective ainsi que des exploitations qui pratiquent une agriculture de subsistance et des communautés de pêcheurs dans les pays en développement. La consommation indirecte d'énergie pour la fabrication d'engrais et de machines, qui est assez élevée, est incluse dans le secteur de l'industrie. Le pompage de l'eau à des fins d'irrigation représente d'ordinaire la majeure partie de la demande énergétique des agriculteurs, avec le gazole utilisé pour les machines et l'électricité pour le matériel de traite et de réfrigération et le matériel fixe. [8.3.4.1]

Dans bien des régions, les terres cultivées pourraient servir en même temps à la production d'ÉR. L'utilisation polyvalente des terres pour l'agriculture et à des fins énergétiques devient courante, comme en témoignent, par exemple, les éoliennes construites sur des pâturages; les unités de production de biogaz servant à traiter les déjections animales, les substances nutritives étant utilisées comme engrais; les cours d'eau servant à faire fonctionner des centrales hydroélectriques de petite ou très petite taille; les résidus de cultures recueillis et brûlés pour la production de chaleur et d'électricité; et les cultures énergétiques que l'on fait pousser et que l'on exploite spécialement pour obtenir des matières premières issues de la biomasse destinées à la fabrication de biocarburants liquides et à la production de chaleur et d'électricité (les coproduits servant éventuellement à l'alimentation et à la récupération des fibres). [2.6, 8.3.4.2, 8.3.4.3]

Puisque les ressources énergétiques renouvelables – dont l'énergie éolienne, l'énergie solaire, les résidus de cultures et les déchets animaux – se trouvent souvent en abondance dans les zones rurales, leur captage et leur intégration peuvent permettre aux propriétaires terriens ou aux responsables d'exploitation de les mettre à profit localement dans le cadre des activités agricoles. Ceux-ci peuvent également engranger des recettes supplémentaires en commercialisant les vecteurs énergétiques tels que l'électricité ou le biogaz obtenus à partir d'ÉR. [8.3.4]

Malgré les obstacles qui freinent la mise en valeur des technologies ÉR (notamment les coûts d'investissement élevés, le manque de financement et l'éloignement de la demande énergétique), les énergies renouvelables seront probablement davantage utilisées, à l'avenir, par le secteur agricole mondial pour satisfaire la demande d'énergie destinée à la production primaire et aux activités après récolte, tant à petite qu'à grande échelle. [8.3.4.1–8.3.4.2]

Les stratégies d'intégration susceptibles de favoriser la mise en valeur des énergies renouvelables dans le secteur primaire dépendront en partie des ressources locales et régionales en ÉR, de la structure de la demande énergétique sur l'exploitation, des possibilités de financement des projets et des marchés de l'énergie existants. [8.3.4.3]

9. Les énergies renouvelables dans le contexte d'un développement durable

9.1 Introduction

Le développement durable répond aux préoccupations concernant les rapports entre la société humaine et la nature. Traditionnellement, il a été conceptualisé en un modèle articulé sur trois axes: l'économie, l'écologie et la société, ce qui permet de classer les objectifs du développement en catégories schématiques, les trois axes étant interdépendants et se renforçant mutuellement. Dans un autre cadre conceptuel, le développement durable peut être assimilé à un état intermédiaire entre les deux paradigmes d'une faible durabilité et d'une forte durabilité. Les deux paradigmes diffèrent selon les hypothèses concernant la substituabilité du capital naturel et du capital humain. Les ÉR peuvent contribuer aux objectifs de développement du modèle à trois axes et être évaluées selon un développement durable faible ou fort, vu que l'exploitation des ÉR se définit comme un soutien du capital naturel tant que l'utilisation des ressources ne réduit pas le potentiel d'exploitation à l'avenir. [9.1]

9.2 Interactions du développement durable et des énergies renouvelables

Le rapport entre les ÉR et le développement durable peut être considéré comme une hiérarchie d'objectifs et de contraintes qui inspire des considérations tant mondiales que régionales ou locales. Bien que la contribution précise des ÉR au développement durable reste à évaluer sur le plan national, ces formes d'énergie offrent la possibilité de concourir à la réalisation de divers objectifs importants du développement durable: 1) le développement économique et social; 2) l'accès à l'énergie; 3) la sécurité énergétique; 4) l'atténuation des effets des changements climatiques et la réduction des incidences sur l'environnement et la santé. L'atténuation des effets des changements climatiques dangereux d'origine humaine est considérée comme l'un des principaux moteurs de l'accroissement de la mise en valeur des ÉR dans le monde. [9.2, 9.2.1]

Ces objectifs peuvent être liés au modèle à trois axes et aux paradigmes d'un développement durable faible ou fort. Les notions relatives au développement durable donnent aux décideurs des cadres utiles pour évaluer la contribution des ÉR au développement durable et pour définir des mesures économiques, sociales et environnementales appropriées. [9.2.1]

L'emploi d'indicateurs peut aider les pays à suivre les progrès accomplis par les sous-systèmes énergétiques conformément aux principes de la durabilité, bien qu'il existe de nombreuses façons différentes de classer les indicateurs de développement durable. Les évaluations réalisées pour le Rapport et le chapitre 9 sont fondées sur divers outils méthodologiques, y compris des indicateurs ascendants dérivés d'analyses attributives du cycle de vie ou de statistiques sur l'énergie, des méthodes dynamiques de modélisation intégrée et des analyses qualitatives. [9.2.2]

Des paramètres classiques de mesure de la croissance économique (PIB) ainsi que l'indicateur du développement humain, d'une portée plus large sur le plan conceptuel, sont analysés pour évaluer l'apport des ÉR au développement économique et social. Les possibilités d'emploi, qui servent de motivation à certains pays pour soutenir la mise en valeur des ÉR, et des questions essentielles de financement pour les pays en développement sont également abordées. [9.2.2]

L'accès à des services énergétiques modernes, qu'ils soient assurés par des sources renouvelables ou non, est étroitement lié à des mesures de développement, en particulier dans les pays qui en sont à un stade précoce de développement. Il est indispensable de permettre aux membres les plus pauvres de la société d'avoir accès à l'énergie moderne pour pouvoir atteindre chacun des huit objectifs du Millénaire pour le développement. Les indicateurs concrets utilisés comprennent la consommation d'énergie finale par habitant par rapport au revenu ainsi que les données ventilées sur l'accès à l'électricité (en milieu rural et en milieu urbain) et les chiffres correspondant aux fractions de la population qui recourent au charbon ou à la biomasse traditionnelle pour la cuisson des aliments. [9.2.2]

Malgré l'absence d'une définition acceptée par tous, l'expression «sécurité énergétique» peut s'interpréter au mieux comme la robustesse à l'égard des ruptures, parfois brusques, d'approvisionnement en énergie. On peut définir deux grands thèmes relatifs à la sécurité énergétique, que ce soit pour les systèmes actuels ou pour la planification des systèmes futurs faisant appel aux ÉR, à savoir la disponibilité et la répartition des ressources; et la variabilité et la fiabilité de l'approvisionnement en énergie. Les indicateurs utilisés pour obtenir des informations sur le critère de développement durable du point de vue de la sécurité énergétique sont l'importance des réserves, le rapport réserves/production, la part des importations dans la consommation totale d'énergie primaire, la part des importations d'énergie dans le total des importations et la part des sources d'ÉR variables et imprévisibles. [9.2.2]

Pour évaluer la charge globale du système énergétique sur l'environnement et pour établir les compromis possibles, il faut tenir compte d'un ensemble d'incidences et de catégories, au nombre desquelles figurent les émissions massives dans l'atmosphère (en particulier de GES) et dans l'eau et l'utilisation de l'eau, de l'énergie et des sols par unité d'énergie produite, qu'il convient d'évaluer selon les technologies employées. Tout en reconnaissant que les analyses du cycle de vie ne sont pas la seule réponse possible en ce qui concerne la viabilité à long terme d'une technologie donnée, elles constituent une méthode particulièrement utile pour déterminer les incidences totales de la technologie en question sur un système, qui peuvent servir de base de comparaison. [9.2.2]

Les analyses de scénarios donnent des aperçus de la mesure dans laquelle les modèles intégrés tiennent compte des quatre objectifs d'un développement durable selon diverses voies de mise en valeur des ÉR. Pour l'essentiel, ces voies correspondent à des résultats de scénarios par le biais desquels on tente de clarifier les rapports complexes entre les diverses technologies énergétiques à l'échelle planétaire. C'est pourquoi le chapitre 9 se rapporte essentiellement à des scénarios mondiaux issus de modèles intégrés, qui se trouvent également au cœur de l'analyse effectuée dans le chapitre 10. [9.2.2]

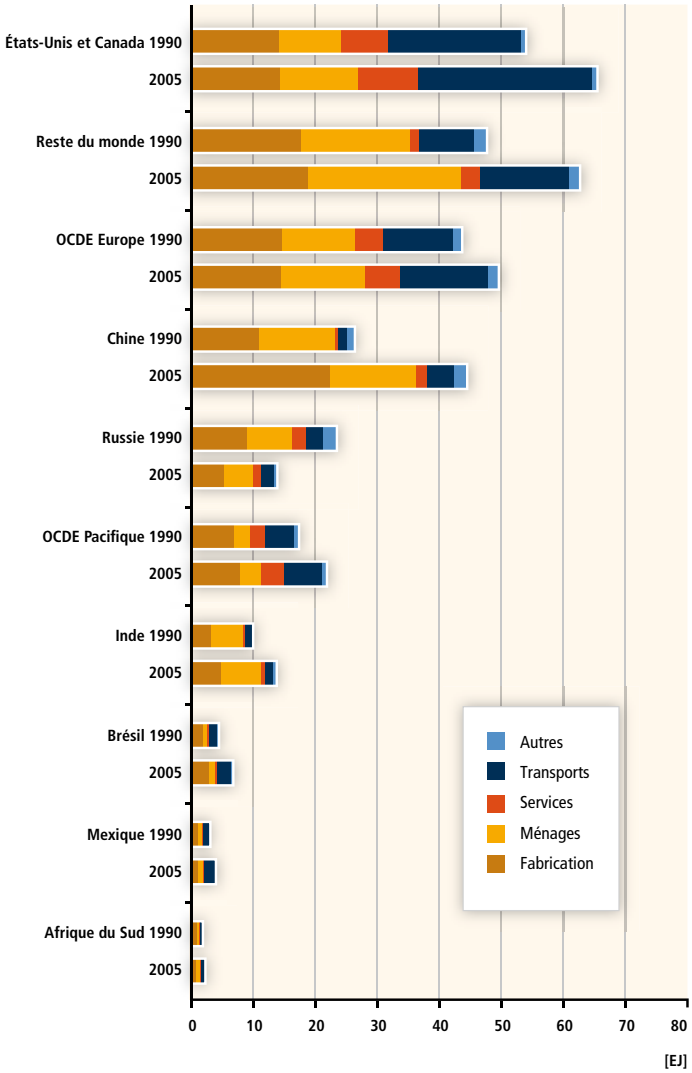


Figure TS.9.1 | Consommation d'énergie (EJ) par secteur économique. On notera que les données sous-jacentes sont calculées au moyen de la méthode du contenu physique de l'AIE et non par la méthode de l'équivalent direct[1]. [Figure 9.2].

Note: 1. Il n'existe de données d'archives sur l'énergie que pour la consommation d'énergie par secteur économique. Il faudrait connaître les divers vecteurs d'énergie employés dans chaque secteur économique pour convertir les données au moyen de la méthode de l'équivalent direct.

9.3 Incidences sociales, environnementales et économiques: évaluation mondiale et régionale

Des pays ayant atteint divers niveaux de développement ont des motifs différents de faire progresser les ÉR. Dans les pays en développement, l'adoption de technologies ÉR est généralement motivée par la perspective d'obtenir un accès à l'énergie, d'offrir des opportunités d'emploi dans l'économie officielle (c'est-à-dire d'emplois juridiquement réglementés et imposables) et de réduire le coût des importations d'énergie (ou, dans le cas des exportateurs d'énergie fossile, de prolonger la durée de vie de leur base de ressources naturelles). Dans les pays industrialisés, les principales raisons d'encourager la mise en valeur des ÉR consistent en la possibilité de réduire les émissions de carbone pour atténuer les effets du changement climatique, d'améliorer la sécurité énergétique et de promouvoir activement des transformations structurelles de l'économie, afin de réduire les pertes d'emplois dans des secteurs manufacturiers en déclin grâce à de nouvelles opportunités d'emploi liées aux ÉR. [9.3]

9.3.1 Développement économique et social

Sur le plan mondial, il existe une corrélation positive entre le revenu par habitant et l'utilisation d'énergie par habitant, et la croissance économique peut être considérée comme le facteur le plus pertinent de l'augmentation de la consommation d'énergie depuis quelques dizaines d'années. Toutefois, il n'existe aucun consensus quant à l'évolution du rapport de cause à effet entre la consommation d'énergie et l'augmentation de la production macroéconomique. [9.3.1.1]

À mesure que l'activité économique se développe et se diversifie, une demande de sources d'énergie plus perfectionnées et plus souples se fait jour: d'un point de vue sectoriel, les pays qui en sont aux premiers stades de développement consomment la plus grande partie de leur énergie primaire totale dans le secteur résidentiel (et, dans une moindre mesure, dans le secteur agricole). Dans les pays émergents, le secteur manufacturier est prédominant, alors que dans les pays pleinement industrialisés, les services et les transports prennent une place qui croît régulièrement (voir figure TS.9.1). [9.3.1.1]

Malgré les rapports étroits qui existent entre le PIB et la consommation d'énergie, on observe une grande variété de modes d'utilisation de l'énergie selon les pays: certains, qui ont des revenus élevés par habitant, consomment relativement peu d'énergie, tandis que d'autres restent plutôt pauvres malgré des ressources abondantes en combustibles fossiles, le secteur de l'énergie y étant souvent largement subventionné. Il existe une hypothèse selon laquelle la croissance économique peut être largement dissociée de la consommation d'énergie en raison de la diminution régulière de l'intensité énergétique. En outre, on affirme souvent que les pays en développement et à économie en transition peuvent sauter des étapes, c'est-à-dire limiter leur consommation d'énergie en utilisant des technologies énergétiques modernes et très efficaces. [9.3.1.1, encadré 9.5]

L'accès à une énergie propre et fiable est une condition préalable importante pour les déterminants fondamentaux du développement humain tels que la santé, l'éducation, l'égalité des sexes et la sécurité de l'environnement. Si l'on utilise l'indicateur du développement humain comme indicateur indirect du développement, les pays dont l'indicateur du développement humain est élevé consomment en général des quantités relativement importantes d'énergie par habitant, et aucun pays n'a atteint une valeur élevée ou moyenne de cet indicateur sans avoir largement accès à un approvisionnement en énergie non traditionnelle. Une quantité minimale d'énergie est nécessaire pour garantir un niveau de vie acceptable (par ex. 42 GJ par habitant), une consommation plus élevée d'énergie n'entraînant qu'une amélioration minime de la qualité de la vie. [9.3.1.2]

Les estimations des effets nets des ÉR sur l'emploi diffèrent en raison de désaccords concernant le recours à la méthodologie appropriée. Toutefois, un consensus semble se dégager quant aux effets positifs à long terme des ÉR, qui apportent une contribution majeure à la création d'emplois, comme en témoignent de nombreuses stratégies nationales concernant la croissance verte. [9.3.1.3]

Dans la plupart des cas, le coût purement économique des ÉR est supérieur à celui de la production d'énergie fondée sur des combustibles fossiles. Dans les pays en développement, en particulier, les coûts connexes sont un facteur majeur qui détermine l'intérêt que présentent les ÉR pour répondre à une demande croissante d'énergie, et certains se sont inquiétés du fait que l'augmentation des prix

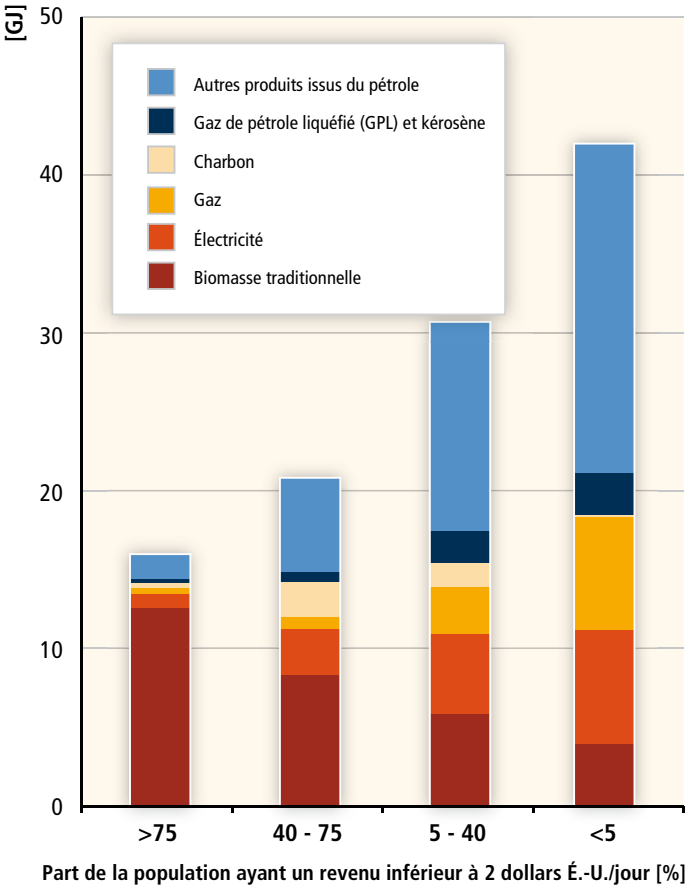


Figure TS.9.2 | Rapport entre la consommation finale d'énergie par habitant et le revenu dans les pays en développement. Les données se rapportent à la dernière année pour laquelle on dispose de valeurs chiffrées pendant période 2000-2008. [Figure 9.5]

de l'énergie risque de nuire aux perspectives de développement des pays en voie d'industrialisation. Globalement, les considérations de coût ne peuvent être abordées indépendamment du régime de partage des charges adopté, c'est-à-dire sans avoir au préalable précisé qui assume les frais liés aux avantages découlant de la réduction des émissions de GES, qu'on peut caractériser comme un bien public mondial. [9.3.1.4]

9.3.2 Accès à l'énergie

Actuellement, une partie importante de la population du globe n'a pas accès ou a un accès limité à des services énergétiques modernes et non polluants. Du point de vue du développement durable, pour promouvoir une énergie durable, il faut mettre des services énergétiques à la disposition de groupes qui, à ce jour, n'y ont pas ou peu accès: les pauvres (définis par la richesse, le revenu ou des indicateurs plus intégratifs), les habitants des zones rurales et ceux qui ne sont pas reliés au réseau électrique. [9.3.2]

En tenant compte des contraintes existantes concernant la disponibilité et la qualité des données, on estimait en 2009 qu'environ 1,4 milliard de personnes n'avaient pas accès à l'électricité. Environ 2,7 milliards de personnes avaient recours à la biomasse traditionnelle pour la cuisson des aliments, d'où de graves problèmes de santé (notamment la pollution de l'air à l'intérieur des habitations) et d'autres charges sociales (par ex. le temps consacré à recueillir des combustibles) dans les pays en développement. Étant donné le rapport étroit qui existe entre le revenu des ménages et l'utilisation de combustibles de faible qualité (figure TS.9.2), il importe de renverser la tendance à la consommation d'une biomasse inefficace en remplaçant son emploi actuel, souvent non durable, par des solutions plus viables et plus efficaces. [9.3.2]

Si l'on définit l'accès à l'énergie comme un «accès à des services énergétiques propres, fiables et économiques pour la cuisson des aliments, le chauffage, l'éclairage ou les communications et à des fins de production», on illustre le caractère graduel du processus consistant à grimper aux barreaux de l'échelle énergétique. Même un niveau basique d'accès à des services énergétiques modernes peut avoir des avantages importants pour les collectivités et les ménages. [9.3.2]

Dans les pays en développement, les réseaux décentralisés faisant appel aux ÉR ont élargi et amélioré l'accès à l'énergie. Ils sont généralement plus compétitifs dans les zones rurales situées très loin du réseau national, et les faibles niveaux d'électrification rurale offre d'importantes possibilités pour les miniréseaux fondés sur les ÉR. En outre, les technologies ÉR non électriques offrent des possibilités de modernisation directe des services énergétiques, par exemple grâce à l'emploi de l'énergie solaire pour chauffer l'eau et sécher les récoltes, de biocarburants pour les transports, de biogaz et de biomasse moderne pour le chauffage, le refroidissement, la cuisson des aliments et l'éclairage et de l'énergie éolienne pour pomper l'eau. Si l'on ne comprend pas encore bien la raison précise pour laquelle les ÉR assurent un accès plus durable à l'énergie que les autres sources d'énergie, certaines de ces technologies permettent aux collectivités locales d'élargir leurs choix énergétiques ; elles stimulent en outre l'activité économique, soutiennent les efforts des entrepreneurs locaux et permettent de satisfaire les besoins et d'assurer les services de base pour l'éclairage et la cuisson des aliments, procurant ainsi des avantages auxiliaires en matière de santé et d'éducation. [9.3.2]

9.3.3 La sécurité énergétique

L'emploi d'ÉR facilite le remplacement des combustibles fossiles, de plus en plus rares. Les estimations présentes du rapport entre les réserves avérées et la production actuelle montrent que, sur le plan mondial, le pétrole sera épuisé dans une quarantaine d'années et le gaz naturel, dans une soixantaine d'années. [9.3.3.1]

Compte tenu du caractère local de nombreuses sources d'énergie renouvelable et du fait qu'elles ne peuvent donc faire l'objet d'échanges internationaux, l'augmentation de leur part dans l'éventail énergétique d'un pays réduit la dépendance de ce dernier par rapport aux importations de combustibles fossiles, dont la répartition spatiale des réserves, la production et les exportations sont très inégales et hautement concentrées dans quelques régions (figure TS.9.3). Dans la mesure où les marchés des ÉR ne se caractérisent pas par une telle concentration géographique des approvisionnements, il devient possible de diversifier l'éventail des sources d'énergie et de réduire la vulnérabilité de l'économie à la volatilité des prix. Pour les pays en développement qui importent du pétrole, une assimilation accrue des technologies ÉR pourrait permettre de réorienter les flux de devises des importations d'énergie vers l'importation de biens qui ne peuvent être produits localement, comme des biens d'équipement hautement techniques. Le Kenya et le Sénégal, par exemple, consacrent plus de la moitié de leurs recettes d'exportation à l'importation d'énergie, alors que l'Inde y consacre plus de 45 %. [9.3.3.1]

Cependant, une dépendance par rapport aux importations peut également se créer pour les technologies nécessaires à la mise en valeur d'ÉR, un accès sûr aux matières premières minérales inorganiques rares requises à un prix raisonnable constituant un défi imminent pour toutes les industries. [9.3.3.1]

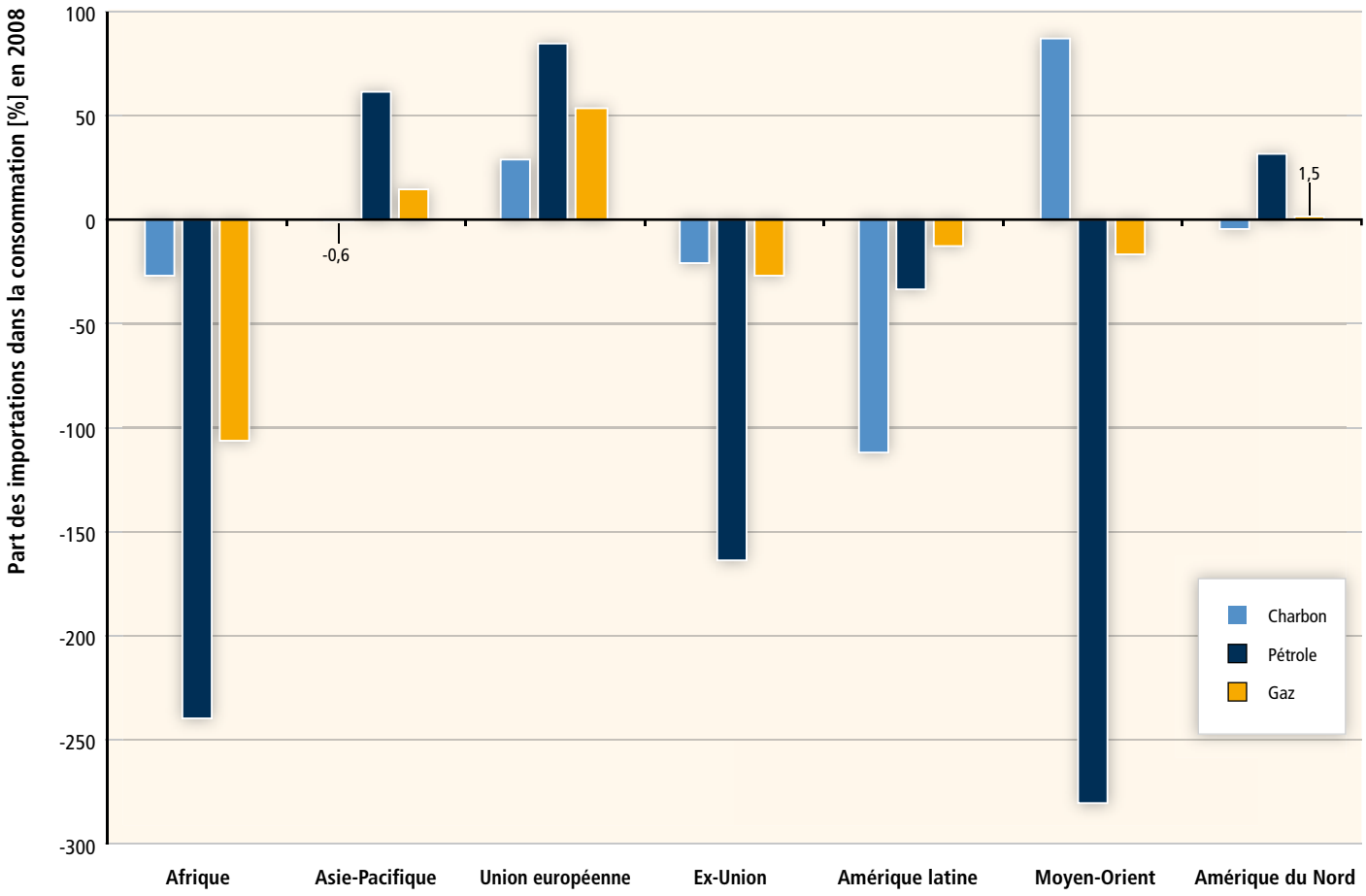


Figure TS.9.3 | Importations d'énergie en tant que part de la consommation totale d'énergie primaire (%) pour le charbon (houille et lignite), le pétrole brut et le gaz naturel dans certaines régions du monde en 2008. Les valeurs négatives désignent des exportateurs nets de vecteurs d'énergie. [Figure 9.6]

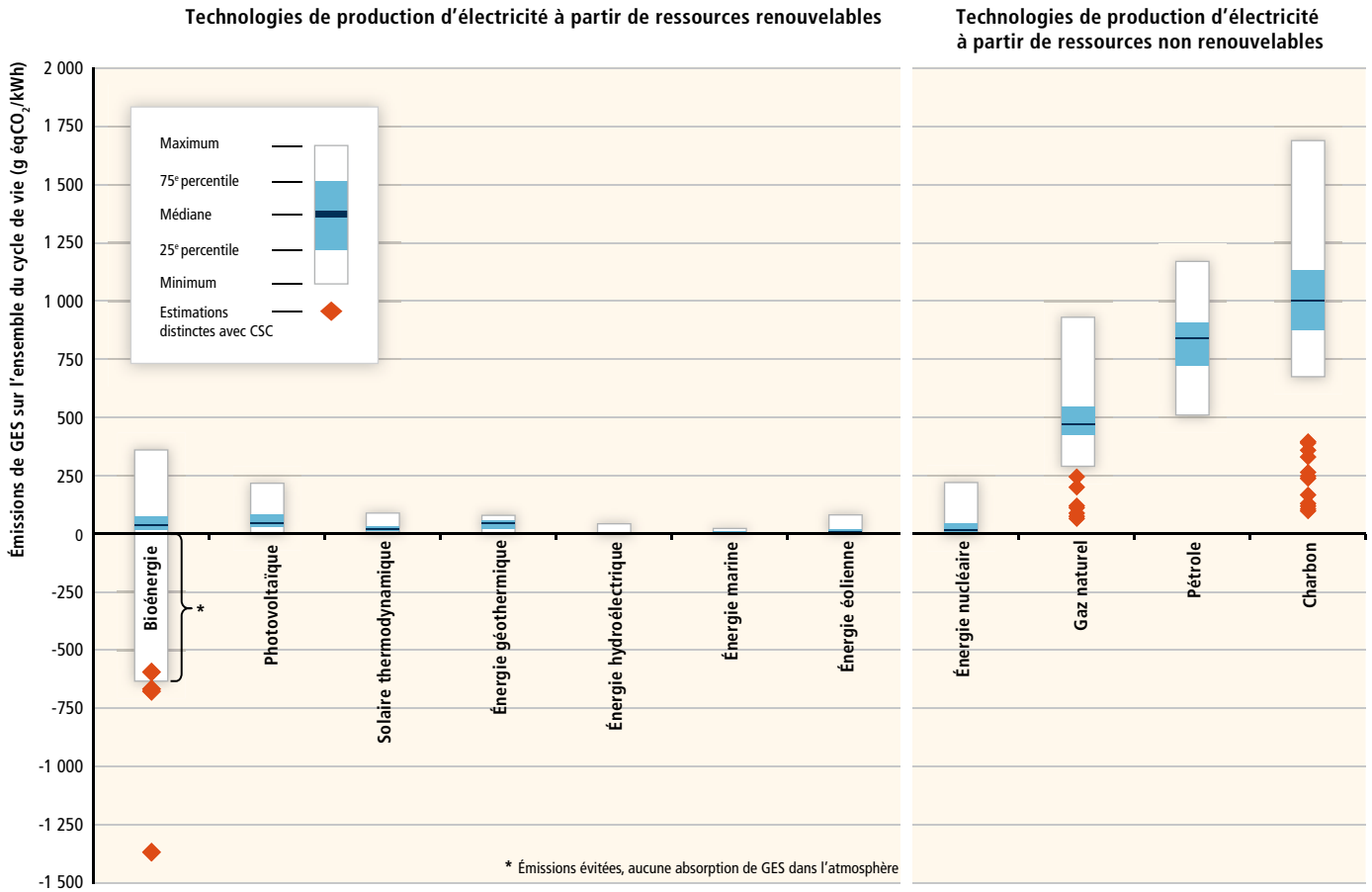
La variabilité de la production assurée par certaines technologies ÉR exige souvent des mesures techniques et institutionnelles correspondant aux conditions locales pour assurer un approvisionnement constant et fiable en énergie. Un accès fiable à l'énergie est particulièrement problématique dans les pays en développement, et des indicateurs de la fiabilité des services d'infrastructure indiquent qu'en Afrique subsaharienne, près de 50 % des entreprises disposent de leurs propres installations de production. Ainsi, de nombreux pays en développement lient précisément l'accès à l'énergie aux questions de sécurité en élargissant la définition de la sécurité énergétique, de sorte qu'elle englobe la stabilité et la fiabilité de l'approvisionnement local. [9.3.3.2]

9.3.4 Atténuation des effets du changement climatique et réduction des incidences sur l'environnement et la santé

Dans le cadre d'un développement durable, il faut veiller à la qualité de l'environnement et empêcher celui-ci de subir des dommages excessifs. La mise en place de technologies à grande échelle s'accompagne toujours de compromis sur l'environnement, et il existe une vaste documentation qui évalue les diverses incidences environnementales de la large gamme des technologies énergétiques (ÉR, énergie fossile et nucléaire) selon une perspective ascendante. [9.3.4]

Les incidences sur le climat par le biais des émissions de GES sont généralement bien documentées, et les analyses du cycle de vie [encadré 9.2] facilitent la comparaison quantitative des émissions du début à la fin, selon les technologies employées. Alors qu'un nombre important d'études portent sur les émissions de polluants atmosphériques et sur l'usage opérationnel de l'eau, il existe peu d'éléments concernant les incidences des émissions pendant leur cycle de vie sur l'eau, l'utilisation des sols et la santé, si ce n'est les éléments relatifs à la pollution de l'air. Les évaluations se concentrent sur les secteurs les mieux couverts par la documentation, tels que la production d'électricité et les carburants destinés aux transports pour les émissions de GES. L'énergie servant au chauffage et aux ménages n'est traitée que brièvement, en particulier pour ce qui concerne la pollution de l'air et la santé. Les incidences sur la biodiversité et les écosystèmes dépendent le plus souvent des sites, sont difficiles à quantifier et sont présentées de façon essentiellement qualitative. Pour tenir compte des charges liées à des accidents par opposition à un fonctionnement normal, un aperçu est donné des risques que présentent les technologies énergétiques. [9.3.4]

Les analyses du cycle de vie concernant la production d'électricité indiquent que les émissions de GES dues à des technologies ÉR sont en général nettement plus faibles que celles qui sont dues aux technologies fondées sur des combustibles fossiles et, dans un certain nombre de cas, inférieures à celles des technologies à combustibles fossiles avec captage et stockage du carbone. La valeur estimée maximale pour le solaire thermodynamique, l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique,



Nombre d'estimations	222(+4)	124	42	8	28	10	126	125	83(+7)	24	169(+12)
Nombre de références	52(+0)	26	13	6	11	5	49	32	36(+4)	10	50(+10)

Figure TS.9.4 | Évaluation des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie (g éqCO_2/kWh) pour les grandes catégories de technologies de production d'électricité et pour certaines technologies intégrées avec captage et stockage du carbone. L'évolution nette des stocks de carbone liée à l'utilisation des sols (s'appliquant essentiellement à la bioénergie et à l'énergie hydroélectrique issue de réservoirs) et les incidences de la gestion des sols ne sont pas prises en compte. Les estimations négatives[1] concernant la bioénergie sont fondées sur des hypothèses relatives aux émissions évitées en provenance des résidus et déchets présents dans les décharges et des coproduits. Les références et les méthodes employées pour l'étude sont présentées à l'annexe II. Le nombre d'estimations est supérieur au nombre de références du fait que, dans de nombreuses études, on a envisagé des scénarios multiples. Les chiffres indiqués entre parenthèses ont trait à des références et à des estimations supplémentaires qui ont permis d'évaluer les technologies recourant au captage et au stockage du carbone. Les informations sur la distribution concernent les estimations présentées dans la documentation actuelle sur l'évaluation du cycle de vie, et pas nécessairement les extrêmes théoriques ou pratiques sous-jacents, ainsi que la tendance centrale véritable lorsque l'on considère toutes les conditions de mise en valeur. [Figure 9.8]

Note: 1. Dans le cadre de la terminologie des analyses du cycle de vie présentées dans le présent rapport, les «estimations négatives» se rapportent aux émissions évitées. Contrairement au cas de la bioénergie avec captage et stockage du carbone, les émissions évitées ne correspondent pas à la suppression d'une certaine quantité de GES dans l'atmosphère.

l'énergie marine et l'énergie éolienne est inférieure ou égale à 100 g éqCO_2/kWh, et la valeur médiane pour l'ensemble des ÉR se situe entre 4 et 46 éqCO_2/kWh. Le quartile supérieur de la distribution des estimations pour le solaire photovoltaïque et la bioénergie est de deux à trois fois supérieur au maximum correspondant aux autres technologies ÉR. Toutefois, l'équilibre en matière de GES de la production de bioénergie comporte davantage d'incertitudes: si l'on exclut les changements d'affectation des sols, la bioénergie pourrait permettre de réduire les émissions de GES par rapport aux systèmes faisant appel à des combustibles fossiles et d'éviter des émissions de GES émanant de résidus et de déchets présents dans les décharges et des coproduits: l'association de la bioénergie et du captage et du stockage du carbone pourrait permettre de plus amples réductions (figure TS.9.4). [9.3.4.1]

Si l'on tient compte des différences de qualité de l'énergie produite, les incidences possibles sur le fonctionnement du réseau électrique du fait de l'adjonction de sources de production variable et des changements directs ou indirects d'affectation des sols pourraient atténuer les avantages que présente, en matière d'émissions de GES, le passage à une production d'électricité renouvelable, sans cependant les réduire à néant. [9.3.4.1]

Certaines valeurs mesurées comme, par exemple, la durée d'amortissement de l'énergie, qui indique le rendement énergétique des technologies ou des combustibles, ont diminué rapidement ces dernières années pour certaines technologies ÉR (par ex. l'énergie éolienne et le solaire photovoltaïque) grâce aux progrès techniques et aux économies d'échelle. Les technologies faisant appel

aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire se caractérisent par des besoins constants en énergie pour extraire et traiter les combustibles, qui pourraient prendre une importance accrue à mesure que la qualité de l'approvisionnement en combustibles traditionnels se réduit et que la part des combustibles non traditionnels augmente. [9.3.4.1]

Pour évaluer les émissions de GES émanant des carburants destinés aux transports, on compare des carburants sélectionnés issus du pétrole, des biocarburants de première génération (éthanol issu de sucre et d'amidon, biogazole issu d'oléagineux et gazole renouvelable) et des biocarburants sélectionnés de nouvelle génération issus de la biomasse lignocellulosique (éthanol et gazole de Fischer-Tropsch), selon la méthode dite du «puits-à-la-roue». Dans cette comparaison, il n'a pas été tenu compte des émissions de GES émanant des changements directs ou indirects d'affectation des sols et d'autres effets indirects (comme le rebond de la consommation de pétrole), mais ces émissions sont abordées séparément ci-après. Le remplacement de carburants issus du pétrole par des biocarburants donne la possibilité de réduire les émissions de GES pendant le cycle de vie directement associées à la chaîne d'approvisionnement en carburants. Alors que les biocarburants de première génération ont un potentiel relativement modeste d'atténuation des GES (- 19 à 77 g éqCO_2/MJ par rapport à 85 à 109 g éqCO_2/MJ pour les carburants issus du pétrole), la plupart des biocarburants de nouvelle génération (avec des émissions de GES pendant le cycle de vie se situant entre - 10 et 38 g éqCO_2/MJ) pourraient avoir des avantages plus sensibles sur le plan climatique. Les estimations des émissions de GES pendant le cycle de vie sont variables et incertaines tant pour les biocarburants que pour les carburants issus du pétrole, du fait essentiellement des hypothèses concernant certains paramètres biophysiques, des problèmes méthodologiques et des incertitudes concernant le lieu et le mode de production des matières premières. [9.3.4.1]

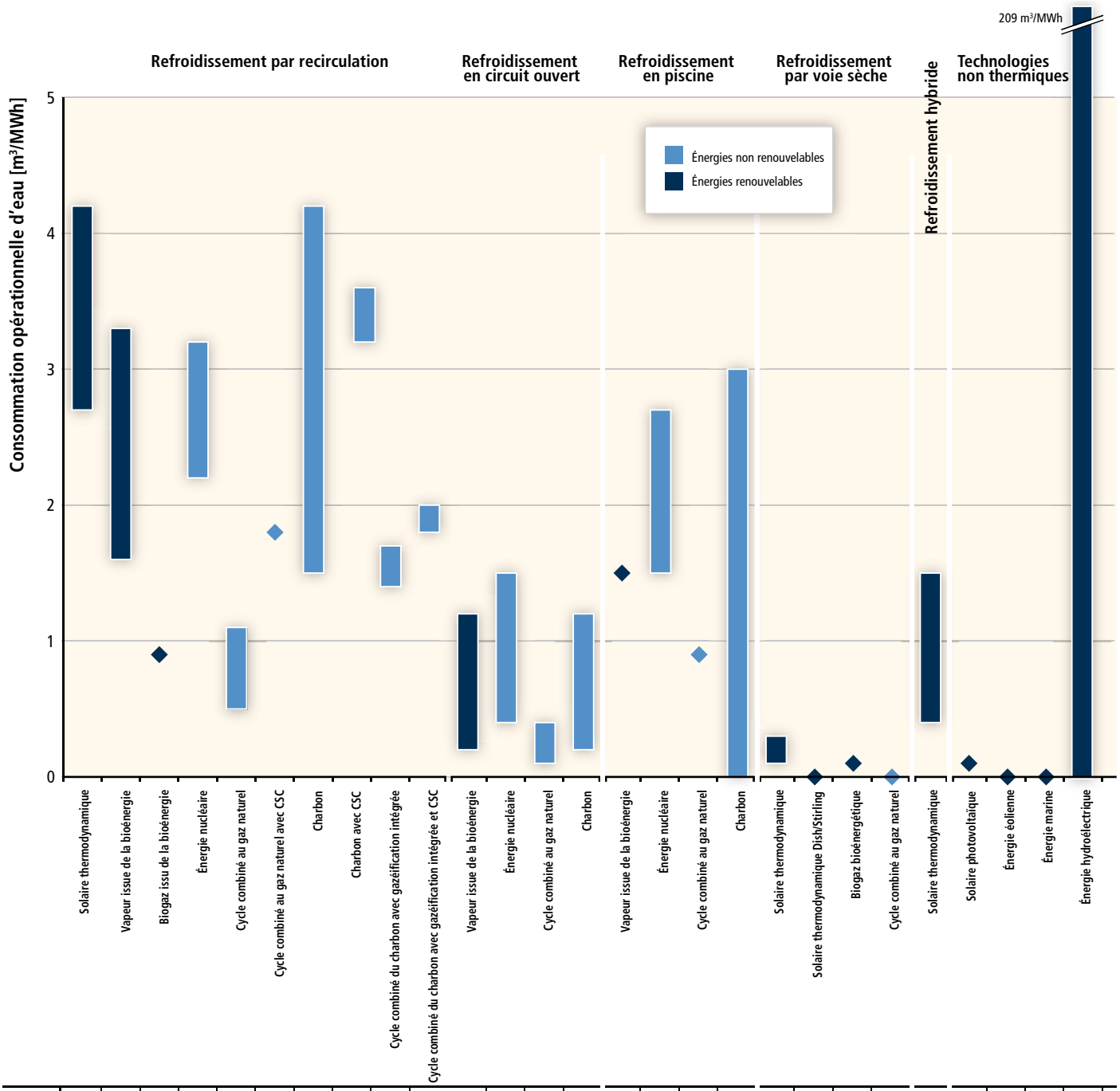
Les émissions de GES pendant le cycle de vie imputables aux changements d'affectation des sols sont difficiles à quantifier du fait que les pratiques de gestion des terres et des ressources en biomasse influent fortement sur les avantages liés à une éventuelle réduction de ces émissions et sur la durabilité de la bioénergie. Les modifications apportées à l'utilisation ou à la gestion des sols, dues directement ou indirectement à la production de biomasse utilisable sous la forme de combustibles, d'électricité ou de chaleur, peuvent entraîner des variations des stocks de carbone terrestre. Selon l'état antérieur des sols convertis, cela peut soit donner lieu à d'importantes émissions initiales, avec un délai de quelques décennies à plusieurs siècles avant que des économies nettes puissent être réalisées, soit améliorer l'absorption nette de carbone par les sols et la biomasse qui les recouvre. L'évaluation des effets nets de la bioénergie sur les GES est rendue difficile par des problèmes d'observation, de mesure et d'attribution des changements indirects d'affectation des sols, qui dépendent du contexte environnemental, économique, social et stratégique et qui ne sont ni observables directement, ni faciles à attribuer à une seule cause. Les estimations indicatives des émissions de GES liées aux changements directs et indirects d'affectation des sols, induites par plusieurs voies concernant des biocombustibles de première génération, donnent les tendances centrales (selon diverses méthodes de prise en compte) à échéance de 30 ans, à savoir 5 à 82 g éqCO_2/MJ pour l'éthanol (blé de l'Union européenne, maïs américain, canne à sucre brésilienne) et 35 à 63 g éqCO_2/MJ pour le gazole (soja et colza). [9.3.4.1]

Les incidences de la pollution atmosphérique locale et régionale constituent une autre catégorie importante d'évaluation, avec des polluants de l'air (particules en suspension, oxydes d'azote (NO_x), dioxyde de soufre (SO_2) et composés organiques volatils autres que le méthane, etc.) qui ont des effets sur le plan mondial [encadré 9.4], régional et local. Par comparaison avec la production d'énergie électrique fossile, les technologies de production d'énergie électrique fondées sur les ÉR sans combustion peuvent réduire sensiblement la pollution de l'air aux niveaux régional et local et atténuer les effets connexes sur la santé (voir la section ci-après). Toutefois, en ce qui concerne les carburants pour les transports, l'effet du passage à des biocarburants sur les émissions au niveau de l'échappement n'est pas encore clair. [9.3.4.2]

Les émissions locales de polluants de l'air émanant de la combustion de combustibles fossiles et de biomasse sont les incidences les plus importantes de l'énergie sur la santé. La pollution de l'air ambiant et la pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments due à la combustion de charbon et de biomasse traditionnelle ont des conséquences majeures pour la santé et sont reconnues comme l'une des causes les plus importantes de morbidité et de mortalité dans le monde, en particulier pour les femmes et les enfants des pays en développement. En 2000, par exemple, des quantifications comparatives des risques pour la santé ont montré que plus de 1,6 million de décès et plus de 38,5 millions d'années de vie corrigées du facteur invalidité (AVCI) pouvaient être attribués à la fumée présente à l'intérieur des bâtiments par suite de la combustion de combustibles solides. Outre un changement de combustibles, les options en matière d'atténuation comprennent l'amélioration des cuisinières, la ventilation, la conception des bâtiments et l'évolution des comportements. [9.3.4.3]

Les incidences sur l'eau ont trait à la consommation d'eau, en phase d'exploitation et en amont, des technologies énergétiques et à la qualité de l'eau. Ces incidences, qui dépendent des sites, doivent être envisagées par rapport aux ressources et aux besoins locaux. Certaines technologies ÉR telles que l'énergie hydroélectrique et certains systèmes bioénergétiques dépendent des disponibilités en eau et peuvent soit accroître la concurrence, soit atténuer la rareté de l'eau. Dans les régions où l'eau est rare, des technologies ÉR autres que thermiques (énergie éolienne et photovoltaïque, par ex.) peuvent produire de l'électricité propre sans imposer de contraintes supplémentaires sur les ressources en eau. Les technologies ÉR thermiques à refroidissement traditionnel (par ex. le solaire thermodynamique et la bioénergie géothermique) peuvent consommer davantage d'eau en cours de fonctionnement que les technologies qui ne font pas appel à des ÉR. Toutefois, le refroidissement par voie sèche peut réduire cet impact (figure TS.9.5). Beaucoup d'eau peut être utilisée dans des processus en amont pour certaines technologies énergétiques, et en particulier pour l'extraction de combustibles et la production de matières premières de la biomasse; si l'on inclut cette dernière, l'empreinte actuelle de l'eau pour la production d'électricité à partir de la biomasse peut être plusieurs centaines de fois plus élevée que la consommation opérationnelle d'eau dans les centrales thermiques. La production de matières premières, les activités minières et le traitement des combustibles peuvent également affecter la qualité de l'eau. [9.3.4.4]

La plupart des technologies énergétiques ont d'importants besoins en matière d'utilisation des sols lorsque la totalité de la chaîne d'approvisionnement est prise en compte. Bien que la documentation sur les estimations, pendant le cycle de vie, de l'utilisation des sols par des technologies énergétiques soit peu abondante, les éléments disponibles indiquent que cette utilisation des sols pendant le cycle de vie par des chaînes d'énergie fossile peut être comparable ou supérieure à celle imputable à des sources d'ÉR. Pour la plupart des sources d'ÉR, les besoins en matière d'utilisation des sols sont plus importants pendant la phase d'exploitation. Il y a une exception cependant, à savoir l'intensité en matière d'utilisation des



N:	18	4	1	5	4	1	16	2	7	3	1	3	3	9	1	1	1	7	11	2	1	2	4	2	2	1	4
Sources:	11	3	1	5	4	1	8	1	2	1	1	3	3	4	1	1	1	2	4	2	1	2	2	2	2	1	2

Figure TS.9.5 | Fourchettes des taux de consommation opérationnelle d'eau correspondant à diverses technologies thermiques et non thermiques de production d'électricité, selon une étude de la documentation existante (m^3/MWh). Les barres représentent des valeurs limites absolues selon la documentation existante et les losanges, des estimations isolées; N représente le nombre d'estimations prises en compte dans les sources. Les méthodes et les références employées dans cette étude de la documentation disponible sont indiquées à l'annexe II. On notera que les valeurs élevées pour l'énergie hydroélectrique résultent de quelques études où l'on a mesuré les valeurs brutes de l'évaporation et qu'elles peuvent ne pas être représentatives (voir l'encadré 5.2). [Figure 9.14]

sols de la bioénergie émanant de matières premières spécialisées, qui est nettement plus élevée que celle des autres technologies énergétiques et qui connaît des variations sensibles du rendement énergétique à l'hectare pour différentes matières premières et zones climatiques. Un certain nombre de technologies ÉR (énergie éolienne, des vagues et marine) occupent de vastes zones, mais peuvent donner lieu à des usages secondaires tels que l'agriculture, la pêche et les loisirs. [9.3.4.5] Les répercussions (propres aux sites) sur les écosystèmes et la biodiversité sont liées à l'utilisation des sols. Les répercussions les plus manifestes, qui suivent diverses voies, se manifestent par une altération physique directe à grande échelle des habitats et, plus indirectement, par la détérioration de ces habitats. [9.3.4.6]

L'évaluation comparative des risques d'accidents est un élément essentiel de toute évaluation approfondie des aspects liés à la sécurité énergétique et des performances en matière de durabilité des systèmes énergétiques actuels et à venir. Les risques qu'impliquent diverses technologies énergétiques pour la société et l'environnement surviennent non seulement pendant la phase de production d'énergie proprement dite, mais aussi à toutes les étapes des chaînes énergétiques. Les risques d'accidents qu'entraînent les technologies ÉR ne sont pas négligeables, mais la structure souvent décentralisée de ces technologies limite fortement l'éventualité de conséquences désastreuses en matière de mortalité. Alors que, dans l'ensemble, les technologies ÉR présentent de faibles taux de mortalité, les barrages associés à certains projets hydroélectriques peuvent présenter un risque particulier dépendant de facteurs propres aux sites. [9.3.4.7]

9.4 Incidences des voies de développement durable sur les énergies renouvelables

Après l'analyse statique des incidences des systèmes actuels et nouveaux faisant appel aux ÉR sur les quatre objectifs du développement durable, les conséquences, pour ce développement, d'éventuelles voies de mise en valeur des ÉR à l'avenir sont évaluées de façon plus dynamique et intègrent donc la composante intertemporelle du développement durable. Comme on ne peut anticiper les interactions des voies futures propres aux ÉR et au développement durable en se fondant sur une analyse partielle de chacune des technologies énergétiques, le débat se fonde sur les résultats présentés dans la documentation concernant les scénarios, qui, en général, traite de l'éventail des différentes solutions technologiques envisageables dans le cadre d'un système énergétique mondial ou régional. [9.4]

La grande majorité des modèles utilisés pour établir les scénarios étudiés (voir chapitre 10, section 10.2) prennent en compte les interactions des diverses solutions possibles en matière de production, de transformation et d'exploitation d'énergie. Les modèles, qui vont de modèles régionaux d'économie énergétique à des modèles d'évaluation intégrée, sont appelés ici modèles intégrés. Par le passé, ces modèles ont porté beaucoup plus sur les aspects techniques et macroéconomiques des transitions énergétiques et, dans ce processus, ont permis d'obtenir des mesures très globales de la pénétration technologique ou de l'énergie produite par des sources particulières d'approvisionnement. La capacité de ces modèles à produire des scénarios à long terme et à nous faire mieux saisir les rapports entre le développement durable et les ÉR dépend de leur aptitude à tenir compte des interactions dans un vaste ensemble d'activités humaines à diverses échelles régionales et temporelles. Les modèles intégrés font l'objet d'avancées constantes, dont certaines vont être essentielles pour la représentation des préoccupations en matière de durabilité à l'avenir, par exemple l'augmentation de leur résolution temporelle et spatiale, la meilleure représentation de la répartition des richesses au sein des populations et la prise en compte de données plus détaillées pour la caractérisation du système humain et physique sur la Terre. [9.4]

L'évaluation, axée sur ce qu'indiquent actuellement les analyses fondées sur des modèles à propos des voies du développement durable et du rôle des ÉR, permet de déterminer de quelle façon les analyses fondées sur des modèles peuvent être améliorées pour mieux nous faire comprendre les questions de durabilité à l'avenir. [9.4]

9.4.1 Le développement économique et social

En général, les modèles intégrés optent très nettement pour une macroperspective et ne tiennent guère compte des mesures avancées sur le plan du bien-être. [9.2.2, 9.3.1] Ils sont plutôt axés sur la croissance économique, qui, en soi, donne une mesure insuffisante de la durabilité, mais qui peut servir de mesure indicative du bien-être dans le contexte de diverses voies de stabilisation. En général, les scénarios d'atténuation comportent une forte contrainte préliminaire en matière de durabilité en imposant une limite supérieure aux futures émissions de GES. Cela entraîne des pertes de bien-être (habituellement mesurées par le PIB ou par la consommation à laquelle on renonce) fondées sur des hypothèses concernant la disponibilité et le coût des techniques d'atténuation. En limitant les possibilités d'accès aux solutions techniques envisageables pour restreindre les GES, on accroît les pertes de bien-être. D'après des études où l'on évalue spécifiquement les incidences de la limitation des ÉR pour divers niveaux de stabilisation de la concentration de GES, une grande disponibilité de toutes les technologies ÉR est nécessaire pour atteindre de faibles niveaux de stabilisation, et une disponibilité intégrale des technologies pauvres en carbone, y compris les technologies ÉR, est essentielle pour maintenir les coûts d'atténuation à des niveaux relativement faibles, même pour des niveaux de stabilisation moins stricts. [9.4.1]

Pour ce qui est des effets régionaux, les analyses de scénarios indiquent que les pays en développement sont ceux qui devraient bénéficier le plus de l'augmentation de la production d'ÉR. Alors qu'il reste encore à résoudre la question des coûts moyens actualisés élevés de l'énergie pour ce qui concerne les technologies ÉR, ces résultats laissent à penser que les pays en développement ont la possibilité de sauter des étapes et d'éviter les voies de développement entraînant de fortes émissions que les pays développés ont suivies jusqu'à présent. Toutefois, les possibilités régionales d'atténuation vont varier selon de nombreux facteurs, dont la disponibilité des technologies, mais aussi la croissance démographique et économique. Les coûts vont aussi dépendre de l'attribution de droits d'émission échangeables, tant au départ qu'avec le temps, en vertu d'un régime mondial d'atténuation des effets du climat. [9.4.1]

En général, les analyses de scénarios indiquent les mêmes liens entre les ÉR, l'atténuation et la croissance économique dans les pays développés et les pays en développement, sauf que les forces sont habituellement plus importantes dans les pays non visés à l'annexe I que dans les pays visés à cette annexe, en raison d'une croissance économique présumée plus rapide et de la charge de l'atténuation qui, de ce fait, augmente avec le temps. En général, toutefois, dans les structures de modélisation employées pour produire des scénarios mondiaux à long terme, on fait l'hypothèse de marchés économiques et d'infrastructures institutionnelles fonctionnant parfaitement dans toutes les régions du globe. En outre, on ne tient pas compte des conditions particulières qui existent dans tous les pays, en particulier dans les pays en développement où ces hypothèses sont particulièrement fragiles. Ces différences et l'influence qu'elles peuvent avoir sur le développement économique et social des pays devraient faire l'objet de recherches actives à l'avenir. [9.4.1]

9.4.2 L'accès à l'énergie

À ce jour, les modèles intégrés sont souvent fondés sur les informations recueillies et l'expérience acquise dans les pays développés et sur des systèmes énergétiques présumés dans d'autres régions du monde et à diverses étapes de développement, censés se comporter de la même façon. En général, les modèles ne rendent pas compte de la dynamique importante et déterminante propre aux

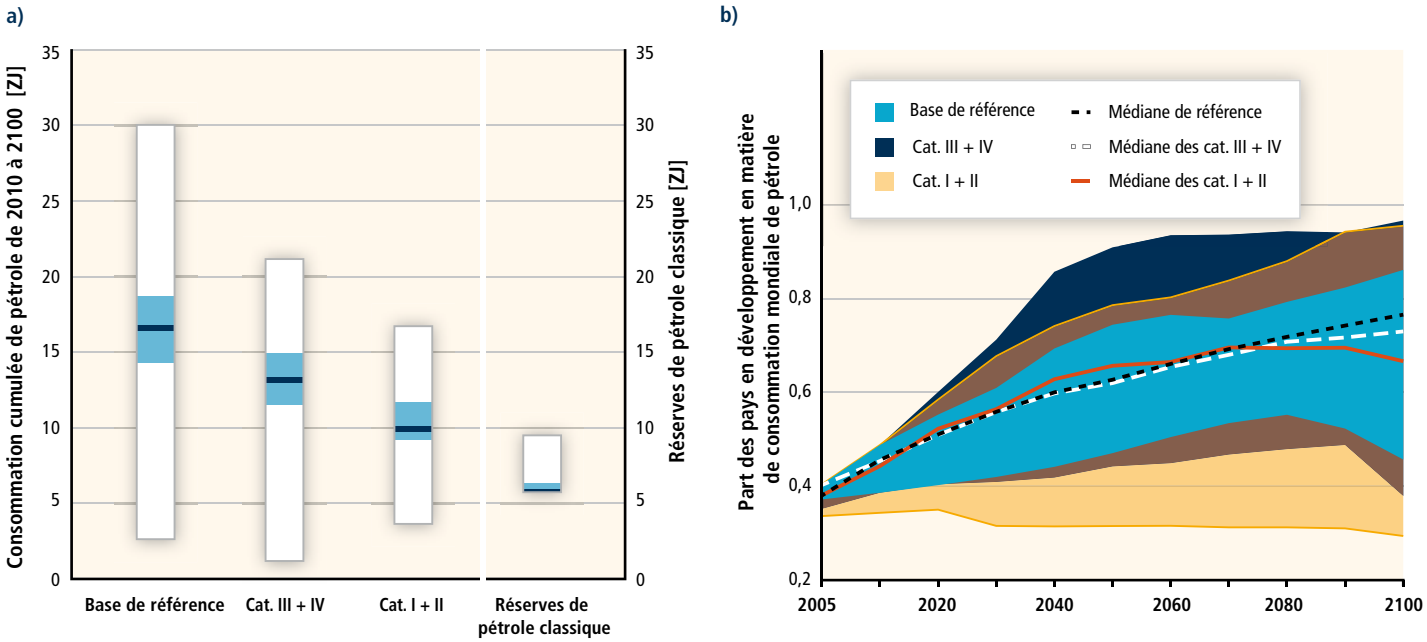


Figure TS.9.6 | a) Réserves de pétrole classique par rapport à la consommation cumulée de pétrole projetée (ZJ) de 2010 à 2100 selon les scénarios analysés dans le chapitre 10 pour diverses catégories de scénarios: scénarios de référence, scénarios des catégories III et IV et scénarios supposant une stabilisation à bas niveau (catégories I + II). Le trait épais bleu foncé correspond à la médiane, la barre bleu clair, à la fourchette interquartile (du 25e au 75e percentile) et la barre blanche, à l'ensemble des valeurs obtenues selon tous les scénarios analysés. La dernière colonne indique la fourchette des réserves attestées de pétrole classique récupérable (barre bleu clair) et des réserves supplémentaires estimées (barre blanche). b) Évolution en fonction du temps de la fourchette de la part du pétrole mondial consommé dans les pays non visés à l'annexe I pour diverses catégories de scénarios, selon les scénarios analysés dans le chapitre 10. [Figure 9.18]

pays en développement, notamment pour ce qui concerne le choix des combustibles, l'hétérogénéité des comportements et les économies informelles. Cela fait obstacle à une évaluation des relations entre les ÉR et de la disponibilité des services énergétiques à l'avenir pour diverses populations, y compris les tâches de base au niveau des ménages, les transports et l'énergie nécessaire au commerce, à l'industrie manufacturière et à l'agriculture. Cependant, quelques modèles ont commencé à intégrer des facteurs tels que les difficultés possibles d'approvisionnement, les économies informelles et les diverses catégories de revenus, et à accroître la résolution en matière de répartition. [9.4.2]

Les analyses de scénarios disponibles sont toujours caractérisées par de grandes incertitudes. En Inde, les résultats semblent indiquer que la répartition des revenus dans une société est aussi importante pour améliorer l'accès à l'énergie que l'accroissement de ces revenus. En outre, un accès croissant à l'énergie n'est pas nécessairement favorable à tous les aspects du développement durable, le passage à une énergie moderne au détriment, par exemple, de la biomasse traditionnelle pouvant simplement consister en un passage aux combustibles fossiles. En général, les analyses de scénarios disponibles soulignent le rôle des politiques et des finances dans l'amélioration de l'accès à l'énergie, même si un passage forcé aux ÉR qui donne accès à des services énergétiques modernes risque d'influer négativement sur le budget des ménages. [9.4.2]

De nouvelles améliorations de la résolution en matière de répartition et la rigidité structurelle (l'incapacité de nombreux modèles à rendre compte des phénomènes sociaux et des changements structurels qui sous-tendent l'utilisation de technologies énergétiques par les populations) posent des problèmes particuliers. Une représentation explicite des conséquences énergétiques pour les plus pauvres, les femmes, des groupes ethniques particuliers dans certains pays ou les habitants de zones géographiques précises ne fait généralement pas partie de la série de résultats des modèles mondiaux actuels. Afin de donner un aperçu plus complet de l'ensemble des solutions possibles en matière d'accès à l'énergie, les modèles énergétiques devraient, à l'avenir, proposer une représentation plus explicite des déterminants pertinents (tels que les combustibles traditionnels, les modes d'électrification ou la répartition des revenus) et lier ces déterminants à des représentations des divers modes de développement envisageables. [9.4.2]

9.4.3 La sécurité énergétique

Les ÉR peuvent influer sur la sécurité énergétique en réduisant les préoccupations concernant la disponibilité et la répartition des ressources ainsi que la variabilité des sources d'énergie. [9.2.2, 9.3.1] Dans la mesure où la mise en valeur des ÉR dans les scénarios d'atténuation réduit le risque global de perturbations en diversifiant l'éventail énergétique, le système énergétique est moins susceptible de subir des ruptures (parfois soudaines) d'approvisionnement en énergie. Dans les scénarios, ce rôle des ÉR varie selon la forme d'énergie considérée. L'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie marine, qui sont étroitement liées à la production d'électricité, ont la capacité de remplacer les combustibles fossiles concentrés et de plus en plus rares dans les bâtiments et le secteur industriel. Si des politiques appropriées d'atténuation du carbone ont été adoptées, il peut être relativement facile d'éliminer le carbone dans la production d'électricité. En revanche, la demande de carburants liquides dans le secteur des transports reste inélastique si aucune percée technologique n'a lieu. Alors que la bioénergie peut jouer un rôle important, ce rôle dépend des possibilités de captage et de stockage du carbone, qui pourraient en détourner l'usage en faveur de la production d'énergie avec CSC – ce qui donnerait lieu à des émissions nettes négatives de carbone pour le système et à un lissage important des activités globales d'atténuation. [9.4.1, 9.4.3]

Dans ce cadre, les préoccupations concernant la sécurité énergétique qui sont apparues par le passé lors des ruptures d'approvisionnement en pétrole sont susceptibles de persister à l'avenir. Dans les pays en développement, la question va prendre encore plus d'importance, du fait que leur part dans la consommation mondiale totale de pétrole va augmenter selon tous les scénarios analysés (figure TS.9.6b). Tant que les solutions techniques de remplacement du pétrole, comme les biocombustibles et/ou l'électrification du secteur des transports, ne joueront pas un rôle prédominant dans les analyses de scénarios, la plupart des scénarios d'atténuation ne feront pas état de différences spectaculaires entre les scénarios de référence et les scénarios décisionnels par rapport à la consommation cumulée de pétrole (figure TS.9.6a). [9.4.3]

L'élargissement du marché de la bioénergie pourrait soulever d'autres problèmes de sécurité énergétique à l'avenir si ce marché se caractérisait par un faible nombre de fournisseurs et présentait ainsi des analogies avec le marché actuel du pétrole. Dans un tel contexte, le risque que les prix des denrées alimentaires soient tributaires de la volatilité des marchés de la bioénergie devrait être atténué, pour empêcher des incidences graves sur le développement durable, des prix élevés et volatils des denrées alimentaires nuisant manifestement aux plus pauvres. [9.4.3]

La mise en place de technologies ÉR variables pose aussi d'autres problèmes tels que la vulnérabilité aux phénomènes naturels extrêmes ou les fluctuations internationales des prix, lesquels problèmes ne sont pas encore résolus de façon satisfaisante par les grands modèles intégrés. De nouvelles activités visant à accroître la fiabilité des systèmes sont susceptibles d'augmenter les coûts et de nécessiter un équilibrage (en conservant des stocks d'énergie, par ex.), le développement d'une production complémentaire souple, le renforcement de l'infrastructure du réseau et des interconnexions, des technologies de stockage de l'énergie et la modification des arrangements institutionnels, y compris les mécanismes réglementaires et du marché. [7.5, 8.2.1, 9.4.3]

Actuellement, les considérations sécuritaires portent généralement sur les questions de sécurité énergétique les plus importantes de mémoire récente. À l'avenir, toutefois, certains aspects de la sécurité énergétique pourraient aller bien au-delà de ces questions, par exemple en rapport avec des apports matériels essentiels pour les technologies ÉR. Ces vastes questions et les possibilités de les traiter, par exemple par le recyclage, sont largement absentes des scénarios d'avenir concernant l'atténuation et les ÉR. [9.4.3]

9.4.4 Atténuation des effets des changements climatiques et incidences sur l'environnement et la santé dans les scénarios d'avenir

Remplacer les combustibles fossiles par des ÉR ou d'autres technologies à faible émission de carbone peut grandement contribuer à réduire les émissions de NO_x et de SO_2. Divers modèles incluent une représentation explicite de facteurs tels que la pollution par les sulfates, qui ont des incidences sur l'environnement et la santé. Certains résultats de scénarios indiquent que la politique climatique peut contribuer à des améliorations en matière de pollution atmosphérique locale (matières particulaires), mais que les politiques de réduction de la pollution de l'air n'entraînent pas nécessairement à elles seules des réductions des émissions de GES. Une autre conséquence de certaines trajectoires possibles en matière d'énergie est l'éventuel changement d'affectation des sols en vue de la production de biocombustibles. D'après les résultats de certains scénarios, il est possible que la politique climatique, si elle ne s'accompagne pas d'autres mesures de politique générale, entraîne un déboisement massif, les sols servant alors à des cultures bioénergétiques, avec éventuellement des conséquences négatives pour le développement durable, et notamment pour les émissions de GES. [9.4.4]

Malheureusement, la documentation existante sur les scénarios ne traite pas explicitement des nombreux éléments non liés aux émissions d'un développement énergétique durable, par exemple l'exploitation des ressources en eau, les conséquences des choix énergétiques pour les services aux ménages ou la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments. Cela s'explique en partie par le fait que les modèles sont conçus pour étudier des régions plutôt vastes, sans s'arrêter de façon détaillée sur les revenus ou la répartition géographique. Pour pouvoir procéder à une large évaluation des incidences environnementales sur le plan régional et local, il faudrait disposer de modèles prenant en compte des échelles plus réduites d'incidences géographiques, lesquels modèles font actuellement l'objet d'études. Enfin, de nombreux modèles ne prévoient pas explicitement l'intégration des résultats d'analyses du cycle de vie pour les diverses solutions techniques possibles. La nature de ces incidences et le fait de savoir s'il faut et comment il faut les comparer selon les catégories et s'il est possible de les intégrer dans de futurs scénarios pourraient faire à l'avenir l'objet de recherches utiles. [9.4.4]

9.5 Obstacles aux énergies renouvelables et possibilités offertes par ces énergies dans le cadre d'un développement durable

La poursuite d'une stratégie de mise en valeur des ÉR dans le contexte d'un développement durable implique la prise en compte explicite de la plupart de ses effets environnementaux, économiques et sociaux. Des processus intégrés de planification, d'élaboration des politiques et de mise en œuvre devraient faciliter ce processus grâce à l'anticipation et à l'élimination des obstacles éventuels et à l'exploitation des possibilités de mise en valeur des ÉR. [9.5]

Il existe des obstacles particulièrement prégnants dans le contexte d'un développement durable, qui peuvent soit entraver la mise en valeur des ÉR, soit nécessiter des compromis, les critères d'un développement durable se rapportant à des obstacles socioculturels, économiques ou relatifs à l'information, à la sensibilisation et aux marchés. [9.5.1]

Les préoccupations et les obstacles socioculturels ont diverses origines et sont intrinsèquement liés aux valeurs et aux normes sociétales et individuelles. Ces valeurs et ces normes influent sur la perception et l'acceptation des technologies ÉR et sur les incidences éventuelles de leur mise en valeur par des particuliers, des groupes et des sociétés. Du point de vue du développement durable, des obstacles peuvent apparaître en raison de l'attention insuffisante portée aux préoccupations socioculturelles, qui incluent des obstacles liés au comportement; aux habitats naturels et aux sites du patrimoine naturel et humain, y compris les incidences sur la biodiversité et les écosystèmes ; à l'esthétique des paysages; à l'exploitation des ressources en eau et des sols et aux droits concernant cette exploitation ainsi qu'à leur disponibilité pour des usages concurrentiels. [9.5.1.1]

La sensibilisation du public et son adhésion constituent un élément important de la nécessité d'élargir rapidement et suffisamment la mise en valeur des ÉR pour atteindre les objectifs d'atténuation des effets des changements climatiques.

Une mise en œuvre à grande échelle ne peut réussir qu'avec la compréhension et l'appui du public. Cela peut exiger des activités de communication spécialisées à propos des résultats et des opportunités concernant les applications à grande échelle. Parallèlement, toutefois, la participation du public aux décisions en matière de planification et la prise en compte des questions d'impartialité et d'équité dans la répartition des avantages et des coûts de la mise en valeur d'ÉR jouent un rôle également important et ne peuvent éludées. [9.5.1.1]

Dans les pays en développement, le caractère limité des compétences techniques et commerciales et l'absence de systèmes d'appui technique sont particulièrement manifestes dans le secteur de l'énergie, où la sensibilisation et la diffusion de l'information concernant les options disponibles et appropriées en matière d'ÉR parmi les consommateurs éventuels sont des facteurs clés de l'assimilation et de la création de marchés. Les lacunes en matière de sensibilisation sont souvent considérées comme le principal facteur affectant la mise en valeur des ÉR et la création de petites et moyennes entreprises qui contribuent à la croissance économique. De plus, il faut mettre l'accent sur la capacité des acteurs privés d'élaborer, de mettre en œuvre et de mettre en valeur des technologies ÉR, laquelle inclut une capacité technique et commerciale croissante à microniveau et au niveau des entreprises. [9.5.1.2]

Outre la rationalité, les attitudes à propos des ÉR reposent sur des émotions et des considérations d'ordre psychologique. Pour que la mise en valeur des ÉR et les efforts et stratégies déployés en matière d'information et de sensibilisation soient couronnés de succès, il faut en tenir explicitement compte. [9.5.1.2]

Afin d'évaluer l'économie des ÉR dans le contexte d'un développement durable, il faut en envisager explicitement les coûts et les avantages sur le plan social. Les ÉR doivent être évaluées par rapport à des critères quantifiables concernant la rentabilité, l'opportunité sur le plan régional et les conséquences pour l'environnement et la répartition. La taille du réseau et les technologies sont des déterminants essentiels de la viabilité économique des ÉR et de leur compétitivité par rapport aux énergies non renouvelables. On constate souvent que des technologies ÉR appropriées qui sont économiquement viables permettent de faciliter l'accès à des énergies hors réseau en milieu rural, en particulier pour de petites applications hors réseau ou en miniréseau. [9.5.1.3]

Si la mise en valeur d'ÉR est viable du point de vue économique, d'autres obstacles économiques et financiers peuvent cependant la freiner. Des coûts d'investissement initiaux élevés, notamment pour l'installation et la connexion au réseau, sont des exemples d'obstacles fréquemment observés à la mise en valeur des ÉR. Dans les pays en développement, des systèmes de politique générale et de soutien aux entrepreneurs sont nécessaires, parallèlement à la mise en valeur des ÉR, pour stimuler la croissance économique et le développement durable et pour catalyser l'économie monétaire rurale et périurbaine. L'insuffisance des données sur les ressources potentielles se répercute directement sur les incertitudes concernant la disponibilité de ces ressources, ce qui risque de se traduire par des primes de risque plus élevées pour les investisseurs et les initiateurs de projets. L'internalisation des coûts externes environnementaux et sociaux entraîne souvent des modifications dans le classement des diverses sources d'énergie et technologies énergétiques, avec des enseignements importants concernant les objectifs et les stratégies du développement durable. [9.5.1.3]

Les stratégies relatives au développement durable sur le plan international, national et local ainsi que dans les secteurs privé et non gouvernemental de la société peuvent contribuer à éliminer les obstacles et à créer des opportunités pour la mise en valeur des ÉR, en intégrant les politiques et les pratiques concernant les ÉR et le développement durable. [9.5.2]

L'intégration des politiques relatives aux ÉR dans des stratégies nationales et locales en faveur d'un développement durable (explicitement approuvées lors du Sommet mondial de 2002 sur le développement durable) donne un cadre dont les pays peuvent s'inspirer pour choisir des stratégies efficaces concernant le développement durable et les ÉR et les harmoniser avec les mesures internationales de politique générale en vigueur. Dans ce but, les stratégies nationales devraient inclure l'élimination des mécanismes financiers actuels qui s'opposent à un développement durable. Par exemple, la suppression des subventions en faveur des combustibles fossiles peut favoriser un usage accru ou même une pénétration sur le marché des ÉR, mais toute réforme des subventions en faveur des technologies ÉR doit répondre aux besoins précis des plus pauvres et exige donc une analyse au cas par cas. [9.5.2.1]

Le mécanisme pour un développement propre établi au titre du Protocole de Kyoto est un exemple pratique de mécanisme favorisant un développement durable qui internalise les coûts externes environnementaux et sociaux. Toutefois, il n'existe pas de normes internationales pour l'évaluation de la durabilité (y compris des indicateurs comparables concernant le développement durable) qui puissent pallier les insuffisances du système existant en vue de l'approbation de cette durabilité. De nombreuses propositions servant d'éléments en vue des négociations concernant le régime climatique après 2012 ont été formulées à propos de la façon de modifier le mécanisme pour un développement propre afin de mettre en place des mécanismes nouveaux ou améliorés dans la perspective d'un développement durable. [9.5.2.1]

On peut envisager la possibilité, pour les ÉR, de jouer un rôle dans les stratégies nationales de développement durable en intégrant les objectifs du développement durable et des ÉR dans des politiques de développement et en concevant des stratégies sectorielles pour les ÉR qui contribuent aux buts d'une croissance verte et d'un développement durable à faible émission de carbone, y compris en brûlant des étapes. [9.5.2.1]

Au niveau local, des initiatives concernant le développement durable prises par des villes, des autorités locales et des organisations privées et non gouvernementales peuvent impulser une évolution et contribuer à vaincre les résistances locales à la mise en place d'ÉR. [9.5.2.2]

9.6 Synthèse, lacunes dans les connaissances et besoins futurs en matière de recherche

Les ÉR peuvent contribuer à divers degrés à un développement durable et aux quatre objectifs connexes évalués. Bien que les avantages en matière de réduction des incidences sur l'environnement et la santé puissent sembler très clairs, la contribution précise au développement économique et social, par exemple, est plus ambigu. En outre, les pays peuvent accorder aux quatre objectifs du développement durable une priorité dépendant de leur niveau de développement. Cependant, dans une certaine mesure, les objectifs du développement durable sont étroitement liés entre eux. L'atténuation des effets du changement climatique est en soi une condition préalable nécessaire à tout développement économique et social fructueux dans de nombreux pays en développement. [9.6.6]

Si l'on suit cette logique, on peut évaluer la réduction des effets du changement climatique selon le paradigme d'un développement durable fort, en imposant des objectifs en matière d'atténuation comme contraintes pour les futures voies de développement. Si l'on met en balance l'atténuation des effets du changement climatique et la croissance économique ou d'autres critères socioéconomiques, le problème se circonscrit au paradigme d'un développement durable faible, qui autorise des compromis entre ces objectifs et l'emploi d'analyses du type coûts-avantages afin de donner une orientation lors de la fixation de leurs degrés de priorité respectifs. [9.6.6]

Cependant, l'incertitude et l'ignorance, qui sont des éléments inhérents à toute voie de développement, et l'existence de coûts d'opportunité associés et éventuellement «élevés à un point inadmissible» vont exiger des ajustements permanents. À l'avenir, les modèles intégrés pourraient être en mesure d'établir un lien plus étroit entre les paradigmes d'un développement durable faible ou élevé en vue de la prise de décisions. Dans un cadre bien défini, ces modèles pourraient permettre d'étudier des scénarios concernant diverses voies d'atténuation en tenant compte des objectifs restants en matière de développement durable, en incluant des indicateurs ascendants importants et appropriés. Selon le type de modèle, ces voies de développement pourraient être optimisées en vue d'obtenir des résultats bénéfiques sur le plan social. Toutefois, l'intégration de données d'analyses du cycle de vie pour les émissions de GES sera essentielle en vue, en premier lieu, d'une définition claire des niveaux de stabilisation opportuns de la concentration de GES. [9.6.6]

Afin d'approfondir les connaissances concernant les rapports entre développement durable et ÉR et de trouver des réponses à la question de la transformation efficace, économiquement valable et socialement acceptable du système énergétique, il convient d'intégrer davantage les aperçus des sciences sociales, naturelles et économiques (par ex. au moyen d'analyses des risques) en tenant compte des diverses dimensions de la durabilité (notamment intertemporelle, spatiale et intergénérationnelle). À ce jour, la base de connaissances se limite souvent à des vues très étroites émanant de secteurs précis de la recherche, qui ne tiennent pas pleinement compte de la complexité de la question. [9.7]

10. Potentiel et coûts des mesures d'atténuation

10.1 Introduction

Les estimations des émissions futures de gaz à effet de serre sont étroitement liées à l'évolution de nombreuses variables, notamment la croissance économique, l'accroissement démographique, la demande d'énergie, les ressources énergétiques et les coûts et performances futurs des systèmes d'approvisionnement en énergie et des technologies d'utilisation finale. Les politiques qui seront appliquées dans les domaines de l'atténuation et autres influeront également sur la mise en valeur des technologies d'atténuation et, par conséquent, sur les émissions de gaz à effet de serre et la capacité de satisfaire les objectifs ayant trait au climat. Lorsque l'on veut étudier la contribution éventuelle des énergies renouvelables aux initiatives prises en matière d'atténuation des effets des changements climatiques [voir la figure 10.14], il faut considérer tous ces facteurs simultanément, même s'il n'est actuellement pas possible de prévoir avec certitude comment ceux-ci pourront évoluer dans les prochaines décennies. [10.1]

Les questions relatives à la contribution future des sources d'énergie renouvelable, en particulier pour ce qui concerne la diminution des émissions de gaz à effet de serre, doivent être étudiées dans ce contexte général. Le chapitre 10 traite ce sujet en se fondant sur 164 scénarios à moyen et long terme issus de modèles intégrés à grande échelle. L'analyse englobe les niveaux mondiaux de mise en valeur de ces énergies tirés de scénarios publiés récemment et relève nombre des principaux facteurs en jeu dans les variations observées parmi les différents scénarios (soulignons que le présent chapitre porte uniquement sur des scénarios déjà publiés et n'en propose pas de nouveaux). Elle considère à la fois l'ensemble du secteur des énergies renouvelables et chacune des technologies ÉR. Il est tenu compte de l'importance des interactions et de la concurrence avec d'autres technologies ainsi que de l'évolution de la demande d'énergie en général. [10.2]

Cette analyse à grande échelle est complétée par une évaluation plus détaillée de la mise en valeur future de ces technologies, illustrée au moyen de quatre des 164 scénarios. Les scénarios retenus couvrent un éventail d'attentes concernant les caractéristiques des énergies renouvelables, se fondent sur les différentes méthodologies employées et englobent différents niveaux de stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre. Cette approche permet d'étudier plus en détail le rôle que devraient jouer les énergies renouvelables dans les efforts d'atténuation des effets des changements climatiques, en différenciant les applications (production d'électricité, chauffage et refroidissement, transports) et les régions. [10.3]

Comme l'évolution des énergies renouvelables est grandement déterminée par les coûts, on étudie ensuite de manière générale les courbes et les aspects qui s'y rapportent, en commençant par une évaluation des forces et lacunes des courbes d'approvisionnement en rapport avec les énergies renouvelables et l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et en poursuivant par l'examen des documents publiés portant sur les courbes d'approvisionnement en énergie renouvelable par région, ainsi que sur les courbes des coûts de réduction pour ce qui est des efforts d'atténuation basés sur des sources d'énergie renouvelable. [10.4]

Les coûts relatifs à la commercialisation et à la mise en valeur des technologies ÉR sont ensuite pris en compte. Le présent chapitre examine les coûts actuels ainsi que leur évolution future probable. Afin de mieux anticiper l'évolution future des volumes de marché et des besoins en matière d'investissements à partir des résultats des quatre scénarios choisis, on examine les investissements dans le secteur des énergies renouvelables, notamment en vue de déterminer ce qui pourrait être nécessaire pour atteindre des objectifs ambitieux en matière de protection contre les effets du climat. [10.5]

Les mesures économiques standard ne couvrent pas l'ensemble des coûts. Les coûts et avantages sociaux et environnementaux d'une mise en valeur accrue des technologies ÉR dans le contexte de l'atténuation des effets des changements climatiques et du développement durable sont, par conséquent, récapitulés et étudiés. [10.6]

10.2 Synthèse des scénarios d'atténuation pour différentes stratégies en matière d'énergies renouvelables

On dispose maintenant d'un nombre accru d'analyses de scénarios intégrés susceptibles de donner des renseignements pertinents sur la contribution potentielle des énergies renouvelables aux futurs systèmes

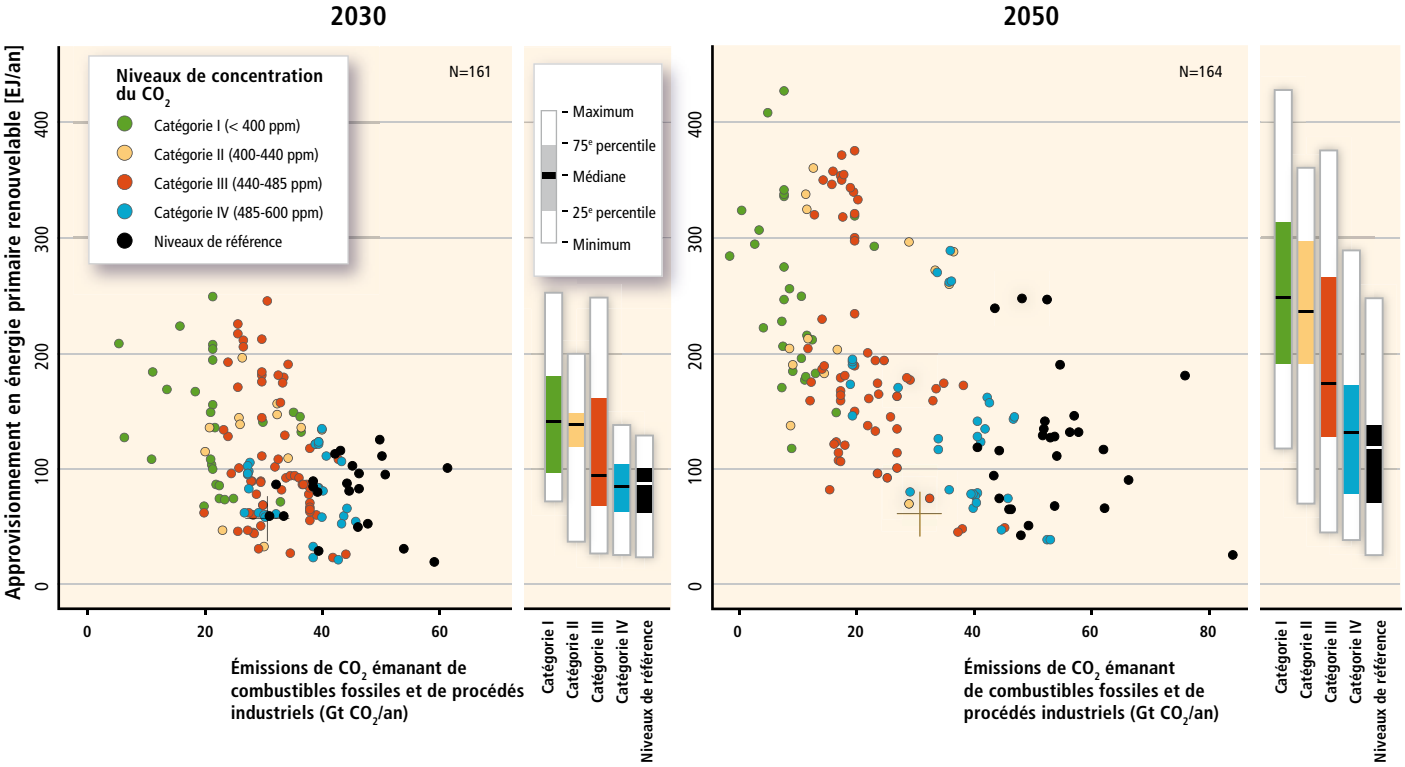


Figure TS.10.1 | Approvisionnement mondial en énergie primaire renouvelable (équivalent direct), d'après 164 scénarios à long terme, en fonction des émissions de CO_2 issues de la combustion de combustibles fossiles ou d'origine industrielle en 2030 et 2050. Les catégories de concentration de CO_2 dans l'atmosphère en 2100 sont indiquées au moyen d'un codage couleur. Les barres à droite des nuages de points indiquent les niveaux de mise en valeur des énergies renouvelables pour chacune des catégories de concentration. Les traits noirs épais correspondent aux médianes, les parties colorées, aux intervalles interquartiles (25e au 75e percentile) et les extrémités de la partie blanche des barres, à la fourchette complète des résultats obtenus avec l'ensemble des scénarios étudiés. Les croix grises correspondent à la situation en 2007. Les coefficients de corrélation de Pearson pour les deux jeux de données sont de - 0,40 (2030) et - 0,55 (2050). Pour des questions de communication des données, seuls 161 scénarios (sur un ensemble complet de 164 scénarios) ont été pris en compte dans les résultats pour 2030 indiqués ici. Si certains niveaux de mise en valeur des énergies renouvelables sont inférieurs à ceux d'aujourd'hui, c'est en raison des sorties de modèle et de la disparité des méthodes de prise en compte de la biomasse traditionnelle. [Figure 10.2]

d'approvisionnement énergétique et mesures d'atténuation des effets des changements climatiques. Afin de pouvoir mieux comprendre de façon générale le rôle joué par les énergies renouvelables dans les efforts d'atténuation et leur influence sur les coûts associés, on a passé en revue 164 scénarios à moyen et long terme issus de 16 modèles mondiaux intégrés d'évaluation des coûts énergétiques. Les scénarios, qui ont été compilés par sollicitation directe, couvrent un large éventail de concentrations de CO_2 (350 à 1 050 ppm d'ici 2100) correspondant à des scénarios d'atténuation et à des scénarios de référence. [10.2.2.1]

Même si ces scénarios figurent au nombre des systèmes de représentation les plus récents et les plus modernes dans les domaines de l'atténuation des effets climatiques et du rôle des énergies renouvelables à moyen et à long terme, il convient de les interpréter avec prudence, comme dans le cas de toute analyse portant sur les décennies à venir. Tous ces scénarios ont été établis au moyen d'une modélisation quantitative, mais les différents modèles employés présentent des variations considérables au niveau du détail et de la structure. Par ailleurs, les scénarios retenus ne constituent pas un échantillon aléatoire des scénarios possibles qui pourraient servir à une analyse formelle de l'incertitude. Certains groupes de modélisation ont proposé davantage de scénarios que d'autres. Dans les analyses d'ensemble de scénarios fondées sur la compilation de scénarios provenant de diverses études, comme dans le cas présent, il existe une tension inévitable entre le fait que les scénarios ne constituent pas vraiment un échantillon aléatoire et la constatation que la variabilité des scénarios permet de se faire une idée précise, et souvent claire, de nos connaissances sur les conditions futures, ou de nos lacunes à cet égard. [10.2.1.2, 10.2.2.1]

Une question fondamentale relative à la contribution des énergies renouvelables aux efforts d'atténuation des effets climatiques est le degré de corrélation de leur niveau de mise en valeur avec les concentrations atmosphériques à long terme de CO_2 ou les objectifs climatiques connexes. En étudiant les scénarios, on note que, même s'il existe une forte corrélation entre l'évolution des émissions fossiles et industrielles de CO_2 et les objectifs à long terme en matière de concentration de CO_2 dans l'ensemble des scénarios, la relation entre la mise en valeur des énergies renouvelables et les objectifs de concentration est beaucoup moins évidente (figure TS.10.1). La mise en valeur des ÉR a généralement tendance à augmenter en fonction du caractère plus ou moins ambitieux de l'objectif poursuivi, mais on remarque une énorme fluctuation entre les niveaux de mise en valeur des ÉR pour un objectif donné. Par exemple, dans les scénarios où le niveau de stabilisation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère est fixé à moins de 440 ppm (catégories I et II), les niveaux médians de mise en valeur des

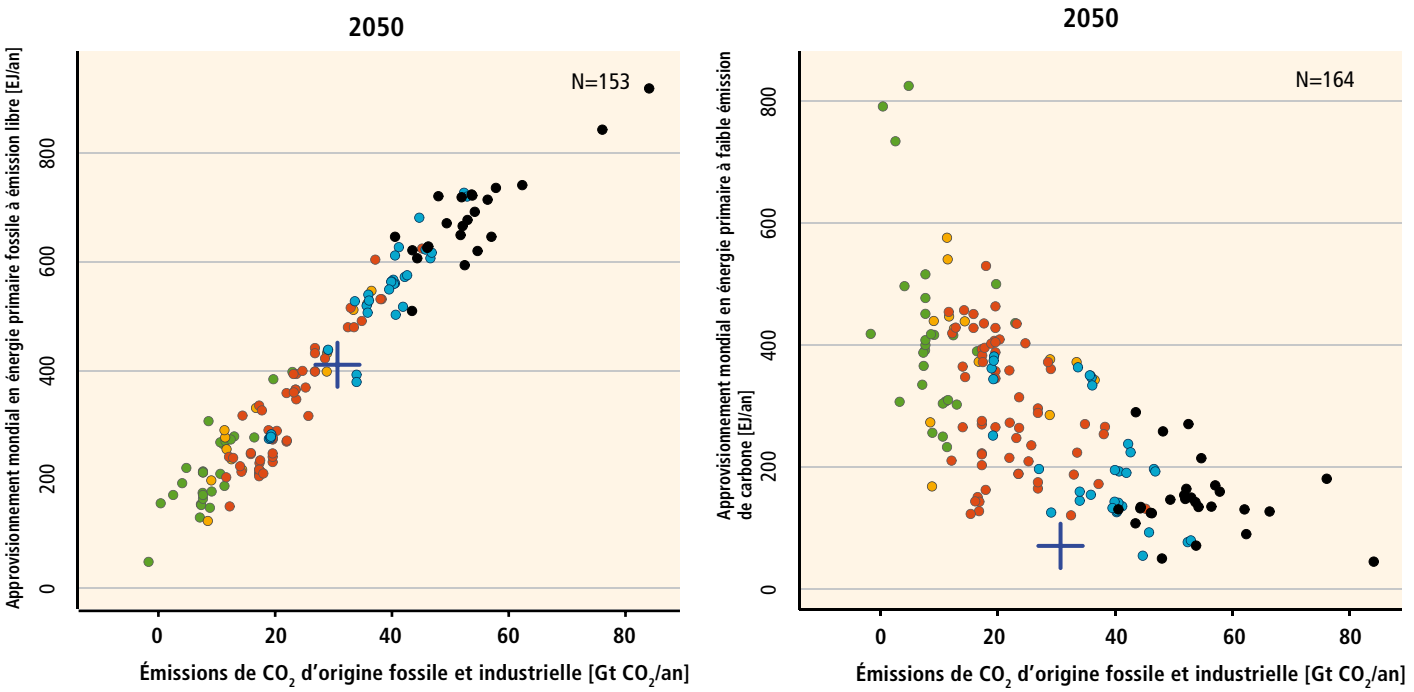


Figure TS.10.2 | Approvisionnement mondial en énergie primaire fossile à émission libre (diagramme de gauche; équivalent direct) et en énergie primaire à faible émission de carbone (diagramme de droite; équivalent direct) d'après 164 scénarios à long terme, en 2050, en fonction des émissions de CO_2 d'origine fossile et industrielle. L'énergie à faible émission de carbone englobe l'énergie renouvelable, l'énergie fossile avec captage et stockage du carbone (CSC) et l'énergie nucléaire. Les catégories de concentration de CO_2 dans l'atmosphère en 2100 sont indiquées au moyen d'un codage couleur. Les croix bleues correspondent à la situation en 2007. Les coefficients de corrélation de Pearson pour les deux jeux de données sont de 0,97 (énergie fossile à émission libre) et - 0,68 (énergie à faible émission de carbone). Pour une question de présentation des données, sur les 164 scénarios d'origine, seuls 153 scénarios sont pris en compte dans les résultats concernant l'énergie primaire fossile à émission libre et 161 scénarios dans ceux concernant l'énergie primaire à faible émission carbone indiqués ici. [Figure 10.4, diagramme de droite, figure 10.5, diagramme de droite]

ÉR sont de 139 EJ/an en 2030 et de 248 EJ/an en 2050, les niveaux les plus élevés atteignant 252 en 2030 et 428 en 2050. Ces chiffres sont considérablement plus élevés que ceux des scénarios de référence, même s'il est reconnu que l'éventail des niveaux de mise en valeur des ÉR dans chacune des catégories de stabilisation du CO_2 est large. [10.2.2.2]

Il importe également de souligner qu'en dépit des variations, les valeurs absolues de la mise en valeur des ÉR sont beaucoup plus élevées que les valeurs actuelles, dans la grande majorité des scénarios. En 2008, l'approvisionnement mondial en énergie primaire renouvelable, selon la méthode de l'équivalent direct, s'établissait à approximativement 64 EJ/an. La plus grande part, environ 30 EJ/an, consistait en biomasse traditionnelle. En revanche, de nombreux scénarios indiquent que la mise en valeur des ÉR d'ici 2030 aura au moins doublé par rapport à aujourd'hui, avec, dans la plupart des cas, une diminution de la biomasse traditionnelle, ce qui suppose un accroissement notable des sources non traditionnelles d'énergie renouvelable. D'ici 2050, les niveaux de mise en valeur des ÉR dans la plupart des scénarios sont supérieurs à 100 EJ/an (valeur médiane à 173 EJ/an), atteignent 200 EJ/an dans de nombreux scénarios et, parfois même, plus de 400 EJ/an. Étant donné que l'utilisation de la biomasse traditionnelle diminue selon la plupart des scénarios, ceux-ci font état d'une augmentation de la production d'énergie renouvelable (en excluant la biomasse traditionnelle) d'un facteur variant approximativement de trois à plus de dix. Plus de la moitié des scénarios attribuent aux énergies renouvelables une part de plus de 17 % de l'approvisionnement total en énergie primaire en 2030, et de plus de 27 % en 2050. D'après certains scénarios, cette part pourrait même atteindre environ 43 % en 2030 et 77 % en 2050. Après cette date, les niveaux de mise en valeur sont encore plus élevés. Il s'agit d'un accroissement considérable de la production d'énergie issue des ÉR. [10.2.2.2]

En fait, la mise en valeur des énergies renouvelables est assez importante dans nombre des scénarios de référence sans niveau défini de stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre. D'après les projections, d'ici 2030, les niveaux de mise en valeur des ÉR pourraient atteindre à peu près 120 EJ/an, de nombreux scénarios de référence donnant des résultats de plus de 100 EJ/an en 2050 et, parfois même, de 250 EJ/an. Ces chiffres élevés se fondent sur une série d'hypothèses, par exemple celle selon laquelle la consommation d'énergie continuera de beaucoup augmenter au cours du siècle, celles concernant la capacité des énergies renouvelables à améliorer l'accès à l'énergie, celles sur la disponibilité des ressources fossiles et d'autres hypothèses (notamment la réduction des coûts et l'augmentation de la performance des technologies ÉR) qui rendraient ces technologies de plus en plus compétitives dans de nombreuses applications, même en l'absence de politiques climatiques. [10.2.2.2]

L'incertitude concernant le rôle joué par les énergies renouvelables dans l'atténuation des effets des changements climatiques provient de l'incertitude liée à un certain nombre de facteurs importants qui influent sur la mise en valeur de ces énergies. Deux de ces facteurs sont la hausse de la demande d'énergie et la concurrence avec les autres options de réduction des émissions de CO_2 (en particulier l'énergie nucléaire et l'énergie fossile avec captage et stockage du carbone). Afin de satisfaire les objectifs à long terme en matière de climat, il convient de réduire les émissions de CO_2 provenant de sources énergétiques et d'autres sources anthropiques. Pour chacun de ces objectifs, le niveau de réduction est relativement bien défini; il existe une bonne corrélation entre les émissions fossiles et industrielles de CO_2 et l'utilisation d'énergie fossile à émission libre dans l'ensemble des scénarios (figure TS.10.2). La demande d'énergie à faible émission de carbone (y compris les énergies

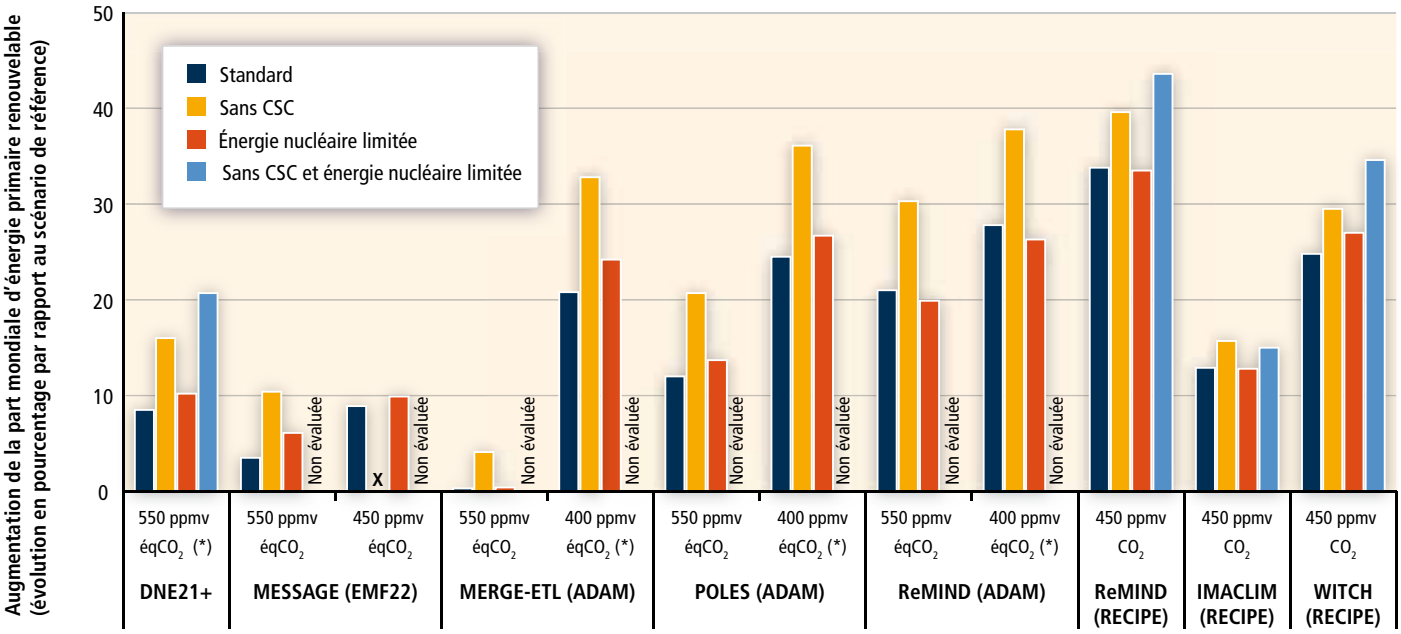


Figure TS.10.3 | Augmentation de la part mondiale d'énergie primaire renouvelable (équivalent direct) en 2050, d'après certains scénarios contraints sur le plan technologique par rapport aux scénarios de référence respectifs. Le «X» indique que la valeur de concentration pour le scénario n'a pas été atteinte. La définition des cas «énergie nucléaire limitée» et «sans captage ni stockage du carbone» varie d'un modèle à l'autre. Les scénarios DNE21+, MERGE-ETL et POLES correspondent à une élimination de l'énergie nucléaire à des rythmes différents; les scénarios MESSAGE limitent l'utilisation de cette forme d'énergie à 2010; et les scénarios REMIND, IMACLIM et WITCH restreignent la contribution de l'énergie nucléaire à celle établie dans les scénarios de référence, ce qui peut encore donner lieu à une augmentation importante par rapport aux niveaux d'utilisation actuels. Le scénario REMIND (ADAM) 400 ppmv sans CSC se réfère à un scénario où le stockage cumulé de CO_2 est limité à 120 Gt CO_2. Le scénario MERGE-ETL 400 ppmv sans CSC permet un stockage cumulé de CO_2 d'environ 720 Gt CO_2. Le scénario POLES 400 ppmv d'équivalent CO_2 sans CSC étant irréalisable, le niveau de concentration respectif du scénario indiqué ici a été assoupli d'environ 50 ppm CO_2. Le scénario DNE21+ est estimé approximativement à 550 ppmv d'équivalent v, à partir de l'évolution des émissions jusqu'à 2050. [Figure 10.6]

renouvelables, l'énergie nucléaire et l'énergie fossile avec captage et stockage du carbone) correspond simplement à la différence entre la demande totale d'énergie primaire et la production d'énergie fossile à émission libre; autrement dit, toute énergie qui ne peut être fournie par les combustibles fossiles à émission libre en raison des contraintes climatiques doit l'être par une source d'énergie à faible émission de carbone ou par le biais de mesures visant à réduire la consommation d'énergie. Les scénarios font toutefois état d'une incertitude énorme au sujet de l'accroissement de la demande énergétique, en particulier dans les décennies à venir. Cette fluctuation est généralement beaucoup plus grande que l'effet des mesures d'atténuation sur la consommation d'énergie. On observe donc une grande variabilité au niveau de l'énergie à faible émission de carbone pour tout objectif de concentration donné de CO_2, en raison de la variabilité de la demande d'énergie (figure TS.10.2). [10.2.2.3]

La concurrence entre les énergies renouvelables, l'énergie nucléaire et l'énergie fossile avec CSC accroît encore davantage la variabilité de la relation entre la mise en valeur des ÉR et les objectifs de concentration de CO_2. Le coût, la performance et la disponibilité des autres solutions possibles du point de vue de l'offre sont également entachés d'incertitude. Si l'option consistant à utiliser ces autres technologies d'atténuation du côté de l'offre est contrainte – en raison du coût et de la performance, mais éventuellement aussi d'obstacles sur le plan environnemental, social ou de la sécurité nationale –, alors, toute chose étant par ailleurs égale, les niveaux de mise en valeur des ÉR seront plus élevés (figure TS.10.3). [10.2.2.4]
On note par ailleurs la très grande variabilité des caractéristiques de mise en valeur des différentes technologies ÉR. Les échelles absolues de mise en valeur varient beaucoup entre les technologies, et les niveaux de mise en valeur varient davantage pour certaines technologies que pour d'autres (figures TS.10.4 et TS.10.5). De plus, l'échelle temporelle de mise en valeur diffère selon la source d'énergie renouvelable considérée, ce qui correspond en grande partie à la disparité des niveaux actuels de mise en valeur et (souvent) des hypothèses associées concernant la maturité technologique relative. [10.2.2.5]

Les scénarios indiquent généralement que la mise en valeur des ÉR est plus intense, à la longue, dans les pays non visés à l'annexe I que dans les pays visés à l'annexe I. Presque tous les scénarios se fondent sur l'hypothèse selon laquelle la croissance économique et la demande d'énergie seront plus élevées, à un moment ou à un autre, dans les pays non visés à l'annexe I que dans les autres pays. Il en résulte que les pays non visés à l'annexe I génèrent une part de plus en plus importante d'émissions de CO_2 dans les scénarios de référence ou sans politiques en la matière et devront donc procéder à des réductions plus notables avec le temps (figure TS.10.4). [10.2.2.5]

Une autre question fondamentale concernant les énergies renouvelables et l'atténuation est la relation qui existe entre ces énergies et les coûts des mesures d'atténuation. Un certain nombre d'études ont opté pour des scénarios dont la sensibilité assume des contraintes en ce qui a trait à la mise en valeur des diverses options d'atténuation, y compris les énergies renouvelables ainsi que l'énergie nucléaire et l'énergie fossile avec CSC (figures TS.10.6 et TS.10.7). Ces études révèlent que les coûts de l'atténuation sont plus élevés lorsque des options, y compris les énergies renouvelables, ne sont pas disponibles. En fait, la sanction en matière de coût pour les limites imposées aux énergies renouvelables est souvent au moins du même ordre de grandeur que celle pour les limites concernant l'énergie nucléaire et l'énergie fossile avec CSC. Les études en question indiquent également qu'il peut s'avérer impossible d'établir des objectifs de concentration plus ambitieux en l'absence d'options fondées sur les énergies renouvelables ou d'autres options à faible émission de carbone. Parallèlement, lorsqu'on tient compte de

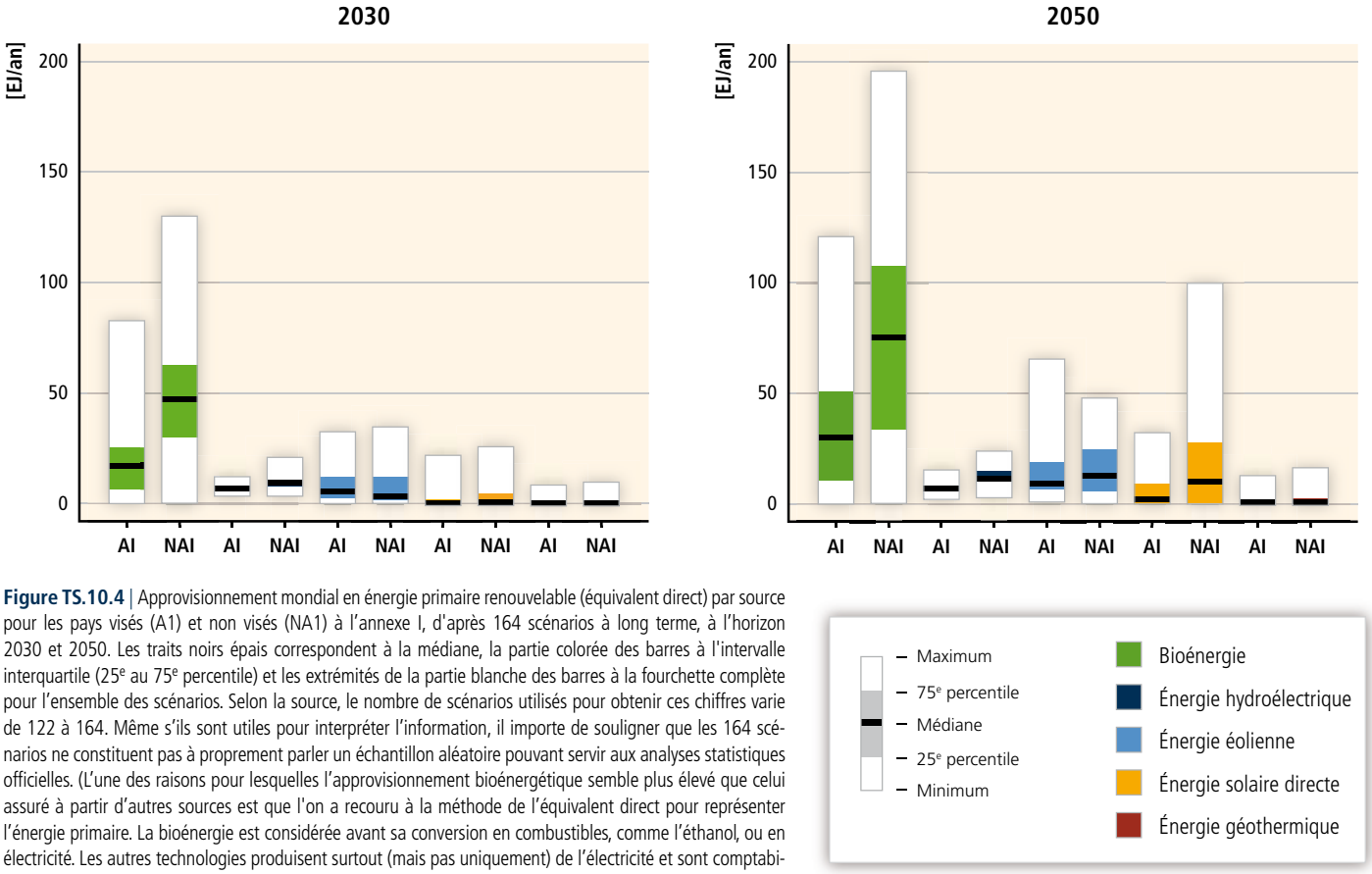


Figure TS.10.4 | Approvisionnement mondial en énergie primaire renouvelable (équivalent direct) par source pour les pays visés (A1) et non visés (NA1) à l'annexe I, d'après 164 scénarios à long terme, à l'horizon 2030 et 2050. Les traits noirs épais correspondent à la médiane, la partie colorée des barres à l'intervalle interquartile (25e au 75e percentile) et les extrémités de la partie blanche des barres à la fourchette complète pour l'ensemble des scénarios. Selon la source, le nombre de scénarios utilisés pour obtenir ces chiffres varie de 122 à 164. Même s'ils sont utiles pour interpréter l'information, il importe de souligner que les 164 scénarios ne constituent pas à proprement parler un échantillon aléatoire pouvant servir aux analyses statistiques officielles. (L'une des raisons pour lesquelles l'approvisionnement bioénergétique semble plus élevé que celui assuré à partir d'autres sources est que l'on a recouru à la méthode de l'équivalent direct pour représenter l'énergie primaire. La bioénergie est considérée avant sa conversion en combustibles, comme l'éthanol, ou en électricité. Les autres technologies produisent surtout (mais pas uniquement) de l'électricité et sont comptabilisées en fonction de l'énergie électrique produite. Si l'on avait recouru aux équivalences primaires, au moyen de la méthode de substitution, plutôt qu'aux équivalences directes, la production d'énergie à partir d'énergies renouvelables autres que la biomasse aurait été trois fois plus importante que celle qui figure ici.) L'énergie marine n'apparaît pas, car un nombre très réduit de scénarios prend en compte cette technologie. [Figure 10.8]

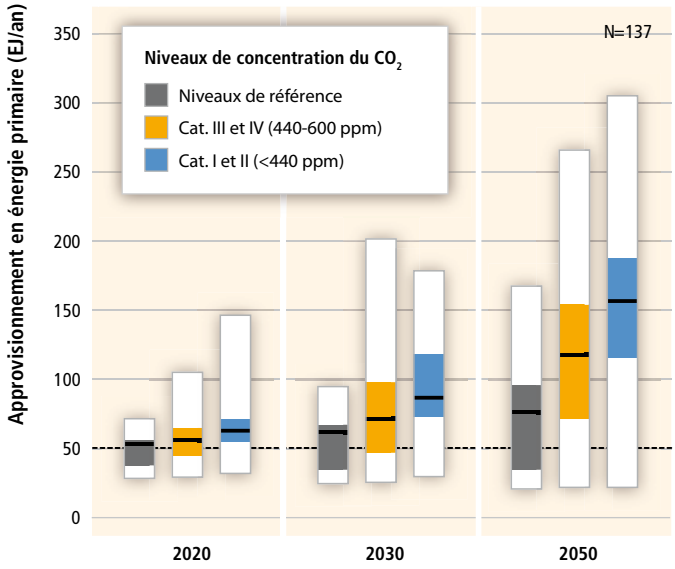
l'ensemble des hypothèses retenues dans la série complète des scénarios considérés dans la présente évaluation, on n'observe aucun lien significatif entre les coûts chiffrés (p.ex. le prix du carbone) et les niveaux absolus de mise en valeur des énergies renouvelables. Cette variation correspond au fait que les modèles intégrés à grande échelle utilisés pour établir les scénarios se caractérisent par un large éventail de prix du carbone et de coûts d'atténuation, fondés sur les paramètres d'origine et la structure des modèles. En résumé, alors que, dans les documents publiés, l'on s'accorde généralement pour estimer que les coûts des mesures d'atténuation augmenteront si l'on restreint la mise en valeur des technologies ÉR et que, de ce fait, il ne serait sans doute pas possible de satisfaire des objectifs de stabilisation des concentrations plus ambitieux, il en va autrement lorsqu'on veut établir la valeur précise de cette augmentation des coûts. [10.2.2.6]

10.3 Évaluation de scénarios d'atténuation représentatifs pour différentes stratégies en matière d'énergies renouvelables

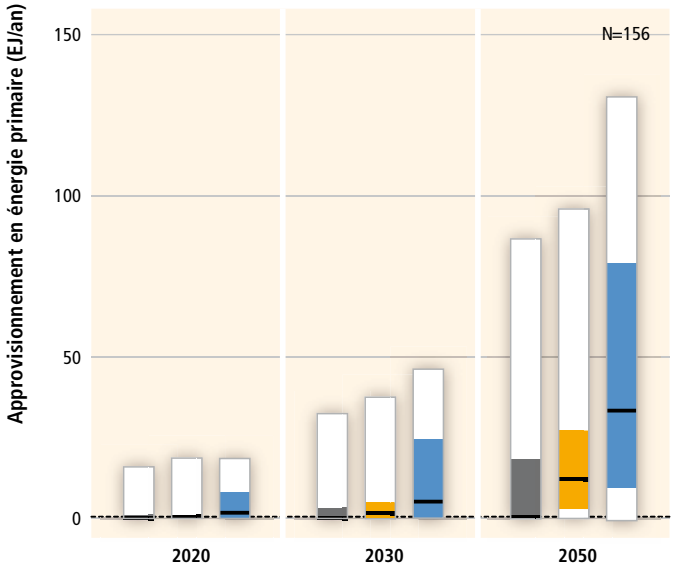
Une analyse approfondie de quatre scénarios choisis à partir de l'ensemble de 164 scénarios a permis de mieux cerner les apports éventuels des différentes technologies ÉR dans divers secteurs et régions. Le Word Energy Outlook (WEO 2009) de l'AIE a été retenu à titre d'exemple de scénario de référence, alors que les autres scénarios établissent des niveaux bien définis de stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre. Les scénarios d'atténuation sélectionnés sont ReMIND-RECIPE de l'Institut Potsdam, MiniCAM EMF 22 de l'Energy Modelling Forum Study 22 et Energy [R]evolution du Centre aérospatial allemand, de Greenpeace International et de l'EREC (ER 2010). Ces scénarios constituent des exemples, mais ne sont pas représentatifs à proprement parler. Ils illustrent toutefois quatre voies futures possibles fondées sur différentes méthodologies et un large éventail d'hypothèses. Ils correspondent à différentes perspectives de mise en valeur des ÉR, allant d'une situation de référence type à un scénario optimiste qui assume notamment qu'avec le soutien de politiques appropriées, la forte dynamique (les taux d'augmentation élevés) que l'on connaît aujourd'hui dans le secteur pourrait être maintenue. [10.3.1]

La figure TS.10.8 donne un aperçu de la production d'énergie primaire selon la source pour les quatre scénarios choisis à l'horizon 2020, 2030 et 2050 et compare les chiffres obtenus avec la fourchette de l'approvisionnement mondial total en énergie primaire. Avec la méthode de l'équivalent direct employée ici, c'est la bioénergie qui détient la plus grande part de marché en 2050 dans tous les scénarios retenus, suivie de l'énergie solaire. La part totale d'énergie renouvelable dans le mélange d'approvisionnement en énergie primaire d'ici 2050 montre une variation importante dans les quatre scénarios. Avec 15 % d'ici 2050, ce qui correspond plus ou moins au niveau actuel (12,9 % en 2008), le scénario WEO 2009 de l'AIE fournit le pourcentage le plus bas, tandis que le scénario ER 2010 donne le niveau le plus élevé, avec 77 %. Le scénario MiniCam EMF 22 et le scénario

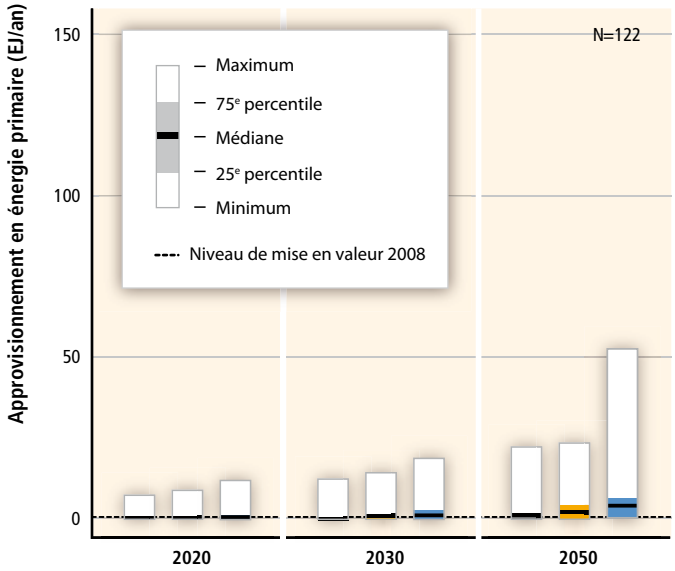
Bioénergie



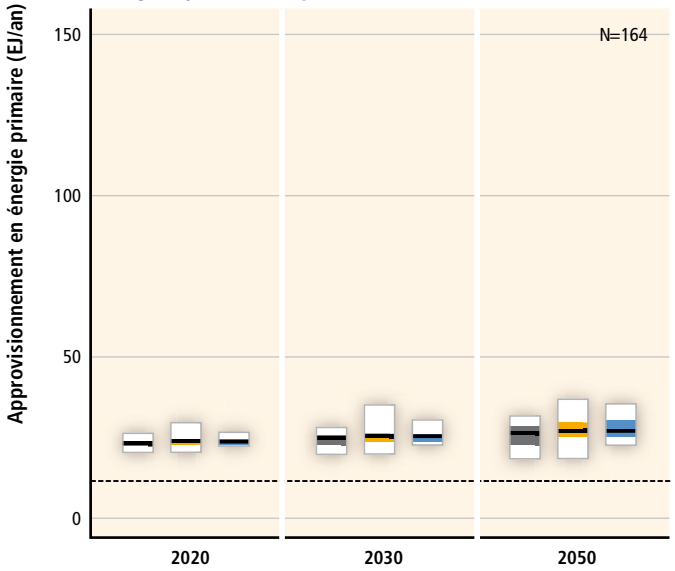
Énergie solaire directe



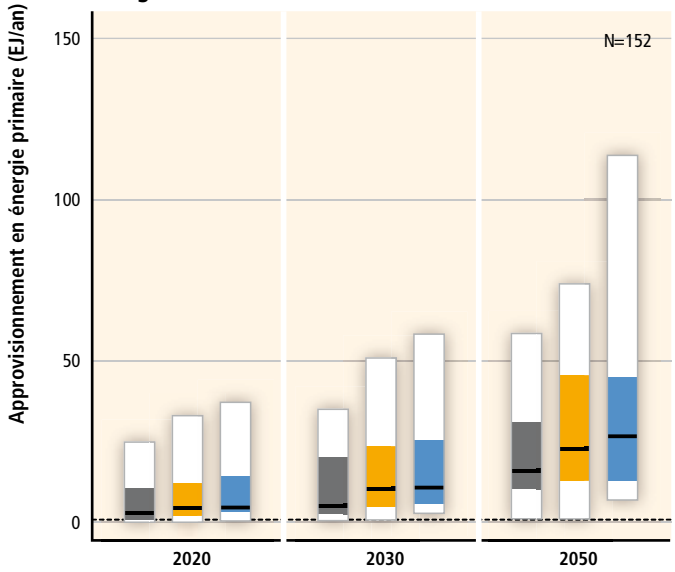
Énergie géothermique



Énergie hydroélectrique



Énergie éolienne



Part de l'électricité issue de l'énergie éolienne et du solaire photovoltaïque

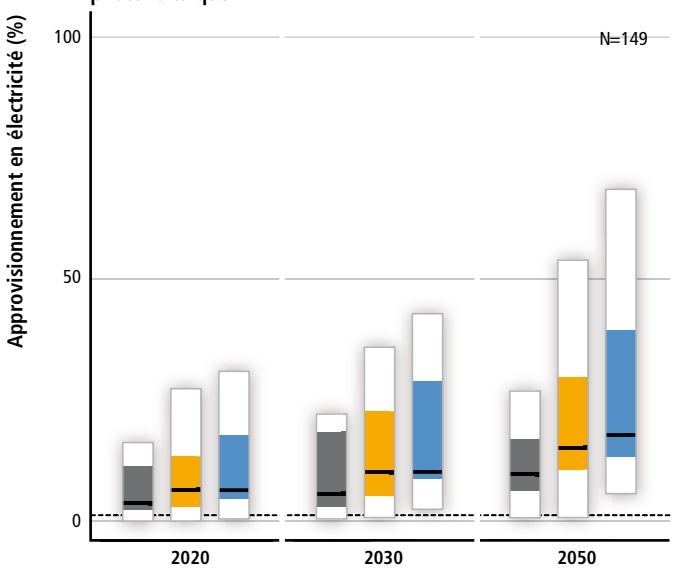


Figure TS.10.5 | Approvisionnement mondial en énergie primaire (équivalent direct) issue de la bioénergie, de l'énergie éolienne, de l'énergie solaire, de l'énergie hydroélectrique et de l'énergie géothermique d'après 164 scénarios à long terme à l'horizon 2020, 2030 et 2050, en fonction de différentes catégories de concentration atmosphérique de CO_2 en 2100. Les traits noirs épais correspondent aux médianes, les segments de barres colorés, aux intervalles interquartiles (25e à 75e percentiles) et les extrémités de la partie blanche des barres, à la fourchette complète pour tous les scénarios étudiés. [Figure 10.9]

Notes: Pour une question de présentation des données, le nombre de scénarios utilisés pour chacun des diagrammes varie considérablement. Ce nombre, par rapport à l'ensemble des 164 scénarios, figure dans le coin supérieur droit de chaque diagramme. L'une des raisons pour lesquelles l'approvisionnement bioénergétique semble plus élevé que celui des autres sources est le fait que l'on a recouru à la méthode de l'équivalent direct pour représenter l'énergie primaire. La bioénergie est considérée avant sa conversion en combustibles, comme les biocarburants, en électricité et en chaleur. Les autres technologies produisent surtout (mais pas uniquement) de l'électricité et de la chaleur et sont comptabilisées en fonction de l'énergie secondaire produite. Si l'on avait fait appel aux équivalences primaires, au moyen de la méthode de substitution, plutôt qu'aux équivalences directes, la production d'énergie à partir d'énergies renouvelables autres que la biomasse aurait été de deux à trois fois plus importante que celle qui figure ici. L'énergie marine n'est pas considérée ici, car les scénarios en tiennent rarement compte. Enfin, les catégories V et au-delà ne sont pas incluses et la catégorie IV passe de 570 à 600 ppm, car tous les scénarios de stabilisation indiquent des concentrations de CO_2 inférieures à 600 ppm en 2100 et les scénarios de référence les plus modérés atteignent des concentrations légèrement supérieures à 600 ppm d'ici 2100.

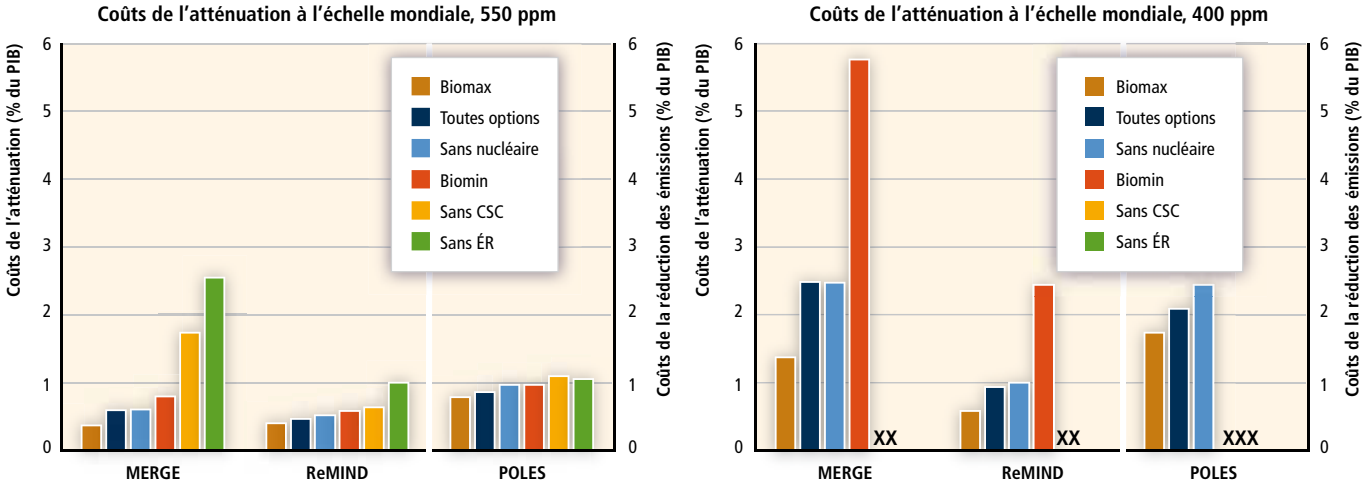


Figure TS.10.6 | Coûts de l'atténuation à l'échelle mondiale (mesurés par la baisse de la consommation) à partir du projet ADAM, selon diverses hypothèses concernant les technologies disponibles pour des niveaux de stabilisation à long terme de 550 et 400 ppmv d'équivalent CO_2. «Toutes les options» se réfèrent aux hypothèses concernant l'éventail de technologies standard dans les différents modèles, alors que «biomax» et «biomin» correspondent respectivement au double et à la moitié du potentiel standard de la biomasse de 200 EJ. «Sans CSC» exclut l'option CSC de l'éventail des mesures d'atténuation et «sans nucléaire» et «sans ÉR» limitent les niveaux d'utilisation de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables à la valeur de référence, qui correspond toujours potentiellement à un accroissement considérable par rapport à aujourd'hui. Le «X» dans le diagramme de droite indique que le niveau de 400 ppmv d'équivalent CO_2 n'a pas été atteint dans le cas d'options technologiques limitées. [Figure 10.11]

ReMIND-RECIPE prévoient que les énergies renouvelables satisferont respectivement 31 et 48 % de la demande mondiale d'énergie primaire en 2050. Cette grande variabilité est attribuable aux différentes hypothèses retenues quant au coût et à la performance des diverses technologies, à la disponibilité des autres options d'atténuation (CSC, énergie nucléaire, etc.), aux contraintes d'infrastructure ou d'intégration, aux obstacles non économiques (notamment les aspects relatifs à la durabilité), aux politiques spécifiques et aux projections relatives à la demande énergétique. [10.3.1.4]

Par ailleurs, même si la mise en valeur des différentes technologies augmente beaucoup avec le temps, la contribution des énergies renouvelables dans les scénarios pour la plupart des technologies dans les différentes régions du globe est beaucoup plus faible que leur potentiel technique correspondant (figure TS.10.9). La mise en valeur totale des énergies renouvelables à l'échelle mondiale d'ici 2050 dans tous les scénarios analysés représente moins de 3 % du potentiel technique disponible. Sur le plan régional, la part la plus importante de la mise en valeur du potentiel technique disponible des énergies renouvelables en 2050 concernerait la Chine, avec un total de 18 % (ER 2010), suivie des pays européens de l'OCDE, avec 15 % (ER 2010), et de l'Inde, avec 13 % (MiniCam EMF 22). Deux régions présentent des taux de mise en valeur d'environ 6 %: l'Asie en développement, avec 7 % (MiniCam EMF 22), et les pays nord-américains de l'OCDE, avec 6 % (ER 2010). Les cinq autres régions utilisent moins de 5 % du potentiel technique disponible pour ce qui est des ÉR. [10.3.2.1]

On a calculé le potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre à partir de la mise en valeur résultante des énergies renouvelables pour les quatre scénarios retenus. Des facteurs d'émission ont été établis pour chaque secteur, correspondant au type de production d'électricité ou d'apport de chaleur remplacé par les énergies renouvelables. Étant donné que la forme d'énergie substituée dépend du comportement du système dans son ensemble, il est nécessaire de procéder à une nouvelle analyse de scénarios cohérente ou à une analyse complexe de la répartition entre les centrales. Le calcul doit donc se fonder sur des hypothèses simplifiées et ne peut avoir qu'une valeur indicative. De manière générale, il faut faire preuve de prudence lorsqu'on veut attribuer des potentiels d'atténuation précis aux énergies renouvelables. [10.3.3]

On suppose très souvent que les applications des énergies renouvelables peuvent remplacer totalement les divers usages actuels des combustibles fossiles, mais en fait cela n'est pas nécessairement vrai, car les ÉR peuvent entrer en concurrence, par exemple, avec l'énergie nucléaire ou avec d'autres formes d'énergie renouvelable. Afin de prendre en compte, même partiellement, les incertitudes liées à l'établissement du facteur d'émission, on a défini trois cas différents (cas élevé: émissions moyennes spécifiques de CO_2 produites par les énergies fossiles en vertu du scénario de référence; cas moyen: émissions moyennes spécifiques de CO_2 produites par l'ensemble des énergies en vertu du scénario de référence; et cas bas: émissions moyennes spécifiques de CO_2 produites par les formes d'énergie considérées par un scénario donné). Les biocarburants et autres options d'énergie

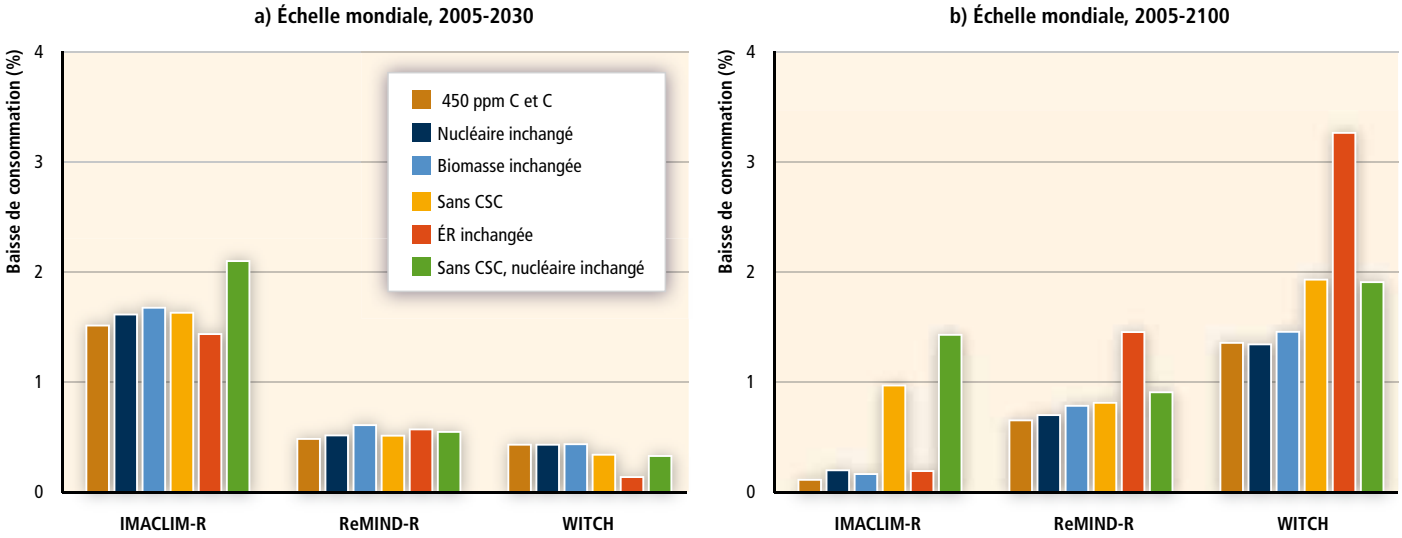


Figure TS.10.7 | Coûts de l'atténuation à partir du projet RECIPE, selon diverses hypothèses concernant les technologies disponibles pour un niveau de stabilisation à long terme de 450 ppmv de CO_2 . Les valeurs des options technologiques sont exprimées en baisses de consommation pour les scénarios dans lesquels l'option indiquée est délaissée (CSC) ou limitée aux niveaux de référence (toutes les autres technologies) pour les périodes a) 2005-2030 et b) 2005-2100. Elles sont calculées en différences de baisse de consommation pour les scénarios dans lesquels l'utilisation de certaines technologies est limitée au scénario de référence. Soulignons que, dans le cas de WITCH, il a été assumé que la technologie générale de soutien n'était pas disponible dans le scénario «ÉR inchangée». [Figure 10.12]

renouvelable pour les transports sont exclus du calcul en raison du manque de données. Par ailleurs, afin d'englober les émissions de gaz à effet de serre produites par la bioénergie utilisée pour le chauffage direct, on n'a considéré que de la moitié des économies théoriques de CO_2 aux fins de calcul. Vu les incertitudes et la variabilité élevées observées pour ce qui est des émissions intégrées de gaz à effet de serre, il s'agit encore une fois d'une hypothèse simplifiée. [10.3.3]

La figure TS.10.10 montre les potentiels cumulés de réduction des émissions de CO_2 présentés par les sources d'énergie renouvelable à l'horizon 2020, 2030 et 2050, à partir des quatre scénarios examinés en détail ici. Les scénarios analysés permettent d'obtenir un potentiel cumulé de réduction (2010 à 2050) atteignant, dans le cas moyen, une valeur de 244 Gt CO_2 (scénario de référence), de 297 Gt CO_2 (MiniCam EMF 22), de 482 Gt CO_2 (ER 2010) et de 490 Gt CO_2 (ReMIND-RECIPE). L'éventail complet des réductions cumulées d'émissions

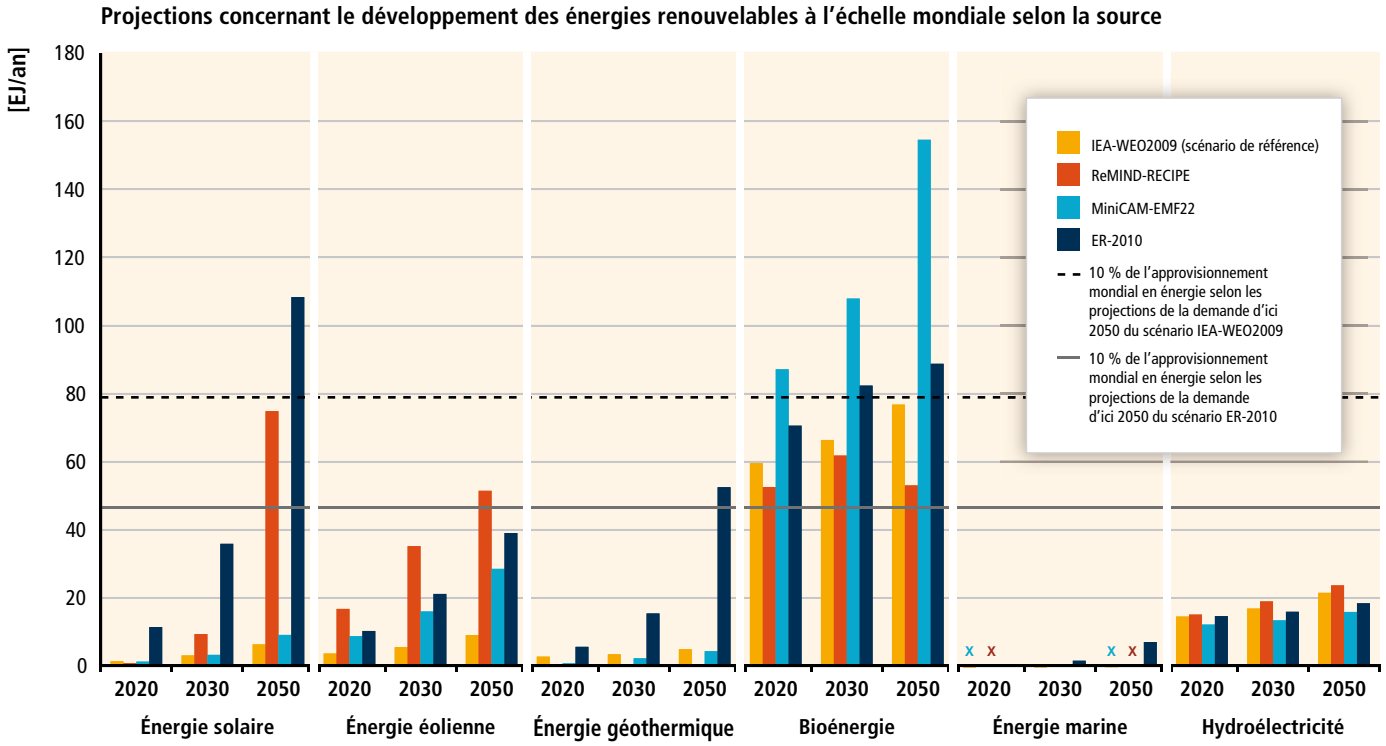
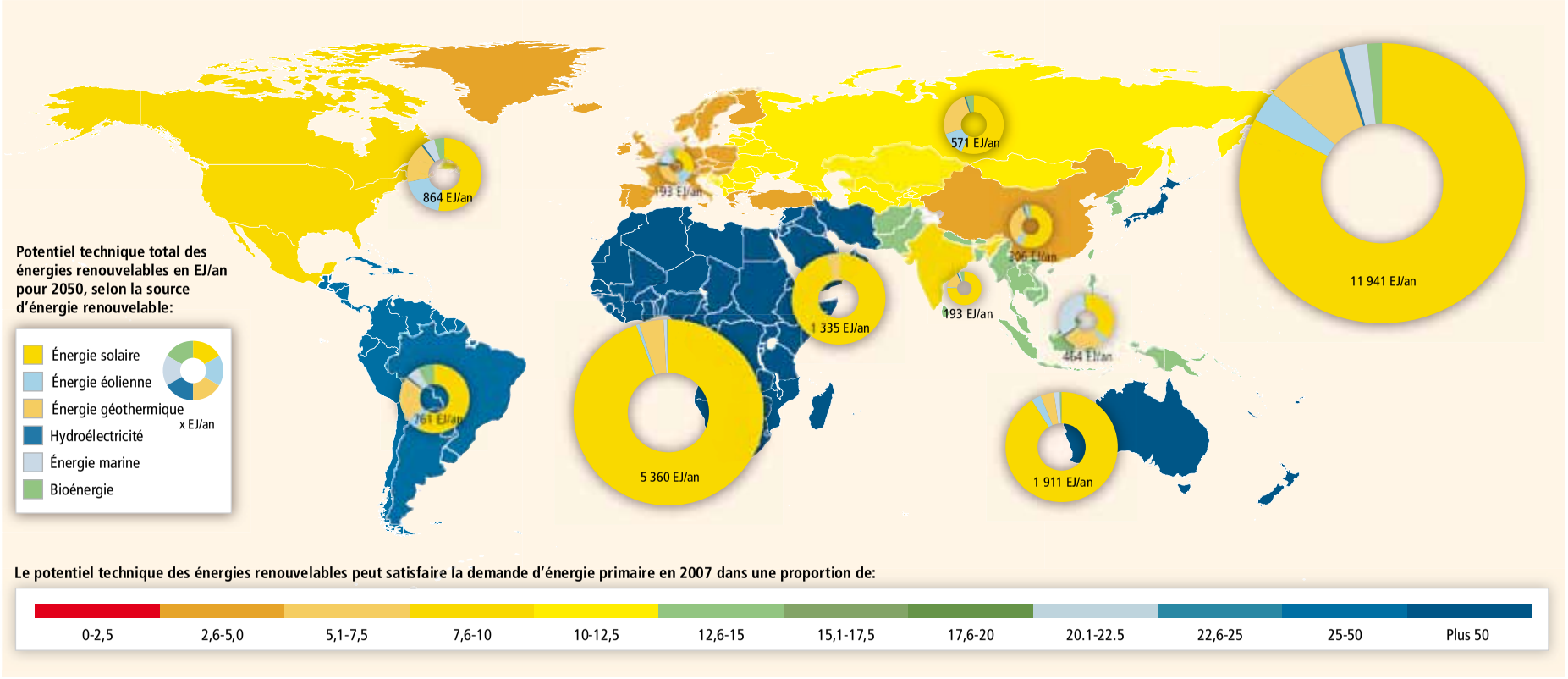


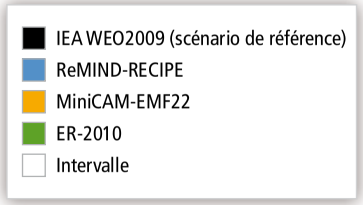
Figure TS.10.8 | Projections concernant le développement des énergies renouvelables à l'échelle mondiale selon la source et proportions de l'énergie primaire renouvelable à l'échelle mondiale, selon la source, pour l'ensemble des quatre scénarios donnés à titre d'exemple. [Figure 10.14]

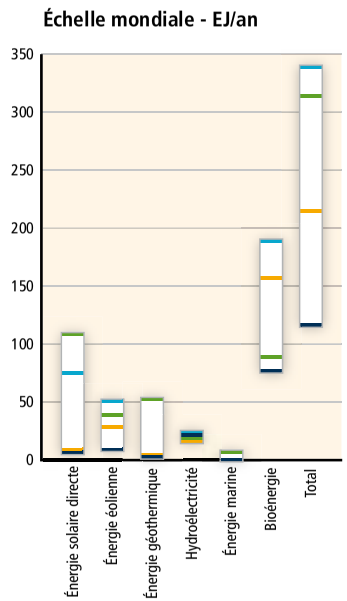


Analyse du potentiel des énergies renouvelables: les potentiels techniques indiqués ici représentent les potentiels mondiaux et régionaux totaux fondés sur une analyse des études publiées avant 2009 par Krewitt *et al* (2009). Tout potentiel déjà utilisé pour la production d'énergie n'a pas été déduit. En raison des différentes approches et méthodes de comptabilisation retenues par les diverses études, il est impossible de comparer de manière rigoureuse ces estimations selon les technologies et les régions ainsi que la demande d'énergie primaire. Les analyses du potentiel technique des ÉR publiées après 2009, qui donnent parfois des résultats plus élevés, ne sont pas prises en compte dans la présente figure. Par ailleurs, certaines technologies ÉR peuvent concurrencer d'autres modes d'utilisation des terres, ce qui peut entraîner une diminution du potentiel global des énergies renouvelables.

Données sur les scénarios: EIA WEO2009 – scénario de référence (Agence internationale de l'énergie (AIE), 2009; Teske *et al*, 2010) ; ReMind-RECIPE – scénario de stabilisation à 450 ppm (Luderer *et al*, 2009) ; MiniCam EMF22 – meilleur scénario de dépassement 2,6 W/m² (Calvin *et al*, 2009); Advanced Energy [R]evolution 2010 (Teske *et al*, 2010)

Graphiques en banderole: niveau de mise en valeur des énergies renouvelables en 2050, selon les scénarios et les sources d'énergie renouvelable, en EJ/an





Europe OCDE – EJ/an
0
5
10
15
20
25
30
35
Énergie solaire directe
Énergie éolienne
Énergie géothermique
Hydroélectricité
Énergie marine
Bioénergie
Total

Asie en développement – EJ/an
0
30
60
90
120
150
Énergie solaire directe
Énergie éolienne
Énergie géothermique
Hydroélectricité
Énergie marine
Bioénergie
Total

Économies en transition – EJ/an
0
5
10
15
20
25
Énergie solaire directe
Énergie éolienne
Énergie géothermique
Hydroélectricité
Énergie marine
Bioénergie
Total

Amérique du Nord OCDE – EJ/an
0
10
20
30
40
50
60
Énergie solaire directe
Énergie éolienne
Énergie géothermique
Hydroélectricité
Énergie marine
Bioénergie
Total

Moyen-Orient – EJ/an
0
5
10
15
20
Énergie solaire directe
Énergie éolienne
Énergie géothermique
Hydroélectricité
Énergie marine
Bioénergie
Total

Afrique – EJ/an
0
5
10
15
20
25
30
Énergie solaire directe
Énergie éolienne
Énergie géothermique
Hydroélectricité
Énergie marine
Bioénergie
Total

Pacifique OCDE – EJ/an
0
5
10
15
20
Énergie solaire directe
Énergie éolienne
Énergie géothermique
Hydroélectricité
Énergie marine
Bioénergie
Total

Amérique latine – EJ/an
0
5
10
15
20
25
Énergie solaire directe
Énergie éolienne
Énergie géothermique
Hydroélectricité
Énergie marine
Bioénergie
Total

Figure TS.10.9 (page précédente)| Décomposition régionale de la mise en valeur des énergies renouvelables en 2050 pour un ensemble de quatre scénarios caractéristiques et comparaison de la mise en valeur possible du potentiel technique correspondant à différentes technologies. Les quatre scénarios choisis sont tirés d'une étude portant sur 164 scénarios et comprennent un scénario de référence (WEO2009 de l'AIE), sans niveaux précis de stabilisation de la concentration de gaz à effet de serre, et trois scénarios correspondant à différentes catégories de concentration de CO_2 , l'un d'eux (ReMind-RECIPE) figurant dans la catégorie III (440 à 485 ppm) et les deux autres (MiniCam EMF 22 et ER 2010) dans la catégorie I (< 400 ppm). Le scénario MiniCam EMF 22 prend en compte l'énergie nucléaire ainsi que le captage et le stockage du carbone (CSC) comme options d'atténuation et permet un dépassement pour atteindre le niveau de concentration, alors que le scénario ER 2010 opte pour un mode d'application optimiste au sujet des énergies renouvelables. Les pays en transition vers une économie de marché sont des pays qui sont en train de passer d'une économie planifiée centralisée à un système de libre marché. [Figure 10.19]

de CO_2 dans tous les cas et scénarios considérés aux fins de calcul va de 218 Gt CO_2 (WEO 2009) à 561 Gt CO_2 (ReMIND-RECIPE), comparativement à environ 1 530 Gt CO_2 d'émissions d'origine fossile et industrielle cumulées de CO_2 selon le scénario de référence WEO 2009 pour la même période. Ces chiffres excluent toutefois les réductions d'émissions de CO_2 procurées par l'utilisation d'énergies renouvelables dans le secteur des transports (y compris les véhicules électriques et alimentés aux biocarburants). Le potentiel global d'atténuation des émissions de CO_2 pourrait donc être plus élevé. [10.3.3]

10.4 Courbes des coûts régionaux des mesures d'atténuation fondées sur la mise en valeur des sources d'énergie renouvelable

Le concept des courbes d'approvisionnement, que ce soit dans le contexte de la réduction des émissions de carbone, de la production d'énergie ou de sa conservation, a toujours le même fondement. Il s'agit de courbes constituées généralement de paliers discrets, dont chacun associe le coût marginal des mesures d'atténuation/technologies de production d'énergie ou des mesures de conservation de l'énergie à leur potentiel; ces paliers sont classés en fonction de leur coût. Dans les diagrammes, ceux-ci commencent par le coût le plus bas à gauche, les coûts de plus en plus élevés étant ajoutés les uns après les autres à droite, ce qui permet d'obtenir une courbe ascendante de la gauche vers la droite. On peut donc interpréter cette courbe de la même manière que les courbes d'approvisionnement en économie traditionnelle. [10.4.2.1]

On a souvent recours au concept des courbes d'approvisionnement pour la conservation de l'énergie, mais celui-ci présente des inconvénients généraux et spécifiques. Dans ce contexte, les inconvénients les plus souvent évoqués sont les suivants: controverse parmi les scientifiques au sujet des potentiels lorsque les coûts sont négatifs; simplification de la réalité, les acteurs concernés fondant leurs décisions sur d'autres critères que ceux utilisés pour les

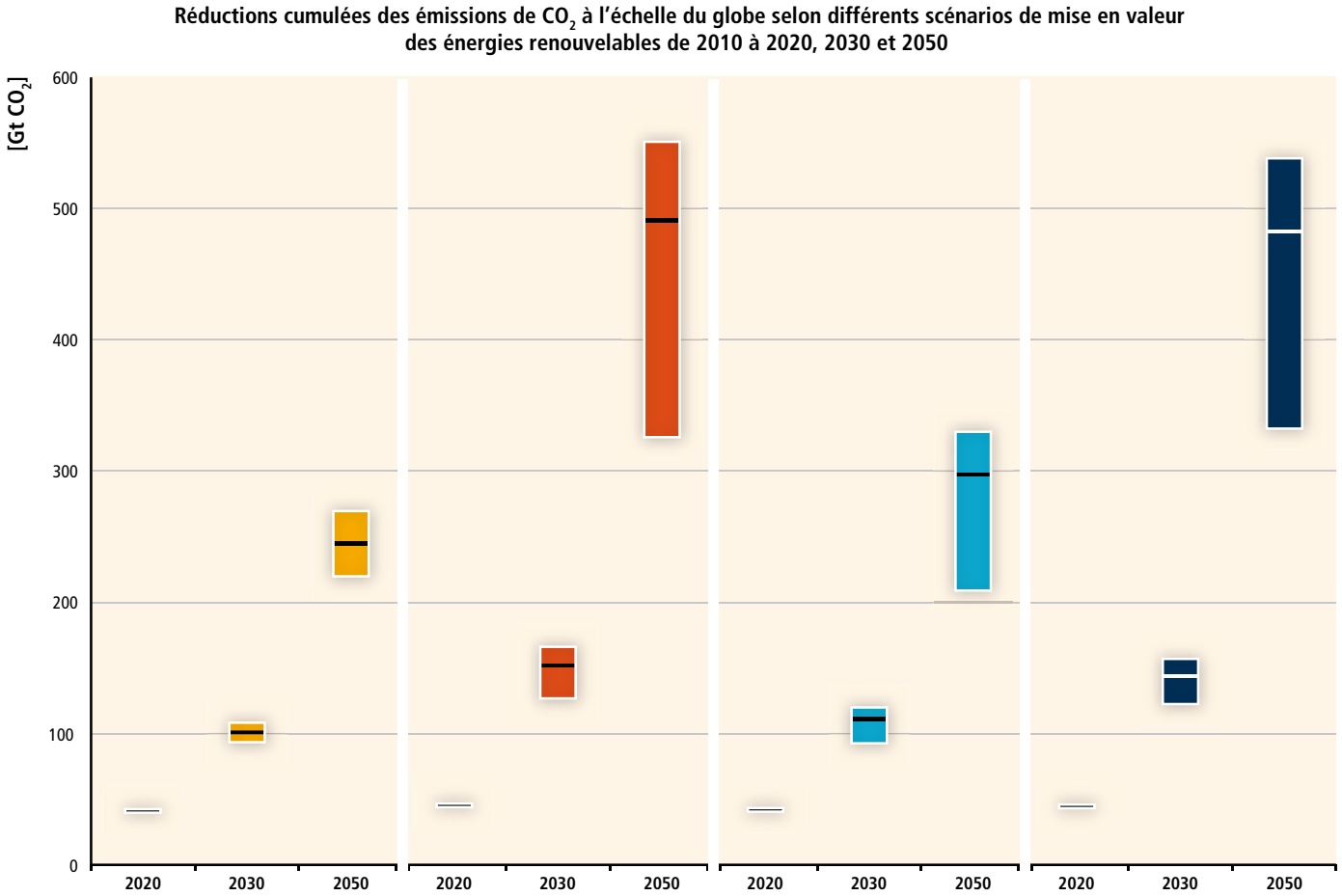


Figure TS.10.10 | Réductions cumulées des émissions de CO_2 à l'échelle du globe de 2010 à 2050, selon quatre scénarios caractéristiques. Les intervalles présentés traduisent les fortes incertitudes concernant la source d'énergie conventionnelle substituée. Alors que la limite supérieure suppose un remplacement complet des combustibles fossiles riches en carbone, la limite inférieure se rapporte aux émissions de CO_2 déterminées par le scénario analysé. Quant à la ligne du milieu, elle est le résultat des calculs effectués en supposant que les énergies renouvelables remplacent les différentes sources d'énergie considérées dans le scénario de référence. [Figure 10.22]

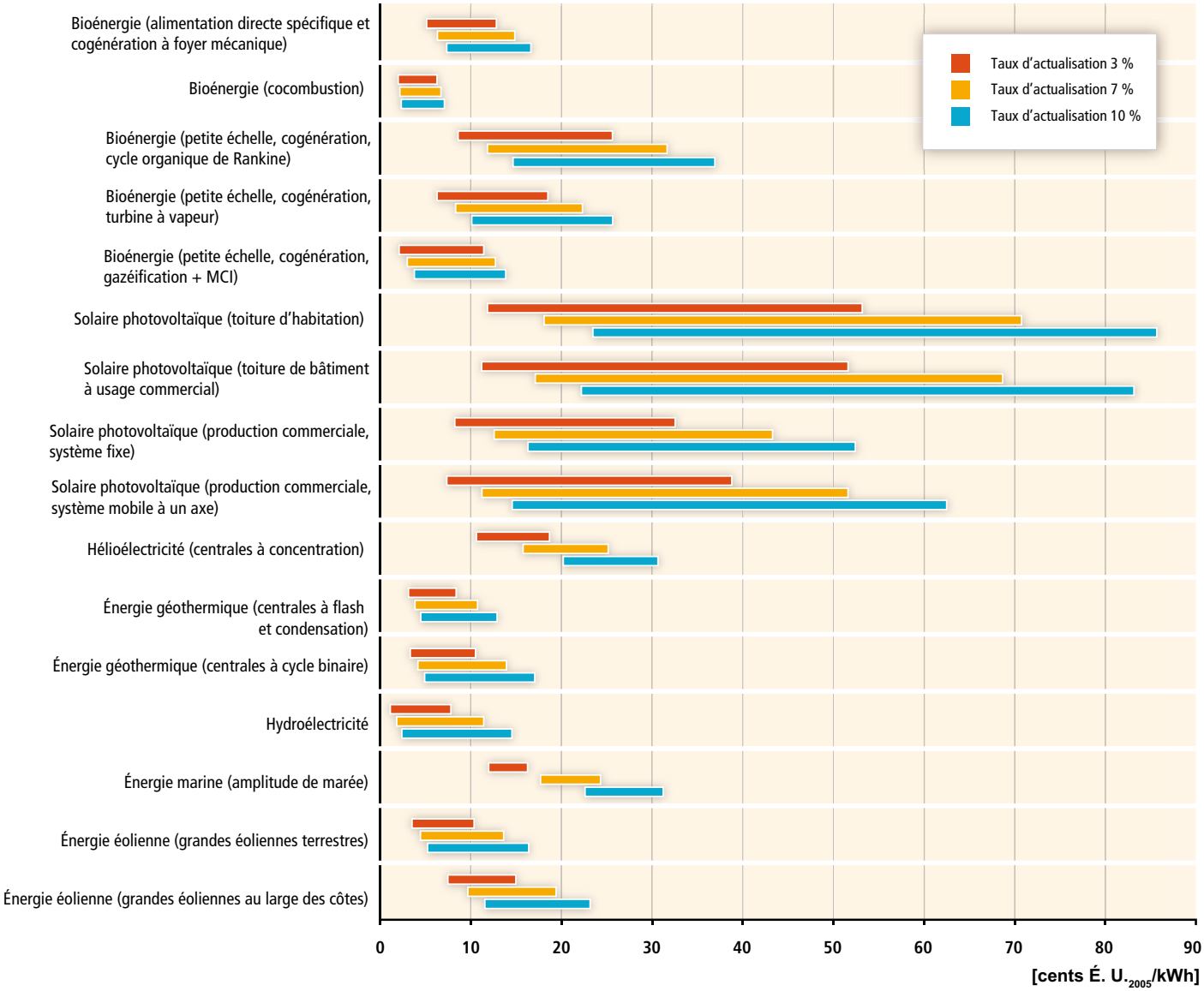


Figure TS.10.11 | Coût moyen actualisé de l'électricité produite à l'aide des technologies ÉR actuellement commercialisées, à des taux d'actualisation de 3, 7 et 10 %. Les estimations de ce coût moyen actualisé pour toutes les technologies se fondent sur les données récapitulées à l'annexe III et sur la méthodologie décrite à l'annexe II. La limite inférieure des valeurs du coût moyen actualisé a été obtenue à partir des valeurs inférieures des coûts d'investissement, d'exploitation et maintenance et (s'il y a lieu) des matières premières et des valeurs supérieures du coefficient d'utilisation et de la durée de vie, ainsi que (le cas échéant) des valeurs supérieures du rendement de conversion et du revenu tiré des sous-produits. Quant à la limite supérieure des valeurs du coût moyen actualisé, elle se fonde sur les valeurs supérieures des coûts d'investissement, d'exploitation et maintenance et (s'il y a lieu) des matières premières et sur les valeurs inférieures du coefficient d'utilisation et de la durée de vie, ainsi que (le cas échéant) sur les valeurs inférieures du rendement de conversion et du revenu tiré des sous-produits. Soulignons que les valeurs du coefficient d'utilisation, du revenu tiré des sous-produits et de la durée de vie ont parfois été rapportées à des valeurs standard ou moyennes. Il convient de consulter l'annexe III pour obtenir des données et des informations supplémentaires. [Figure 10.29]

courbes; incertitude économique et technologique inhérente à la prévision des conditions futures, notamment l'évolution des prix de l'énergie et des taux d'actualisation; autres incertitudes liées à une forte agrégation; sensibilité élevée aux hypothèses de base et à l'évolution globale de l'éventail en matière de production et de transport; examen distinct des diverses mesures, sans tenir compte de l'interdépendance des mesures appliquées simultanément ou successivement; et, dans le cas des courbes de réduction des émissions de carbone, forte sensibilité aux hypothèses (incertaines) concernant les facteurs d'émission. [10.4.2.1]

Outre ces inconvénients, soulignons qu'il est très malaisé de comparer les données et les résultats des courbes de coûts de réduction des émissions et des courbes d'approvisionnement en rapport avec les énergies renouvelables, car rares sont les études qui utilisent une approche globale et cohérente décrivant les méthodes employées. De nombreuses études régionales et nationales donnent une réduction de moins de 10 % des émissions de CO_2 de référence à moyen terme, à un coût d'atténuation inférieur à 100 dollars É.-U.$_{2005}$/t CO_2. Les potentiels de réduction à faible coût qui en résultent sont assez bas par rapport à ceux des nombreux scénarios examinés ici. [10.4.3.2]

10.5 Coûts de la commercialisation et de l'utilisation

Certaines technologies ÉR sont très compétitives par rapport aux prix actuels de l'énergie sur le marché. De nombreuses autres peuvent offrir des services

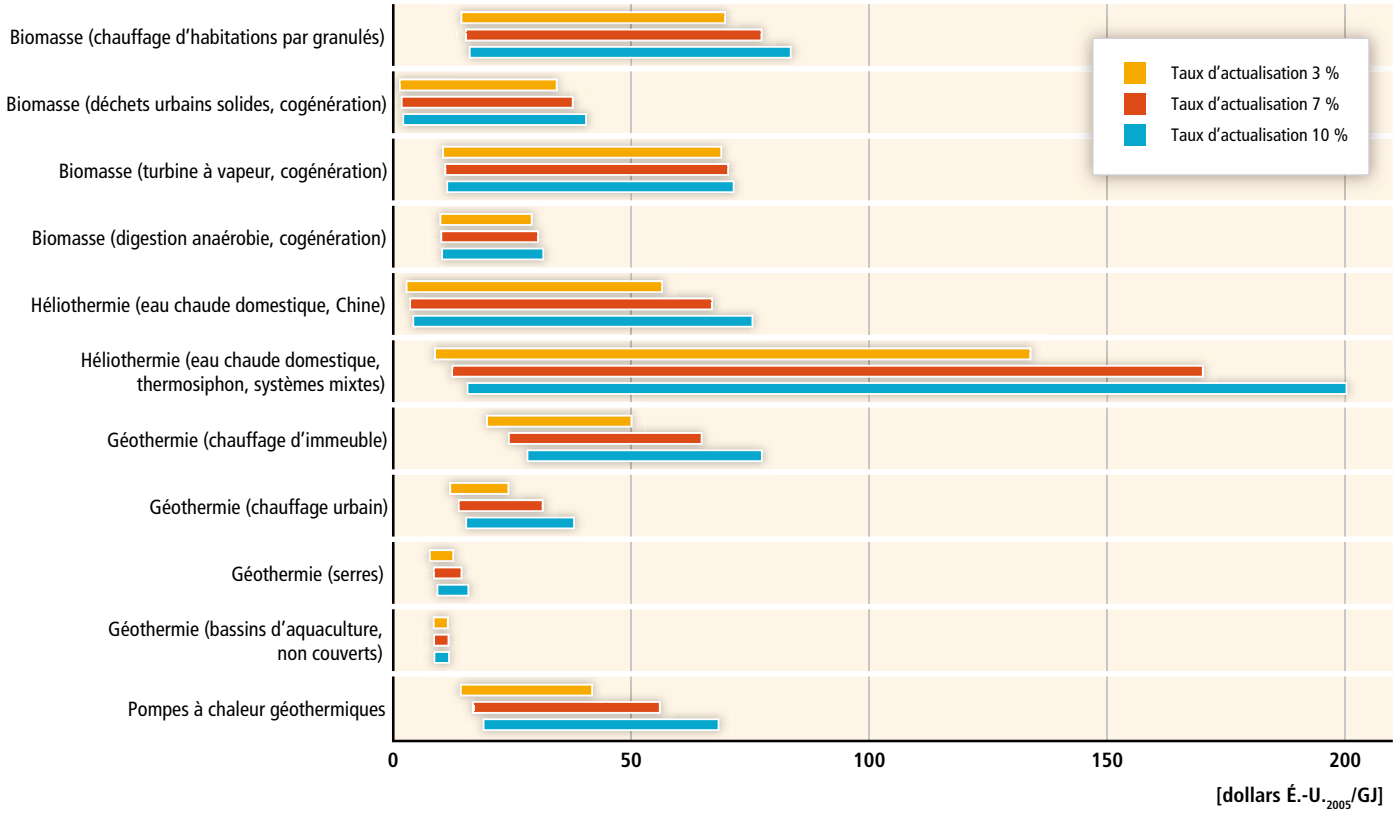


Figure TS.10.12 | Coût moyen actualisé de l'énergie thermique produite au moyen des technologies ÉR commercialisées, à des taux d'actualisation de 3, 7 et 10 %. Les estimations de ce coût moyen actualisé pour toutes les technologies se fondent sur les données récapitulées à l'annexe III et sur la méthodologie décrite à l'annexe II. La limite inférieure des valeurs du coût moyen actualisé a été obtenue à partir des valeurs inférieures des coûts d'investissement, d'exploitation et maintenance et (s'il y a lieu) des matières premières et des valeurs supérieures du coefficient d'utilisation et de la durée de vie, ainsi que (le cas échéant) des valeurs supérieures du rendement de conversion et du revenu tiré des sous-produits. Quant à la limite supérieure des valeurs du coût moyen actualisé, elle se fonde sur les valeurs supérieures des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance et (s'il y a lieu) des matières premières et sur les valeurs inférieures du coefficient d'utilisation et de la durée de vie, ainsi que (le cas échéant) sur les valeurs inférieures du rendement de conversion et du revenu tiré des sous-produits. Soulignons que les valeurs du coefficient d'utilisation et de la durée de vie ont parfois été rapportées à des valeurs standard ou moyennes. Il convient de consulter l'annexe III pour obtenir des données et des informations supplémentaires. [Figure 10.30]

énergétiques concurrentiels dans certaines circonstances, par exemple dans les régions où les conditions en matière de ressources sont favorables ou qui ne disposent pas de l'infrastructure nécessaire pour l'approvisionnement à partir d'autres sources d'énergie à faible coût. Dans la plupart des régions du monde, toutefois, il est encore indispensable d'adopter des mesures de politique générale pour assurer la mise en valeur rapide de nombreuses sources d'énergie renouvelable. [2.7, 3.8, 4.6, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5.1, figure TS.1.9]

Les figures TS.10.11 et TS.10.12 fournissent des données supplémentaires sur les coûts moyens actualisés de l'énergie, également appelés coûts unitaires moyens actualisés ou coûts de production moyens actualisés, respectivement pour certaines technologies de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et certaines technologies de chauffage à partir d'énergies renouvelables. La figure TS.10.13 indique le coût moyen actualisé d'un certain nombre de carburants. Les coûts moyens actualisés de l'énergie englobent tous les coûts (à savoir les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et de maintenance, les coûts des combustibles et les coûts de déclassement) d'une installation de conversion d'énergie et les rapportent à l'énergie produite pendant sa durée d'exploitation, mais sans tenir compte des subventions ou des mesures d'incitation. Comme certaines technologies ÉR (cellules photovoltaïques, énergie solaire à concentration, énergie éolienne, etc.) se caractérisent par un rapport coûts d'investissement/coûts variables élevé, le taux d'actualisation appliqué a une forte influence sur leurs coûts moyens actualisés de l'énergie (voir les figures TS.10.11, TS.10.12 et TS.10.13). [10.5.1] Les coûts présentés proviennent de documents publiés et constituent les données les plus à jour sur le sujet. Les fourchettes respectives sont assez larges, étant donné que le coût moyen actualisé de technologies identiques peut varier à l'échelle planétaire selon les ressources énergétiques renouvelables disponibles et les coûts locaux d'investissement, de financement et d'exploitation et de maintenance. La comparaison de différentes technologies ne devrait pas se fonder uniquement sur les données de coûts présentées dans les figures TS.1.9, TS.10.11, TS.10.12 et TS.10.13, mais devrait aussi tenir compte des conditions liées au site, au projet et aux investisseurs. Les sections sur les coûts figurant dans les chapitres qui traitent des technologies [2.7, 3.8, 4.7, 5.8, 6.7, 7.8] donnent de bonnes indications à ce sujet. [10.5.1]

Les fourchettes de coûts fournies ici ne comprennent pas les coûts d'intégration (chapitre 8), les coûts ou avantages externes (chapitre 9) ou les coûts des politiques (chapitre 11). Dans des conditions favorables, les limites inférieures de ces fourchettes indiquent que certaines technologies ÉR peuvent déjà concurrencer certaines sources traditionnelles aux prix actuels du marché dans de nombreuses régions du monde. [10.5.1]

Les courbes des coûts d'approvisionnement [10.4.4, figures 10.23, 10.25, 10.26 et 10.27] donnent des informations supplémentaires sur la base de ressources disponibles (en fonction du coût moyen actualisé de l'énergie associé à l'extraction). Les

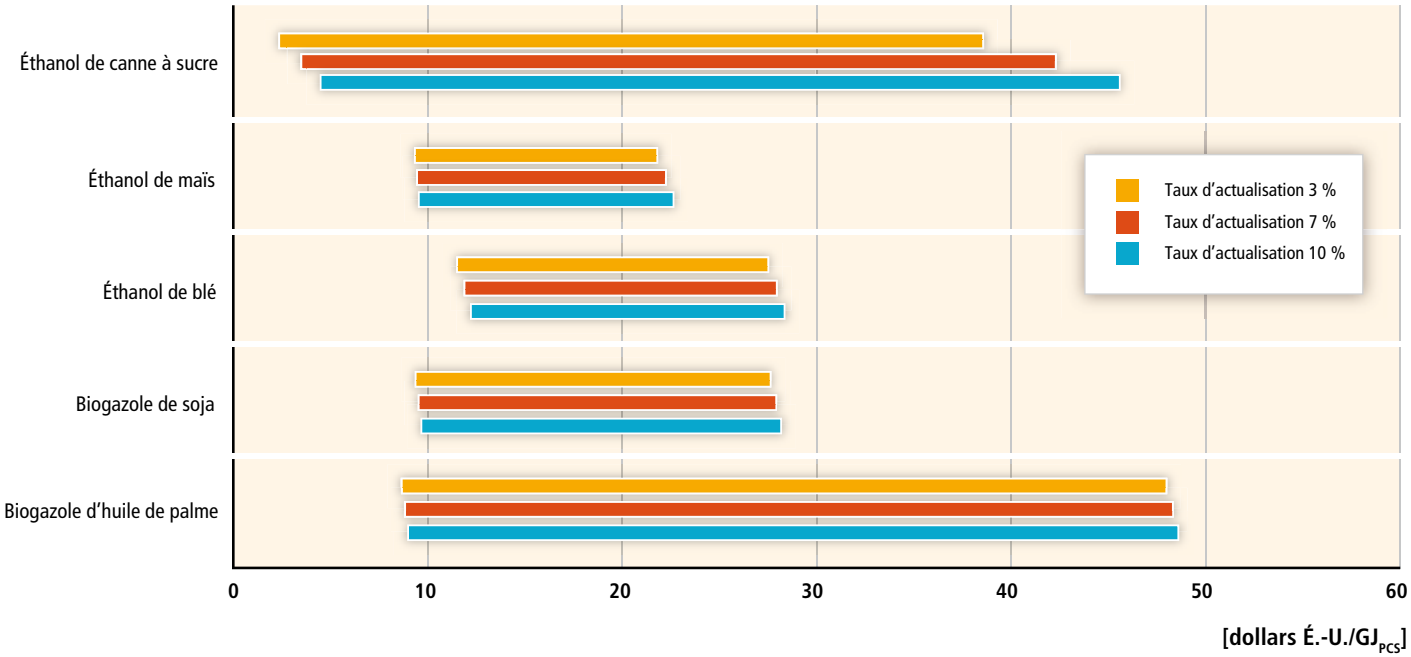


Figure TS.10.13 | Coût moyen actualisé des combustibles produits à l'aide de technologies de conversion de la biomasse commercialisées, à des taux d'actualisation de 3, 7 et 10 %. Les estimations de ce coût moyen actualisé pour toutes les technologies se fondent sur les données récapitulées à l'annexe III et sur la méthodologie décrite à l'annexe II. La limite inférieure des valeurs du coût moyen actualisé a été obtenue à partir des valeurs inférieures des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance et des matières premières, tandis que leur limite supérieure se fonde sur les valeurs supérieures des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance et des matières premières. Soulignons que les valeurs du rendement de conversion, du coefficient d'utilisation, du revenu tiré des sous-produits et de la durée de vie ont été rapportées à des valeurs moyennes. Il convient de consulter l'annexe III pour obtenir des données et des informations supplémentaires. (PCS: pouvoir calorifique supérieur) [Figure 10.31]

courbes examinées [10.3.2.1, figures 10.15–10.17] illustrent, en revanche, la quantité d'énergie renouvelable exploitée (encore une fois en fonction du coût moyen actualisé de l'énergie) dans différentes régions, une fois que l'on a adopté certaines stratégies de développement des énergies renouvelables. Il faut aussi faire remarquer que la plupart des courbes des coûts d'approvisionnement se réfèrent à des échéances futures (par exemple 2030 ou 2050), alors que les coûts moyens actualisés de l'énergie présentés dans les sections sur les coûts contenues dans les chapitres qui traitent des technologies ainsi que ceux figurant dans les figures TS.10.11, TS.10.12 et TS.10.13 (et à l'annexe III) sont des coûts actuels. [10.5.1]

Des progrès substantiels ont été accomplis au niveau des technologies ÉR et de la réduction des coûts associés au cours des dernières décennies, même si la contribution et les interactions mutuelles des différents éléments moteurs (apprentissage par la recherche, apprentissage par la pratique, apprentissage par l'utilisation, apprentissage par l'interaction, expansion des technologies, économies d'échelle, etc.) ne sont pas toujours bien comprises. [2.7, 3.8, 7.8, 10.5.2]

D'un point de vue empirique, la baisse des coûts peut être décrite au moyen de courbes d'expérience (ou d'«apprentissage»). Avec le doublement de la puissance installée (cumulée), de nombreuses technologies présentent une baisse plus ou moins constante du pourcentage des coûts d'investissement (ou des coûts moyens actualisés ou des prix unitaires, selon l'indicateur choisi). La valeur numérique qui décrit cette amélioration est appelée taux d'apprentissage. Les taux d'apprentissage observés sont récapitulés au tableau TS.10.1 [10.5.2]

Tous les efforts visant à évaluer les coûts futurs par extrapolation des courbes d'expérience doivent tenir compte de l'incertitude liée aux taux d'apprentissage, ainsi que des restrictions et lacunes au niveau des connaissances déjà examinées. [10.5.6, 7.8.4.1] On peut aussi avoir recours à des experts en vue de recueillir des informations supplémentaires concernant les potentiels futurs de réduction des coûts, qui pourraient être comparées aux résultats obtenus à partir des taux d'apprentissage. Les analyses de modèles techniques destinées à déterminer les potentiels d'amélioration pourraient fournir d'autres renseignements utiles pour l'établissement de projections des coûts. [2.6, 3.7, 4.6, 6.6, 7.7, 10.5.2]

Par exemple, des avancées technologiques importantes avec des réductions de coût correspondantes sont prévues, notamment dans les champs d'application suivants: biocarburants et bioraffineries de prochaine génération; technologies et procédés de fabrication avancés dans les domaines des cellules photovoltaïques et de l'énergie solaire à concentration; systèmes géothermiques améliorés; multiples technologies marines émergentes; conception des fondations et des turbines pour l'énergie éolienne au large des côtes. La réduction des coûts de production d'hydroélectricité devrait sans doute être moins importante que dans le cas d'autres technologies ÉR, mais la recherche-développement offre la possibilité de mener à bien des projets hydroélectriques sur le plan technique dans un plus large éventail de conditions naturelles et d'améliorer la performance technique des installations existantes et nouvelles. [2.6, 3.7, 4.6, 5.3, 5.7, 5.8, 6.6, 7.7]

Il est impossible de savoir s'il est justifié ou non de procéder à des investissements initiaux dans une technologie innovante donnée tant que la technologie en question est considérée de manière isolée. Dans une première tentative pour éclaircir cette question et, en particulier, étudier la concurrence mutuelle des technologies envisageables pour la protection du climat, des modélisateurs d'évaluation intégrée ont commencé à modéliser de manière

Tableau TS.10.1 | Taux d'apprentissage observés pour différentes technologies d'approvisionnement en énergie. À noter que les valeurs tirées de publications plus anciennes sont moins fiables, car elles se rapportent à des périodes plus courtes. [Tableau 10.10]

Technologie	Source	Pays / région	Période	Taux d'apprentissage (%)	Indicateur de performance
Éolien terrestre					
	Neij, 1997	Danemark	1982-1995	4	Prix d'une éolienne ($É.-U./kW)
	Mackay et Probert, 1998	États-Unis d'Amérique	1981-1996	14	Prix d'une éolienne ($É.-U./kW)
	Neij, 1999	Danemark	1982-1997	8	Prix d'une éolienne ($É.-U./kW)
	Durstewitz, 1999	Allemagne	1990-1998	8	Prix d'une éolienne ($É.-U./kW)
	AIE, 2000	États-Unis d'Amérique	1985-1994	32	Coût de la production d'électricité ($É.-U./kWh)
	AIE, 2000	Union européenne	1980-1995	18	Coût de la production d'électricité ($É.-U./kWh)
	Kouvaritakis et al., 2000	OCDE	1981-1995	17	Prix d'une éolienne ($É.-U./kW)
	Neij, 2003	Danemark	1982-1997	8	Prix d'une éolienne ($É.-U./kW)
	Junginger et al., 2005a	Espagne	1990-2001	15	Coûts d'investissement clé en main (euros/kW)
	Junginger et al., 2005a	Royaume-Uni	1992-2001	19	Coûts d'investissement clé en main (euros/kW)
	Söderholm et Sundqvist, 2007	Allemagne, Royaume-Uni, Danemark	1986-2000	5	Coûts d'investissement clé en main (euros/kW)
	Neij, 2008	Danemark	1981-2000	17	Coût de la production d'électricité ($É.-U./kWh)
	Kahouli-Brahmi, 2009	Échelle mondiale	1979-1997	17	Coûts d'investissement ($É.-U./kW)
	Nemet, 2009	Échelle mondiale	1981-2004	11	Coûts d'investissement ($É.-U./kW)
	Wiser et Bolinger, 2010	Échelle mondiale	1982-2009	9	Coûts d'investissement ($É.-U./kW)
Éolien au large des côtes					
	Isles, 2006	8 pays de l'Union européenne	1991-2006	3	Coûts d'investissement dans les parcs éoliens ($É.-U./kW)
Photovoltaïque (PV)					
	Harmon, 2000	Échelle mondiale	1968-1998	20	Prix du module PV ($É.-U./watt-crête)
	AIE, 2000	Union européenne	1976-1996	21	Prix du module PV ($É.-U./watt-crête)
	Williams, 2002	Échelle mondiale	1976-2002	20	Prix du module PV ($É.-U./watt-crête)
	ECN, 2004	Union européenne	1976-2001	20-23	Prix du module PV ($É.-U./watt-crête)
	ECN, 2004	Allemagne	1992-2001	22	Prix du solde du coût des systèmes
	van Sark et al., 2007	Échelle mondiale	1976-2006	21	Prix du module PV ($É.-U./watt-crête)
	Kruck et Eltrop, 2007	Allemagne	1977-2005	13	Prix du module PV (euros/watt-crête)
	Kruck et Eltrop, 2007	Allemagne	1999-2005	26	Prix du solde du coût des systèmes
	Nemet, 2009	Échelle mondiale	1976-2006	15-21	Prix du module PV ($É.-U./watt-crête)
Énergie solaire à concentration (ESC)					
	Enermodal, 1999	États-Unis d'Amérique	1984-1998	8-15	Coûts d'investissement dans les centrales ($É.-U./kW)
Biomasse					
	AIE, 2000	Union européenne	1980-1995	15	Coût de la production d'électricité ($É.-U./kWh)
	Goldemberg et al., 2004	Brésil	1985-2002	29	Prix du combustible à l'éthanol ($É.-U./m^3)
	Junginger et al., 2005b	Suède, Finlande	1975-2003	15	Prix des copeaux de bois de forêt (euros/GJ)
	Junginger et al., 2006	Danemark	1984-1991	15	Coût de la production de biogaz (euros/Nm^3)
	Junginger et al., 2006	Suède	1990-2002	8-9	Cogénération à partir de biomasse (euros/kWh)
	Junginger et al., 2006	Danemark	1984-2001	0-15	Coût de la production de biogaz (euros/Nm^3)
	Junginger et al., 2006	Danemark	1984-1998	12	Centrales au biogaz (euros/m^3 biogaz/jour)
	Van den Wall Bake et al., 2009	Brésil	1975-2003	19	Éthanol à base de canne à sucre ($É.-U./m^3)
	Goldemberg et al., 2004	Brésil	1980-1985	7	Éthanol à base de canne à sucre ($É.-U./m^3)
	Goldemberg et al., 2004	Brésil	1985-2002	29	Éthanol à base de canne à sucre ($É.-U./m^3)
	Van den Wall Bake et al., 2009	Brésil	1975-2003	20	Éthanol à base de canne à sucre ($É.-U./m^3)
	Hettinga et al., 2009	États-Unis d'Amérique	1983-2005	18	Éthanol à base de maïs ($É.-U./m^3)
	Hettinga et al., 2009	États-Unis d'Amérique	1975-2005	45	Coût de la production de maïs ($É.-U./t maïs)
	Van den Wall Bake et al., 2009	Brésil	1975-2003	32	Coût de la production de canne à sucre ($É.-U./t)

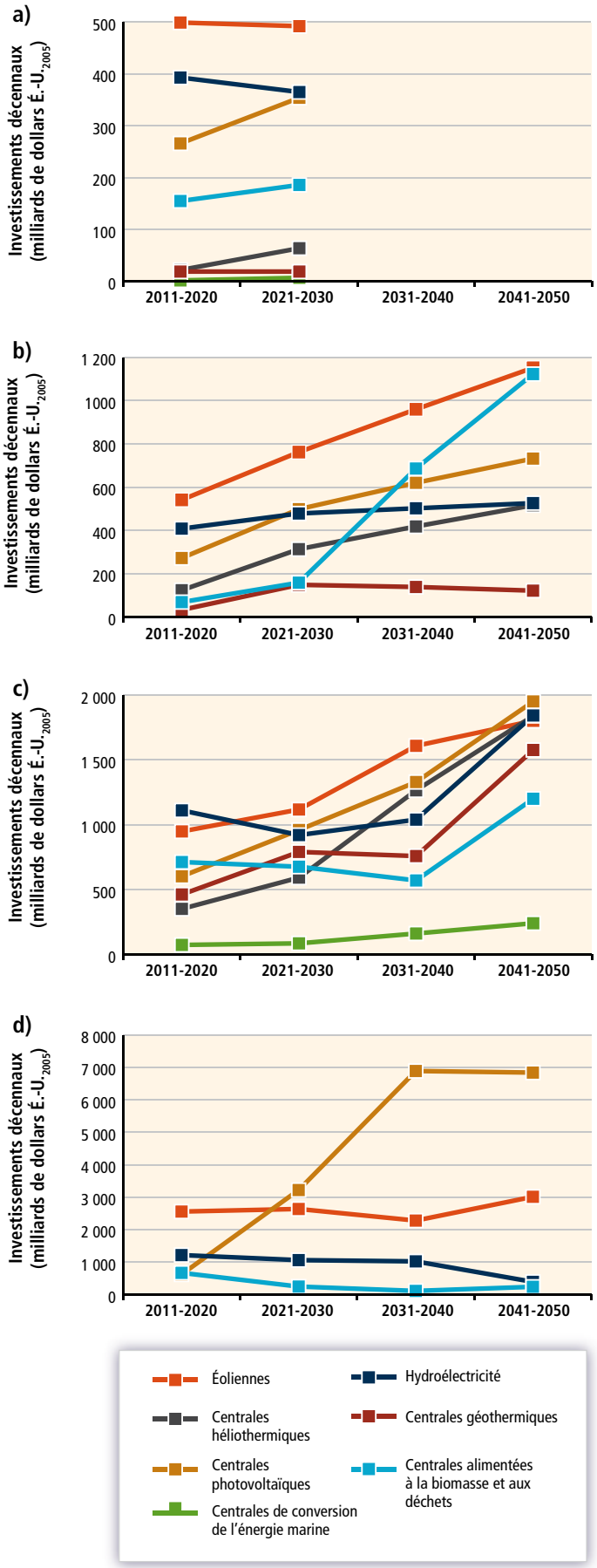


Figure TS.10.14 | Investissements décennaux mondiaux (en milliards de dollars É.-U.$_{2005}$) nécessaires pour atteindre des objectifs ambitieux en matière de protection du climat: b) MiniCam-EMF22 (meilleur scénario de dépassement 2,6 W/m^2, technologies nucléaires et de captage du carbone autorisées); c) ER-2010 (450 ppmv éqCO_2, technologies nucléaires et de captage du carbone non autorisées); et d) ReMind-RECIPE (450 ppmv CO_2, centrales nucléaires et technologies de captage du carbone autorisées). En comparaison des autres scénarios, la part de l'énergie photovoltaïque est élevée dans d), car l'énergie hélioélectrique obtenue par concentration n'a pas été prise en compte. À titre de comparaison, a) correspond au scénario de référence WEO2009 de l'AIE (sans protection du climat). Sources: a) AIE (2009); b) Calvin *et al.* (2009); c) Teske *et al.* (2010); et d) Luderer *et al.* (2009).

endogène l'apprentissage technologique. Les résultats obtenus par le biais de ces exercices de comparaison de modélisation indiquent que, dans le contexte d'objectifs climatiques ambitieux, ces investissements peuvent être souvent justifiés. [10.5.3]

Les différents scénarios examinés dans la figure TS.10.14 et d'autres études font toutefois clairement état d'une incertitude considérable quant au volume exact de ces investissements et au moment le plus propice de les faire. [10.5.4]

Les quatre scénarios analysés en détail à la section 10.3 couvrent un éventail d'investissements décennaux cumulés à l'échelle mondiale (dans le secteur de la production d'électricité) allant de 1 360 à 5 100 milliards de dollars des É.-U.$_{2005}$ (pour la décennie 2011-2020) et de 1 490 à 7 180 milliards de dollars des É.-U.$_{2005}$ (pour la décennie 2021-2030). Ces chiffres permettent d'évaluer les volumes futurs du marché et les possibilités d'investissement correspondantes. Les valeurs inférieures se réfèrent au scénario de référence World Energy Outlook 2009 de l'AIE et les valeurs plus élevées, à un scénario visant à stabiliser la concentration atmosphérique du CO_2 (seulement) à 450 ppm. Les investissements annuels moyens, selon le scénario de référence, sont légèrement inférieurs aux investissements respectifs indiqués pour 2009. De 2011 à 2020, les valeurs supérieures des moyennes annuelles des investissements dans le secteur de la production d'électricité renouvelable correspondent au triplement des investissements mondiaux actuels. Ces mêmes investissements devraient quintupler durant la décennie suivante (2021-2030). Même le niveau supérieur des investissements annuels est inférieur à 1 % du PIB mondial. Par ailleurs, l'augmentation de la puissance installée des centrales fonctionnant à l'énergie renouvelable réduira la quantité de combustibles fossiles et nucléaires qui aurait été nécessaire pour satisfaire une demande donnée d'électricité. [10.5.4]

10.6 Coûts et avantages sociaux et environnementaux

L'extraction, la conversion et l'utilisation de l'énergie ont de grandes répercussions sur l'environnement et génèrent des coûts externes considérables. Même si le fait de remplacer l'énergie fossile par une énergie renouvelable peut souvent réduire les émissions de gaz à effet de serre et aussi, dans une certaine mesure, d'autres effets environnementaux et coûts externes, les technologies ÉR peuvent elles-mêmes être à l'origine d'effets sur l'environnement et de coûts externes, selon la source d'énergie et la nature de la technologie. Il faut prendre en compte ces effets et ces coûts externes si l'on veut effectuer une évaluation détaillée des coûts. [10.6.2]

La figure TS.10.15 montre l'importance des incertitudes concernant deux catégories déterminantes de coûts externes, à savoir ceux relatifs au climat et ceux relatifs à la santé. Les petites centrales de cogénération à partir de biomasse

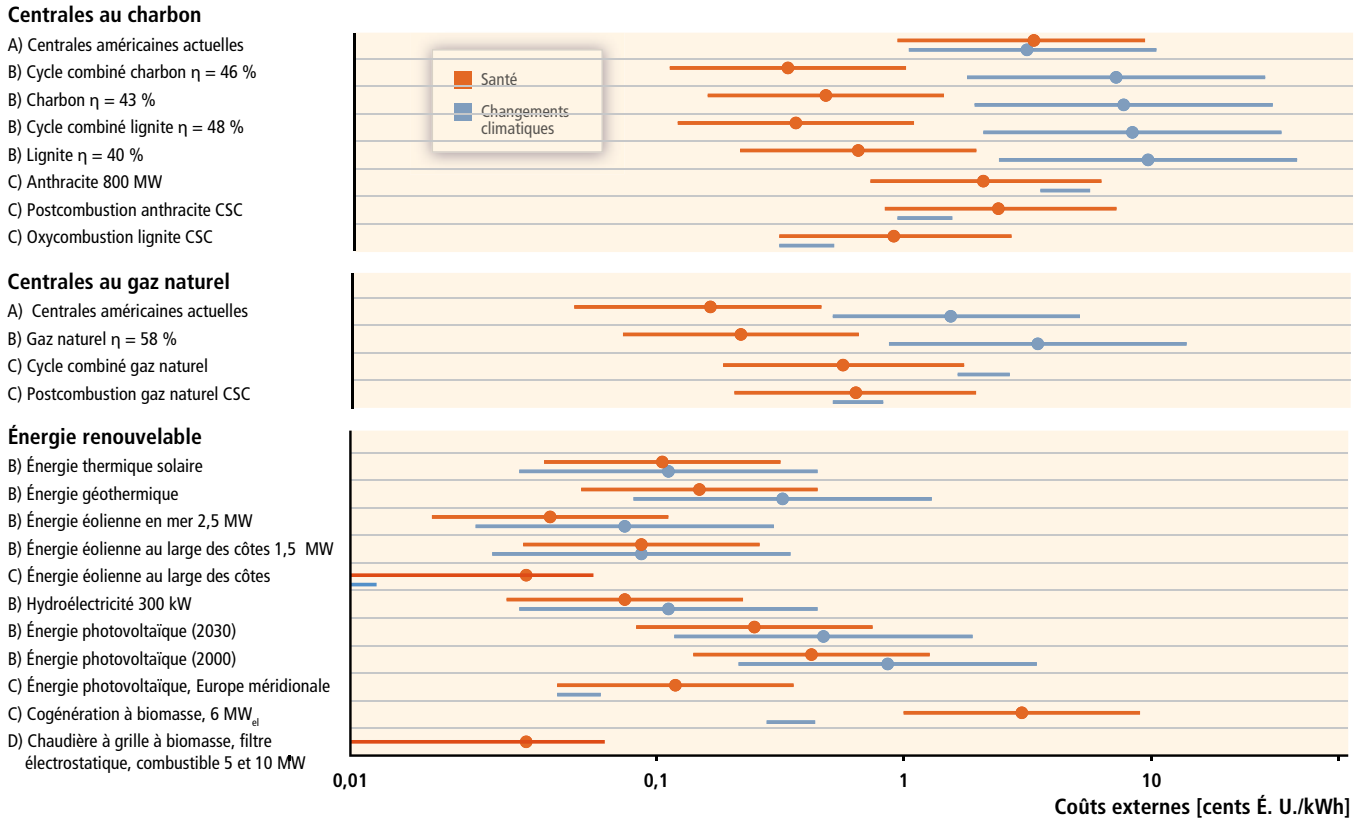


Figure TS.10.15 | Coûts externes associés au cycle de vie de la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable et d'énergie fossile. À noter l'échelle logarithmique de la figure. Les lignes bleues indiquent les fourchettes des coûts externes attribuables aux changements climatiques et les lignes rouges, les fourchettes des coûts externes associés aux effets des polluants atmosphériques sur la santé. Les coûts externes dus aux changements climatiques prédominent dans le cas des sources d'énergie fossile, en l'absence de CSC. η: facteur d'efficacité. Les résultats se fondent sur quatre études utilisant différentes hypothèses (A, B, C et D). L'incertitude concernant les coûts externes des répercussions sur la santé est estimée à un facteur de trois. [Figure 10.36]

génèrent des coûts externes relativement élevés en raison de leurs effets sur la santé provoqués par les particules émises. L'énergie éolienne au large des côtes semble engendrer les coûts externes les plus bas. Les évaluations des coûts externes associés à l'énergie nucléaire ne sont pas considérées ici, car la nature et l'évaluation des coûts externes et des risques liés au rejet de radionucléides attribuable à des accidents de faible probabilité ou à des fuites de dépôts de déchets dans un avenir éloigné diffèrent beaucoup, par exemple, des changements climatiques et de la pollution atmosphérique, qui sont pratiquement inévitables. Les effets externes de l'énergie nucléaire peuvent, toutefois, faire l'objet de débats et de prises de position au sein de la société. Les risques de décès dus à des accidents sur diverses chaînes de production d'énergie (par exemple charbon, pétrole, gaz et hydroélectricité) sont généralement plus élevés dans les pays qui n'appartiennent pas à l'OCDE que dans ceux qui en font partie. [10.6.3, 9.3.4.7]

Comme seuls les coûts externes des technologies individuelles sont illustrés à la figure TS.10.15, il est possible d'en déduire les avantages liés au remplacement d'une technologie par une autre. Les sources d'énergie renouvelable et les technologies qui les utilisent pour la production d'électricité présentent la plupart du temps des coûts externes moins importants par quantité d'électricité produite que les technologies à base de combustibles fossiles. Il faut cependant tenir compte des cas particuliers, car il peut y avoir également des exceptions. [10.6.3]

Il existe toutefois une incertitude considérable quant à l'évaluation des effets externes des sources d'énergie. L'évaluation des dommages sur le plan physique, biologique et sanitaire est aussi entachée d'une grande incertitude, et les estimations sont généralement fondées sur des modèles de calcul, dont les résultats sont souvent difficiles à valider. Les dommages ou changements ayant rarement une valeur marchande qui pourrait permettre d'estimer leurs coûts, il faut donc avoir recours à des informations indirectes ou à d'autres approches. De plus, nombre de ces dommages se produiront dans un lointain avenir ou dans des sociétés très différentes de celles qui tirent profit de la production d'énergie considérée, ce qui complique l'évaluation. Ces facteurs contribuent à l'incertitude inhérente aux coûts externes. [10.6.5]

En conclusion, le fait d'en connaître davantage sur les coûts et les avantages externes associés à l'utilisation des sources d'énergie renouvelable peut aider les sociétés à choisir les meilleures options possibles et à obtenir des gains optimaux en matière de rendement énergétique et de bien-être. [10.6.5]

11. Politiques, financement et mise en œuvre

11.1 Introduction

Les capacités en matière d'énergies renouvelables se développent rapidement à la grandeur de la planète, mais un certain nombre d'obstacles continuent d'entraver les progrès. Si l'on veut que les énergies renouvelables contribuent de manière substantielle aux efforts d'atténuation des changements climatiques, et dans les meilleurs

délais possibles, il est indispensable d'adopter diverses formes de politiques d'aide économique et de mesures visant à créer des conditions favorables. [11.1]
Les politiques de mise en valeur des énergies renouvelables ont contribué à augmenter la part de ces énergies en contribuant à abattre certains obstacles qui nuisent au développement technologique et à l'exploitation de ces ressources. Ces politiques peuvent être mises en œuvre à tous les paliers de gouvernement (local, province/État, national et international) et prendre des formes très variables allant d'activités de recherche-développement de base pour l'élaboration des technologies au soutien de systèmes ÉR installés ou de l'électricité, de la chaleur ou des combustibles qu'ils produisent. Dans certains pays, des organismes de réglementation et des entreprises de services publics peuvent être chargés ou se chargent de leur propre initiative de concevoir et mettre en œuvre des mécanismes d'appui à la mise en valeur des énergies renouvelables. Les acteurs non gouvernementaux, comme les organisations internationales et les banques de développement, ont également un rôle décisif à jouer. [1.4, 11.1, 11.4, 11.5]

Les énergies renouvelables peuvent être mesurées par le biais d'autres critères, tels que le délai et la fiabilité de livraison (disponibilité) et d'autres paramètres relatifs à l'intégration des ÉR dans les réseaux. Les gouvernements et d'autres parties prenantes peuvent également s'employer activement à créer des conditions favorables à la mise en valeur de ces énergies. [11.1, 11.6]

11.1.1 Rôle des politiques en matière d'énergies renouvelables par rapport aux politiques climatiques

Les énergies renouvelables peuvent apporter de nombreux avantages aux sociétés. Certaines technologies ÉR sont déjà assez compétitives au regard des prix actuels de l'énergie sur le marché. Et parmi celles qui ne le sont pas encore, un bon nombre peuvent constituer une option intéressante dans certaines circonstances. Dans la plupart des régions du monde, il reste encore à mettre en place des mesures visant à faciliter la mise en valeur des énergies renouvelables. [11.1, 10.5]

Les politiques climatiques (taxes sur le carbone, échange de droits d'émissions ou politiques de réglementation) permettent d'abaisser les coûts relatifs des technologies pauvres en carbone par rapport aux technologies à forte intensité de carbone. On peut se demander toutefois si ces politiques (par exemple la tarification du carbone) sont en mesure à elles seules de promouvoir suffisamment les énergies renouvelables pour satisfaire les objectifs plus vastes établis à leur propos sur le plan environnemental, économique et social. [11.1.1]

Deux défaillances du marché justifient un soutien complémentaire des technologies ÉR novatrices à fort potentiel de développement technologique, même s'il existe un marché des émissions (ou une politique générale de tarification des gaz à effet de serre). La première se rapporte aux coûts externes des émissions de gaz à effet de serre, tandis que la seconde concerne le domaine de l'innovation: si des entreprises sous-estiment les avantages futurs des investissements dans l'apprentissage des technologies ÉR ou si elles ne peuvent tirer profit de ces avantages, elles n'investiront pas de manière optimale d'un point de vue macroéconomique. Outre les politiques de tarification des gaz à effet de serre, il peut être utile, sur le plan économique, d'adopter des politiques spécifiques aux énergies renouvelables si l'on tient compte des opportunités connexes de développement technologique (ou si l'on s'est fixé d'autres objectifs que l'atténuation des effets des changements climatiques). Il faudrait prendre en compte les conséquences potentiellement néfastes, comme l'effet de blocage, les fuites de carbone et les effets de rebond lors de l'élaboration d'un éventail de politiques. [11.1.1, 11.5.7.3]

11.1.2 Synchronisation et vigueur des politiques

La synchronisation, la vigueur et le niveau de coordination des politiques de recherche-développement par rapport aux politiques de mise en valeur influent de trois façons sur l'efficience et l'efficacité des politiques et sur leur coût total pour la société: 1) lorsqu'un pays favorise immédiatement la mise en valeur des énergies renouvelables ou qu'il attend que les coûts soient encore plus bas; 2) une fois qu'un pays a décidé de promouvoir les énergies renouvelables, la synchronisation, la vigueur et la coordination concernant le passage des politiques de recherche-développement aux politiques de mise en valeur; et 3) les coûts et avantages d'une mise en œuvre accélérée ou plus lente des politiques axées sur la demande du marché. Quant au premier cas, si l'on veut parvenir à une pleine compétitivité avec les technologies à base de combustibles fossiles, il est nécessaire de procéder à des investissements initiaux importants jusqu'à ce que le point d'équilibre soit atteint. Le moment de réaliser ces investissements varie selon l'objectif poursuivi. Si la communauté internationale cherche à stabiliser la hausse de la température à la surface du globe à 2 °C, il faut alors commencer sans tarder à investir dans les technologies pauvres en carbone.

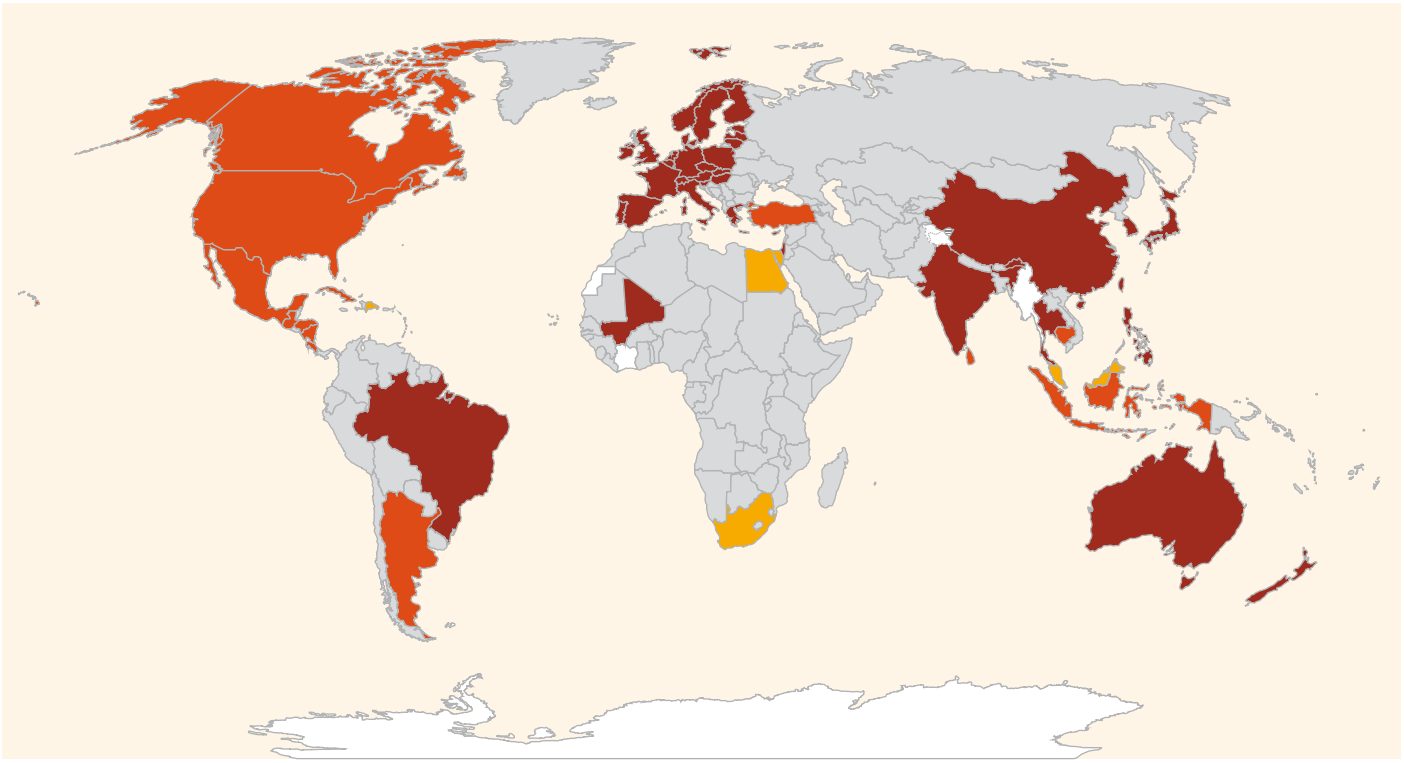
11.2 Tendances actuelles sur le plan des politiques, du financement et des investissements

Ces dernières années, on a observé un développement considérable des technologies ÉR grâce à l'adoption d'un nombre accru de politiques de diverses natures. Jusqu'au début des années 1990, peu de pays avaient mis en place des politiques de promotion des énergies renouvelables. Depuis lors, et en particulier depuis la période comprise entre le commencement et le milieu des années 2000, des politiques de ce type ont été adoptées dans un nombre grandissant de pays à l'échelon municipal, provincial (ou des États) et national ainsi qu'au niveau international (voir la figure TS.11.1). [1.4, 11.1, 11.2.1, 11.4, 11.5]

Au départ, il s'agissait surtout de mesures prises par des pays développés, mais de plus en plus de pays en développement ont établi des cadres pour les politiques destinées à promouvoir les ÉR, à divers paliers de gouvernement, depuis la fin des années 1990 et le début des années 2000. Parmi les pays ayant mis en œuvre, au début de 2010, des politiques favorisant la production d'électricité à partir d'ÉR, environ la moitié étaient des pays en développement de toutes les régions du globe. [11.2.1]

La plupart des pays qui disposent de ce type de politiques ont mis en place plusieurs sortes de mécanismes, et beaucoup de politiques et d'objectifs ont été renforcés avec le temps. Outre les politiques nationales, on observe aussi une augmentation du nombre des politiques et partenariats internationaux. Dans le monde entier, plusieurs centaines d'administrations municipales et locales se sont fixé des objectifs ou ont adopté des politiques et autres mécanismes pour favoriser la mise en valeur des ÉR. [11.2.1]

2005



Début 2011

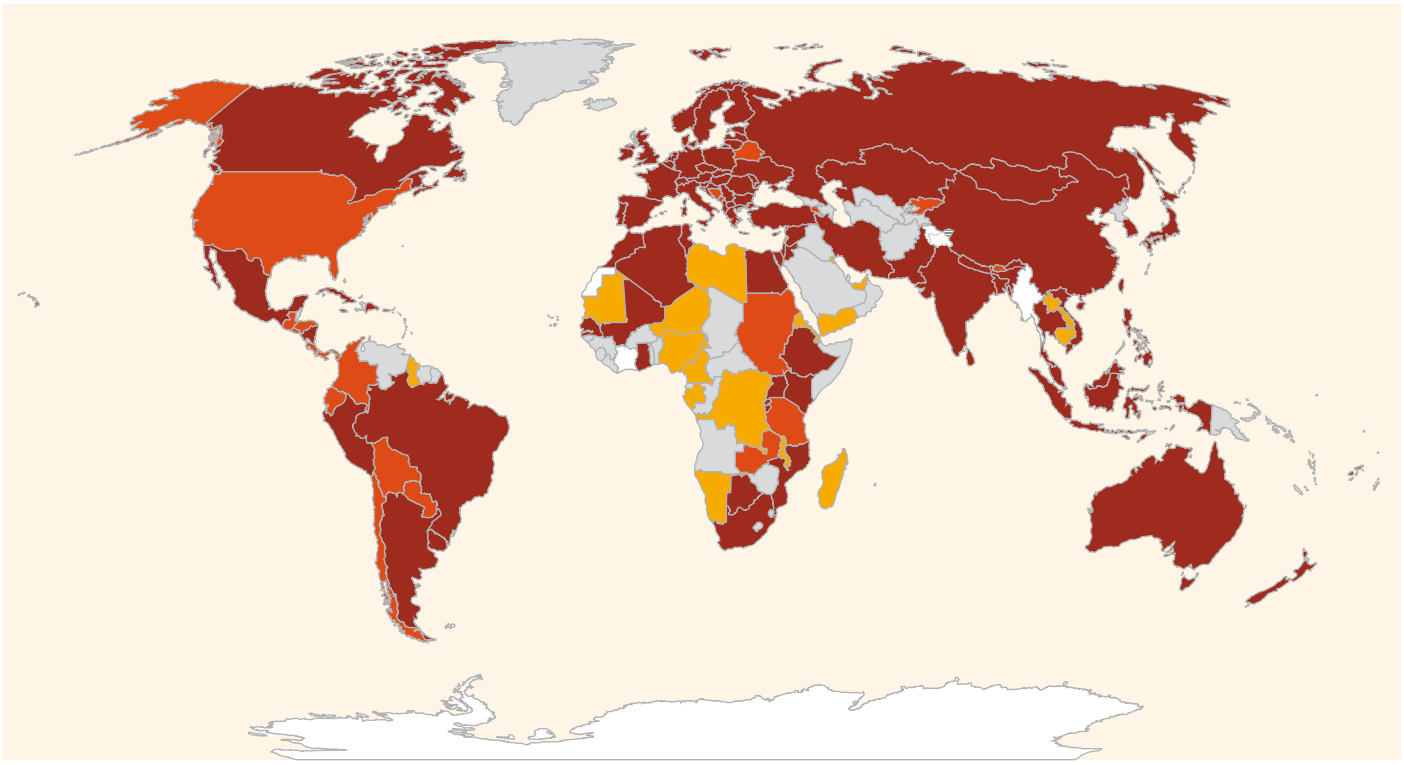


Figure TS.11.1 | Pays s'étant dotés d'au moins une politique et/ou s'étant fixé au moins un objectif en matière d'énergies renouvelables, vers le milieu de 2005 et au début de 2011. Cette figure ne rend compte que des politiques et objectifs au niveau national (et non des politiques et objectifs au niveau municipal ou à celui des provinces ou des États) et n'est pas nécessairement exhaustive. [Figure 11.1]

D'abord presque entièrement centrées sur l'électricité, les politiques ÉR englobent de plus en plus les secteurs du chauffage et refroidissement et des transports. Cette évolution s'accompagne d'un succès accru de la mise au point d'une série de technologies ÉR et des activités de fabrication et de mise en œuvre associées (voir les chapitres 2 à 7), ainsi que d'une progression rapide des investissements annuels dans les énergies renouvelables et de la diversification des organismes de financement, notamment depuis 2004-2005. [11.2.2]

Eu égard à ce cadre pour l'action de plus en plus favorable, le secteur des énergies renouvelables dans son ensemble a connu une forte progression des investissements depuis 2004 2005. Le financement concerne ce qu'on appelle le «continuum» ou les différentes phases du développement technologique, à savoir: 1) la phase de recherche-développement; 2) l'élaboration et la commercialisation des technologies; 3) la fabrication et la vente du matériel; 4) la mise en œuvre du projet; et 5) le refinancement et la vente des entreprises, principalement par fusion et acquisition. Le financement n'a cessé d'augmenter dans chacune de ces phases, donnant des indications sur le développement actuel et prévu du secteur, comme suit: [11.2.2]

- Les tendances observées au niveau 1) du financement des activités de recherche-développement et 2) des investissements technologiques constituent un indicateur des perspectives à long et moyen terme pour le secteur, les investissements réalisés ne commençant à porter leurs fruits que plusieurs années après, lorsque la technologie est pleinement commercialisée. [11.2.2.2, 11.2.2.3]
- Les tendances observées au niveau 3) des investissements dans la fabrication et la vente du matériel requis constituent un indicateur des perspectives à court terme, qui consistent essentiellement en une poursuite de la hausse de la demande sur le marché. [11.2.2.4]
- Les tendances observées au niveau 4) des investissements consacrés à la mise en œuvre des projets sont un indicateur de l'activité actuelle du secteur, et notamment de la mesure dans laquelle l'internalisation des coûts associés aux gaz à effet de serre peut mobiliser de nouveaux fonds pour les projets ÉR. [11.2.2.5]
- Les tendances observées au niveau 5) des fusions et acquisitions peuvent refléter la maturité générale du secteur, l'accroissement des activités de refinancement avec le temps indiquant que de gros investisseurs, plus conventionnels, sont en train de s'intéresser au secteur et achètent des entreprises qui ont réussi à la suite d'investissements précoces. [11.2.2.6]

11.3 Éléments moteurs clés, opportunités et avantages

Les énergies renouvelables peuvent offrir un grand nombre d'avantages aux sociétés. Outre la réduction des émissions de CO_2, les gouvernements ont adopté des politiques visant à satisfaire un certain nombre d'objectifs, notamment l'amélioration de la protection de l'environnement et de la santé à l'échelle locale; un meilleur accès à l'énergie, en particulier en milieu rural; la promotion de la sécurité énergétique par la diversification des technologies et des ressources; et la contribution au développement social et économique grâce à la création d'emplois et à la stimulation de la croissance économique. [11.3.1–11.3.4]

L'importance relative des éléments moteurs pour la mise en valeur des énergies renouvelables varie d'un pays à l'autre, et peut varier avec le temps. L'accès à l'énergie a été décrit comme le principal élément moteur dans les pays en développement, tandis que la sécurité énergétique et les questions d'environnement préoccupent davantage les pays développés. [11.3]

11.4 Obstacles à l'adoption de politiques en matière d'énergies renouvelables, à leur mise en œuvre et à leur financement

Les politiques en matière d'énergies renouvelables visent à accroître la part de ces énergies en contribuant à surmonter les divers obstacles au développement technologique et à la mise en valeur des ÉR. Des obstacles spécifiques à l'élaboration et à la mise en œuvre de ces politiques et au financement des projets connexes (par exemple des défaillances du marché) peuvent nuire encore plus à la mise en valeur des énergies renouvelables. [1.4, 11.4]

Les principaux obstacles en ce qui concerne l'élaboration et l'adoption des politiques sont les suivants: manque d'information et de sensibilisation au sujet des ressources, des technologies et des politiques possibles; mauvaise compréhension de la meilleure façon de concevoir les politiques ou de la façon de procéder à des transitions énergétiques; difficultés associées à la quantification et à l'internalisation des coûts et avantages externes; et effet de blocage des technologies et politiques actuelles. [11.4.1]

Les obstacles à la mise en œuvre des politiques comprennent notamment les divergences avec les règlements existants; les pénuries d'ouvriers spécialisés; et/ou le manque de capacité institutionnelle pour appliquer les politiques. [11.4.2]

Les obstacles au financement incluent la sensibilisation insuffisante des financiers et l'absence d'informations pertinentes communiquées en temps opportun; les questions relatives à la structure financière et à l'échelle des projets; les questions relatives aux limites concernant les expériences passées; et, dans certains pays, les faiblesses institutionnelles, notamment au niveau des marchés financiers et de l'accès à un financement abordable, tous ces facteurs augmentant le risque perçu et, par le fait même, les coûts et/ou rendant plus difficile la mobilisation de fonds pour les projets. Et surtout, de nombreuses technologies ÉR ne sont pas encore compétitives sur le plan économique au regard des prix actuels de l'énergie sur le marché, ce qui décourage les investisseurs en l'absence de diverses formes d'appui sur le plan des politiques et limite évidemment les apports de fonds. [11.4.3]

11.5 Expérience concernant les options en matière de politiques et évaluation

Il existe de nombreuses politiques susceptibles de promouvoir les technologies ÉR, depuis les phases initiales de démonstration et de précommercialisation jusqu'à celles de la maturité et de la mise en valeur à grande échelle. Cela comprend les politiques publiques de recherche-développement (soutien de l'offre) pour faire progresser les technologies ÉR et les politiques de mise en valeur (soutien de la demande) visant à créer un marché pour ces technologies. Les politiques peuvent être regroupées de différentes façons, et il n'existe aucune liste reconnue à l'échelle mondiale des politiques ou des catégories de politiques possibles pour les ÉR. À des fins de simplification, les politiques de recherche-développement et de mise en valeur ont été réparties dans les catégories suivantes: [11.5]

- **Incitations fiscales:** les acteurs (particuliers, ménages, entreprises) se voient accorder une réduction de leur contribution au trésor public, par l'intermédiaire de l'impôt sur le revenu ou d'autres impôts, ou bénéficient de déductions ou subventions;
- **Financement public:** soutien public pour lequel un rendement financier est prévu (prêts, participation) ou un engagement financier est assumé (garantie);
- **Réglementation:** ensemble de règles visant à orienter ou contrôler le comportement des personnes ou entités concernées.

Même si les objectifs constituent un élément central des politiques, les politiques en vigueur n'ont pas nécessairement besoin d'objectifs spécifiques pour être menées à bien. Par ailleurs, des objectifs non assortis de politiques pour les réaliser ont peu de chance d'être satisfaits. [11.5]

La réussite des instruments de politique repose sur leur capacité d'atteindre les objectifs ou de respecter les critères établis, notamment pour ce qui concerne:

- **l'efficacité:** mesure dans laquelle les objectifs visés sont atteints;
- **l'efficience:** rapport des résultats obtenus aux moyens mis en œuvre ou rapport entre les objectifs atteints en matière d'énergies renouvelables et les ressources économiques investies;
- **l'équité:** incidence et conséquences distributives d'une politique;
- **la faisabilité institutionnelle:** mesure dans laquelle un instrument de politique est perçu comme légitime, est susceptible d'être accepté de plus en plus largement et peut être adopté et mis en œuvre, y compris la capacité de mettre en œuvre une politique une fois que celle-ci a été conçue et adoptée. [11.5.1]

La plus grande partie des publications examinées se centrent sur l'efficacité et l'efficience des politiques. Les éléments des diverses options en matière de politiques font qu'elles sont plus ou moins à même de respecter les divers critères, et la façon dont ces politiques sont conçues et mises en œuvre peut par ailleurs déterminer la manière dont elles respectent les critères en question. Le choix des politiques et les particularités de leur conception dépendront en fin de compte des objectifs et priorités des décideurs. [11.5.1]

11.5.1 Politiques de recherche-développement en matière d'énergies renouvelables

La recherche-développement, l'innovation, la diffusion et la mise en valeur de nouvelles technologies pauvres en carbone offrent des avantages pour les sociétés qui vont au-delà de ceux dont peuvent profiter les instigateurs des projets, ce qui a pour effet de créer une situation de sous-investissement. Les projets gouvernementaux de recherche-développement peuvent jouer un rôle capital dans le développement des technologies ÉR. Tous les pays n'ont pas les moyens de mobiliser des fonds publics au profit de la recherche-développement, mais, dans la majorité des pays où ce type d'intervention est possible, les initiatives publiques dans ce domaine peuvent améliorer les performances des technologies naissantes, de manière à satisfaire la demande des utilisateurs initiaux, et peuvent également renforcer les technologies déjà commercialisées. [11.5.2]

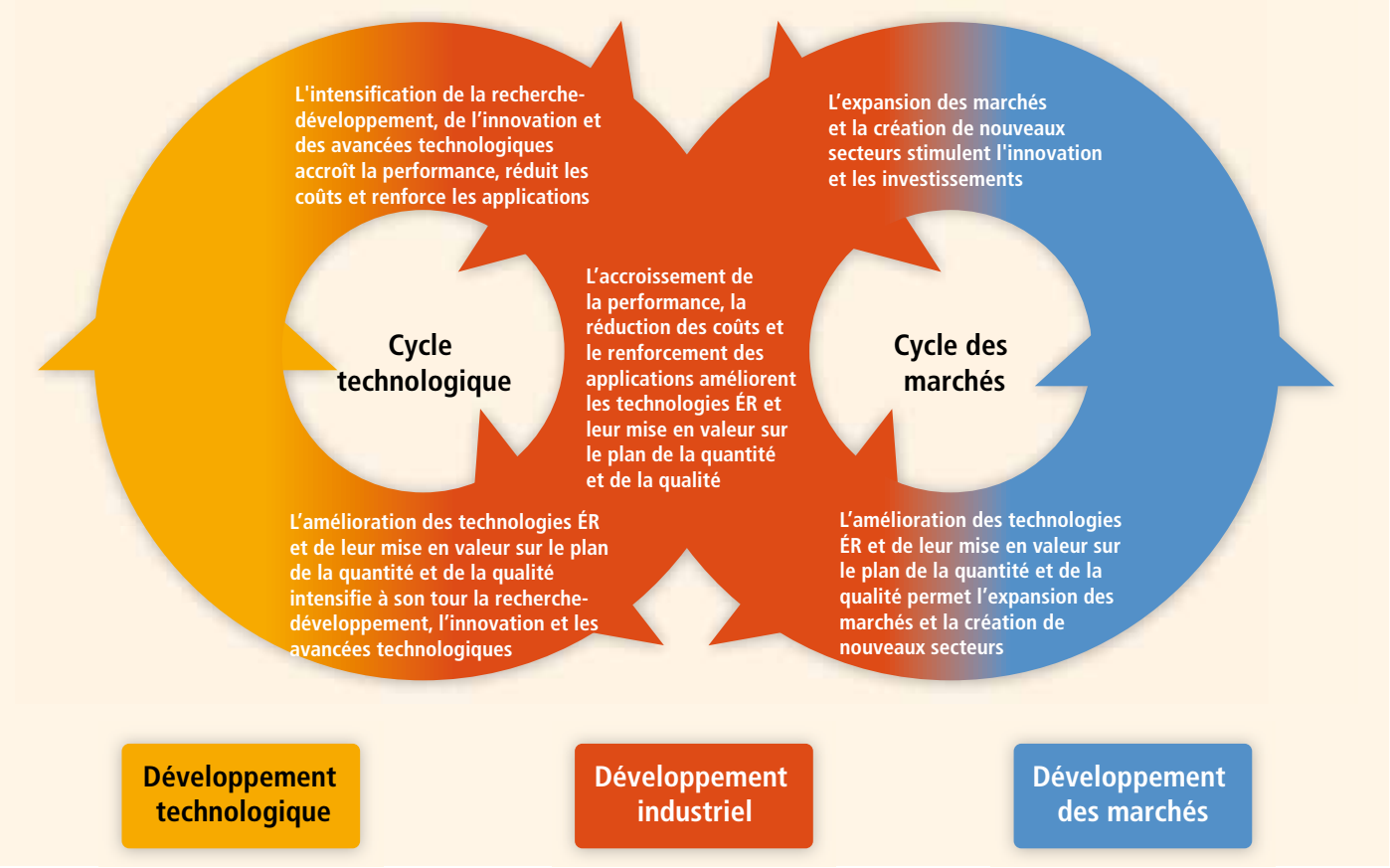


Figure TS.11.2 | Les cycles mutuellement stimulants du développement technologique et du développement des marchés conduisent à la réduction des coûts technologiques. [Figure 11.5]

Les politiques gouvernementales en la matière comprennent les incitations fiscales, comme le financement de la recherche-développement au niveau universitaire, les subventions, les récompenses, les crédits d'impôt et l'utilisation des centres de recherche publics; ainsi que le financement public, notamment les prêts consentis à des conditions avantageuses ou les emprunts convertibles, les participations en capital public et les fonds publics de capital risque. Les investissements dans le domaine de la recherche-développement touchent une grande diversité d'activités dans le cycle de vie du développement d'une technologie, allant de la cartographie des ressources énergétiques renouvelables à l'amélioration des technologies ÉR commercialisées. [11.5.2]

La réussite de ces politiques de recherche-développement repose sur un certain nombre de facteurs, dont quelques-uns ont été clairement définis, alors que d'autres continuent de faire l'objet de débats dans les publications. Le succès dans ce domaine ne peut se résumer uniquement au montant total de financement obtenu. La régularité du financement d'une année à l'autre est également essentielle. Un programme de recherche-développement discontinu n'est pas favorable à l'apprentissage technique, et l'apprentissage ainsi que la réduction des coûts sont fonction de la continuité, de l'engagement et de l'organisation des efforts déployés, de la destination des fonds et de la façon dont ils sont utilisés, tout autant que de l'ampleur des moyens mis en œuvre. On se pose parfois la question, dans la documentation, de l'approche la plus fructueuse pour les politiques de recherche-développement dans la durée, à savoir le «bricolage» (progrès via la recherche visant à des améliorations progressives) ou la percée (progrès technologiques spectaculaires), avec des arguments en faveur de l'une ou l'autre de ces options ou d'une combinaison des deux. L'expérience a montré qu'il est important que les subventions accordées à la recherche-développement (et aux étapes suivantes) soient envisagées en prévoyant une «stratégie de sortie», de sorte que les subventions soient graduellement éliminées à mesure que la technologie est commercialisée, de manière à assurer la fonctionnalité et la viabilité du secteur. [11.5.2.3]

L'un des résultats les plus intéressants, tiré de la documentation théorique et d'études de cas technologiques, est que les investissements dans la recherche-développement sont plus efficaces lorsqu'ils sont assortis d'autres instruments d'intervention, et notamment de politiques qui visent à renforcer simultanément la demande de nouvelles technologies ÉR. Des politiques de mise en valeur adoptées de manière relativement précoce lors de la phase de mise au point des technologies accélèrent l'apprentissage, que ce soit par le biais de la recherche-développement ou de l'utilisation (à la suite de la fabrication du matériel), et la réduction des coûts. Appliquées conjointement, les politiques de recherche-développement et de mise en valeur créent un cycle de rétroaction positive, favorisant les investissements du secteur privé dans la recherche-développement (voir la figure TS.11.2). [11.5.2.4]

11.5.2 Politiques de mise en valeur

Les moyens d'action mis en place pour promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables sont variés et peuvent s'appliquer à tous les secteurs de l'énergie. Ils comprennent les incitations fiscales (subventions, sommes allouées pour la production d'énergie, escomptes, crédits d'impôt, réductions et exonérations fiscales, amortissement variable ou accéléré); le financement public (investissements en actions, garanties, prêts, acquisitions publiques); et les réglementations (quotas, appels d'offres/soumissions, tarifs d'alimentation, étiquetage écologique et achat d'énergie verte, facturation nette, accès prioritaire ou garanti, répartition prioritaire). Alors que les réglementations et leurs incidences varient significativement d'un secteur d'utilisation finale à l'autre, les incitations fiscales et le financement public s'appliquent généralement à tous les secteurs. [11.5.3.1]

Les incitations fiscales sont susceptibles de réduire les coûts et les risques de l'investissement dans les énergies renouvelables, en réduisant les coûts d'investissement initiaux associés à l'installation, en diminuant les coûts de production ou en augmentant les sommes allouées pour l'énergie renouvelable produite. Par ailleurs, les incitations fiscales compensent les diverses défaillances du marché, qui rendent les énergies renouvelables moins compétitives que les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire, et contribuent à réduire la charge financière que représente l'investissement dans ces énergies. [11.5.3.1]

Les incitations fiscales sont généralement plus efficaces lorsqu'elles sont combinées à d'autres types de politiques. Les incitations qui subventionnent la production sont généralement préférables aux subventions à l'investissement, parce qu'elles privilégient le résultat attendu, c'est-à-dire la production d'énergie. Il convient toutefois d'adapter les politiques en fonction des différentes technologies et de leurs degrés de maturité respectifs. En effet, les subventions à l'investissement peuvent se révéler utiles lorsqu'une technologie est encore relativement coûteuse ou qu'elle est exploitée à petite échelle (par exemple, les panneaux solaires de toiture), surtout si ces subventions sont combinées à des normes et des certifications techniques pour assurer la qualité des installations. L'expérience acquise avec les politiques concernant l'énergie éolienne suggère que les paiements et remises en phase de production pourraient être préférables aux crédits d'impôt, parce que les avantages de ces paiements et remises sont équivalents, quel que soit le niveau de revenu de leurs bénéficiaires, et qu'ils favorisent ainsi un investissement et une utilisation accrus. Et comme ces mesures interviennent généralement au moment de l'achat ou de la production ou à peu près, elles se traduisent par une progression plus régulière de la croissance avec le temps (au lieu de la tendance à investir massivement vers la fin d'une période fiscale). Les incitations fiscales ont toujours eu tendance à favoriser la promotion des technologies les plus avancées et les moins coûteuses. Quant aux crédits d'impôt, ils sont habituellement plus efficaces dans les pays qui disposent de nombreuses entreprises privées rentables, qui paient des impôts et qui sont donc en mesure d'en bénéficier. [11.5.3.1]

Les mécanismes de financement public servent un double objectif : mobiliser directement ou stimuler les investissements commerciaux dans des projets à base d'énergie renouvelable et créer indirectement des marchés de plus grande envergure et commercialement viables pour ces technologies. En plus des politiques de financement public traditionnelles, telles que les prêts consentis à des conditions avantageuses et les garanties, un certain nombre de mécanismes novateurs émergent à divers échelons gouvernementaux, y compris au niveau municipal. On citera notamment le financement de projets d'énergie renouvelable par des prêts à long terme aux propriétaires, qui permettent un remboursement aligné sur les économies d'énergie (par exemple, le Property Assessed Clean Energy en Californie), et le «recyclage» des fonds publics pour divers projets (comme le financement de projets ÉR avec les fonds économisés grâce à l'amélioration du rendement énergétique). [11.5.3.2]

Les acquisitions publiques de technologies ÉR et de systèmes d'approvisionnement en énergie renouvelable sont un moyen bien connu mais peu utilisé de stimuler le marché des énergies renouvelables. Les gouvernements peuvent soutenir le

développement de ces énergies en s'engageant à en acheter pour satisfaire leurs propres besoins ou en encourageant les consommateurs à privilégier les options fondées sur une énergie propre. Les possibilités qu'offre cette approche sont considérables: dans la plupart des pays, ce sont les gouvernements qui consomment le plus d'énergie, et la plus grande part des dépenses publiques y est consacrée. [11.5.3.2]

Les politiques de réglementation comprennent les politiques axées sur les quantités et sur les prix, telles que les quotas et les tarifs d'alimentation; les aspects qualitatifs et les mesures incitatives ; ainsi que les instruments de promotion de l'accès, comme la facturation nette. Les politiques axées sur les quantités fixent les quantités à atteindre et laissent les marchés déterminer les prix, tandis que les politiques axées sur les prix fixent les prix et laissent les marchés déterminer les quantités. On peut recourir aux politiques axées sur les quantités dans les trois secteurs d'utilisation finale sous forme d'obligations ou de mandats. Les incitations qualitatives comprennent les programmes d'achat d'énergie verte et d'étiquetage écologique (parfois mandatés par les pouvoirs publics), qui permettent de renseigner les consommateurs sur la qualité des produits énergétiques, afin de les aider à prendre des décisions avisées et de stimuler la demande d'énergies renouvelables. [11.5.3.3]

Politiques de mise en valeur: électricité

À ce jour, on a adopté beaucoup plus de politiques de promotion des énergies renouvelables dans le domaine de la production d'électricité que dans ceux du chauffage/refroidissement ou des transports. Parmi ces politiques figurent les incitations fiscales et le financement public destinés à stimuler les investissements dans l'électricité renouvelable et sa production, ainsi que diverses politiques de réglementation. Bien que les pouvoirs publics aient recours à un large éventail de politiques pour promouvoir l'électricité renouvelable, les plus courantes sont celles fondées sur les tarifs d'alimentation, les quotas et les normes relatives aux sources d'énergie renouvelable. [11.5.4]

Les politiques axées sur les quantités (quotas, normes relatives aux sources d'énergie renouvelable et politiques d'appels d'offres) et les politiques axées sur les prix (tarifs d'alimentation à prix fixe et à prix élevé), surtout les quotas et les tarifs d'alimentation, font l'objet d'une documentation abondante qui s'attache à évaluer leur efficience et leur efficacité. Dans le passé, un certain nombre d'études, y compris celles menées pour la Commission européenne, ont conclu que des tarifs d'alimentation bien conçus et bien appliqués constituaient à ce jour les mesures de promotion les plus efficientes (si l'on compare l'aide totale reçue et les coûts de production) et les plus efficaces (capacité d'augmenter la part d'électricité renouvelable consommée). [11.5.4]

L'une des principales raisons du succès des tarifs d'alimentation bien appliqués est qu'ils garantissent généralement une grande sécurité des investissements en raison de la combinaison de paiements à prix fixes à long terme, d'un raccordement au réseau et d'un accès garanti au réseau pour toute la production. Des tarifs d'alimentation bien conçus encouragent, par ailleurs, la diversité aussi bien technologique que géographique et assurent mieux la promotion de projets de différentes envergures. L'efficacité et la viabilité de ce type de mesure reposent souvent sur la plupart, voire la totalité, des facteurs ci-après: [11.5.4.3]

- Obligation d'achat par les entreprises de services publics;
- Accès et répartition prioritaires;
- Tarifs fondés sur le coût de production et adaptés au type de technologie et à l'envergure du projet, avec des valeurs initiales soigneusement calculées;
- Évaluations régulières de la conception à long terme et réajustements périodiques du niveau de paiement à court terme, conjugués à des modifications progressives des lois afin de refléter l'évolution des technologies et du marché, en vue d'encourager l'innovation et les progrès technologiques et de maîtriser les dépenses;

- Tarifs pour tous les producteurs potentiels, y compris les entreprises de services publics;
- Tarifs garantis sur une durée suffisamment longue pour assurer un taux de rendement approprié;

- Coûts intégrés dans la base tarifaire et répartis de manière égale dans l'ensemble du pays ou de la région;
- Normes et procédures de raccordement claires pour l'attribution des coûts du transport et de la distribution;
- Simplification des procédures administratives et des processus d'application;
- Accent mis sur les groupes exemptés privilégiés, par exemple les grands utilisateurs, pour des raisons de compétitivité, ou les clients vulnérables, comme les consommateurs à faible revenu.

L'expérience acquise dans plusieurs pays démontre que les systèmes de quotas peuvent être très efficaces et permettre d'atteindre les niveaux de conformité voulus si les certificats ÉR sont délivrés en accord avec des politiques bien conçues, au moyen de contrats à long terme qui atténuent, voire éliminent, l'instabilité des prix et qui réduisent les risques. Mais comme ce sont les technologies les mieux maîtrisées et les moins coûteuses qui en bénéficient le plus, il est possible de remédier à ce problème en distinguant différentes options d'énergie renouvelable ou en les associant avec d'autres incitations. Les mécanismes axés sur les quantités qui sont les plus efficients et efficaces comprennent souvent la plupart, voire la totalité, des éléments ci-après, en particulier ceux qui contribuent à minimiser les risques: [11.5.4.3]

- Application à un vaste segment du marché (quotas seulement);
- Règles d'admissibilité clairement définies, notamment celles qui concernent les ressources et les acteurs (quotas et appels d'offres);
- Bon équilibre entre l'offre et la demande, l'accent étant clairement mis sur les nouvelles capacités; les quotas devraient dépasser l'offre existante, mais pouvoir être atteints à un coût raisonnable (quotas seulement);
- Contrats à long terme/obligations d'achat spécifiques et échéances, sans intervalle de temps entre un quota et le suivant (quotas seulement);
- Sanctions appropriées pour non-respect des dispositions, et application adéquate de ces sanctions (quotas et appels d'offres);
- Objectifs à long terme, d'au moins 10 ans (quotas seulement);
- Établissement de créneaux technologiques spécifiques pour assurer un soutien différencié (quotas et appels d'offres);
- Paiements minimaux pour assurer un rendement et un financement appropriés (quotas et appels d'offres).

La facturation nette permet aux petits producteurs de «vendre» au prix de détail au sein du réseau toute l'énergie renouvelable qu'ils produisent en plus de leur demande totale en temps réel, à condition que ce surplus soit compensé par une charge excédentaire pour les clients à d'autres moments de la période de compensation définie. Il s'agit là d'un outil à faible coût et facile à gérer pour motiver les clients à investir dans l'électricité distribuée à petite échelle et pour l'intégrer au réseau, tout en encourageant les fournisseurs par l'amélioration des facteurs de charge, si l'électricité renouvelable est produite pendant les périodes

de demande maximale. Toutefois, utilisée seule, cette mesure ne suffit généralement pas à engendrer un développement notable des technologies moins concurrentielles, comme les systèmes photovoltaïques, du moins là où les coûts de production sont plus élevés que les prix de détail. [11.5.4]

Politiques de mise en valeur: chauffage et refroidissement

Un nombre croissant de gouvernements proposent des incitations et des mandats pour assurer la mise en valeur des technologies de chauffage et refroidissement à partir d'énergies renouvelables. La promotion de ces technologies constitue un défi unique pour les décideurs, en raison de la nature souvent distribuée de la production de chaleur. Les services de chauffage et de refroidissement peuvent être fournis à l'aide d'installations de petite à moyenne échelle pour un seul logement ou au moyen d'applications à grande échelle pour assurer un chauffage ou un refroidissement urbain. Les instruments d'intervention concernant le chauffage et le refroidissement au moyen d'ÉR doivent prendre spécifiquement en compte les caractéristiques très hétérogènes des ressources, notamment leur échelle très variable, leur capacité inégale de fournir diverses valeurs de température, la demande fortement répartie, la relation avec la charge thermique, la variabilité de l'utilisation et l'absence d'un mécanisme central de livraison ou de commercialisation. [11.5.5]

Le nombre des politiques de promotion des sources de chauffage/refroidissement à base d'énergie renouvelable a augmenté ces dernières années, provoquant ainsi une hausse de la production. La majorité des mécanismes d'aide étaient toutefois centrés principalement sur le chauffage. Les politiques en vigueur visant à promouvoir les systèmes de chauffage utilisant une énergie renouvelable comprennent les incitations fiscales, comme les escomptes et les subventions, et les réductions et crédits d'impôt; le financement public, notamment sous forme de prêts; les dispositions réglementaires, comme les obligations d'utilisation; et les activités d'information. [11.5.5.1–11.5.5.3, 11.6]

Jusqu'à présent, les incitations fiscales ont été la méthode la plus employée, en particulier les subventions. Les crédits d'impôt accordés après l'installation d'un système de chauffage (c'est-à-dire à titre rétroactif) peuvent être avantageux sur le plan logistique par rapport, en particulier, aux subventions qui nécessitent une approbation préalable avant l'installation, même si l'expérience est limitée dans ce domaine. Les mécanismes réglementaires, comme les obligations d'utilisation et les quotas, ont suscité un intérêt croissant en raison de leur capacité de stimuler le développement des systèmes de chauffage ÉR indépendamment des budgets publics, même si l'on manque d'information concrète à ce sujet. [11.5.5]

Comme dans le cas de l'électricité et des transports renouvelables, les politiques relatives au chauffage/refroidissement au moyen d'ÉR seront mieux adaptées aux circonstances ou aux emplacements si, dans leur conception, on accorde l'importance voulue au degré de maturité de la technologie considérée ainsi que des marchés et des chaînes d'approvisionnement existants. Les incitations à la production sont jugées plus efficaces pour les gros systèmes de chauffage/refroidissement, comme les réseaux de chauffage urbain, que pour les petites installations distribuées de production de chaleur ou de froid sur place, pour lesquelles il existe peu de méthodes de mesure ou de surveillance efficaces sur le plan des coûts. [11.5.5]

Même s'il existe quelques exemples de politiques d'aide aux technologies de refroidissement à base d'énergie renouvelable, les politiques qui visent uniquement à promouvoir ce type de technologie sont en général beaucoup moins bien développées que dans le cas du chauffage. De nombreux mécanismes décrits dans les paragraphes précédents pourraient aussi être appliqués au secteur du refroidissement, généralement avec les mêmes avantages et inconvénients. Le manque d'expérience en ce qui a trait aux politiques de mise en valeur des technologies ÉR de refroidissement est probablement dû au niveau peu avancé de développement technologique de ces systèmes. Un appui en matière de recherche-développement et de politiques en vue de développer le marché initial et les chaînes d'approvisionnement associées pourrait être particulièrement utile pour favoriser la mise en valeur de ces technologies dans un avenir rapproché. [11.5.5.4]

Politiques de mise en valeur: transports

Un ensemble de politiques ont été mises en œuvre dans le but de promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables dans les transports, mais la grande majorité d'entre elles et des expériences connexes ont surtout concerné les biocarburants. Les politiques de soutien des biocarburants visent à encourager la consommation intérieure par le biais d'incitations fiscales (notamment exemption de taxe à la pompe) ou de dispositions réglementaires (par exemple mandats de mélange) ou encore à stimuler la production intérieure au moyen de fonds publics (par exemple des prêts) destinés aux installations de production ou par le biais d'un soutien des matières premières ou d'incitations fiscales (exemptions de taxe d'accise, par exemple). En général, les gouvernements adoptent une série de politiques. [11.5.6]

Les incitations fiscales servent surtout à promouvoir le recours aux biocarburants en améliorant leur compétitivité par rapport aux combustibles fossiles sur le plan des coûts. Elles peuvent s'appliquer à toute la chaîne de valeur des biocarburants, mais elles s'adressent généralement plutôt aux producteurs (par exemple exemptions/crédits de taxe d'accise) et/ou aux consommateurs finals (notamment réductions de taxe à la pompe). [11.5.6]

Plusieurs pays européens et autres pays du G8+5 ont toutefois commencé à passer graduellement des allégements fiscaux aux mandats de mélange. Il est difficile d'évaluer l'appui réellement procuré par ces mandats, car les prix découlant de ces obligations ne sont généralement pas rendus publics (contrairement au secteur de l'électricité, par exemple). Alors que les mandats constituent des éléments moteurs clés pour le développement et la croissance de la plupart des industries modernes engagées dans les biocarburants, ils semblent moins convenir à la promotion de types spécifiques de biocarburants, car les fournisseurs ont tendance à mélanger des biocarburants à faible coût. Par nature, les mandats doivent être conçus avec soin et assortis d'autres exigences, afin de parvenir à une plus grande équité au niveau de la distribution et de réduire au minimum les éventuelles répercussions sociales et environnementales négatives. Les pays où la proportion de biocarburants utilisés dans les transports est la plus élevée ont adopté des systèmes hybrides qui combinent les mandats (y compris des sanctions) et les incitations fiscales (principalement des exemptions de taxe). [11.5.6]

Synthèse

Certains instruments d'intervention se sont révélés particulièrement efficaces pour stimuler rapidement le recours aux énergies renouvelables et permettent aux gouvernements et aux sociétés d'atteindre des objectifs précis. À cet égard, la façon de les concevoir et de les mettre en œuvre peut être aussi déterminante que les politiques elles-mêmes. Les principales composantes de ces politiques sont les suivantes: [11.5.7]

- Montant dérivé des subventions, des tarifs d'alimentation, etc. qui permet de couvrir les coûts, pour assurer un retour sur investissement à un taux de rendement correspondant aux risques.

- Accès garanti aux réseaux et marchés ou, au moins, exceptions clairement définies à cet accès garanti.
- Contrats à long terme visant à réduire les risques et, par conséquent, les coûts financiers.
- Dispositions qui tiennent compte de la diversité des technologies et des applications. Les technologies ÉR présentent des niveaux de maturité variables et des caractéristiques diverses et font souvent face à des obstacles très différents. Il pourrait s'avérer nécessaire d'avoir recours à des sources et à des technologies ÉR multiples pour atténuer les effets des changements climatiques, et certaines de ces sources et de ces technologies qui sont actuellement moins bien maîtrisées et/ou plus coûteuses que d'autres pourraient jouer un rôle important à l'avenir afin de satisfaire les besoins en matière d'énergie et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- Incitations qui diminuent de manière prévisible avec le temps à mesure que les technologies et/ou les marchés évoluent.
- Politiques transparentes et facilement accessibles, de sorte que les acteurs puissent les comprendre et saisir la façon dont elles s'appliquent et ce qui est requis pour pénétrer le marché et/ou se conformer aux dispositions prévues. Cela englobe également la transparence à long terme des objectifs des politiques, y compris les objectifs à moyen et long terme.
- Caractère inclusif, c'est-à-dire un potentiel de participation le plus large possible, autant du côté de l'offre (producteurs traditionnels, distributeurs de technologies ou systèmes d'approvisionnement en énergies: électricité, chauffage ou combustibles) que de celui de la demande (entreprises, ménages, etc.), qui peut s'«autogénérer» avec des énergies renouvelables distribuées, autorisant une plus grande participation susceptible d'accroître les investissements et l'appui public en faveur des ÉR et de stimuler la concurrence.
- Attention particulière apportée aux groupes exemptés privilégiés, par exemple les grands utilisateurs, pour des raisons de concurrence ou aux clients vulnérables et à revenu faible pour des questions d'équité et de distribution.

Il convient aussi de bien comprendre qu'il n'existe pas de solution unique, et les décideurs doivent tirer des enseignements de l'expérience acquise et ajuster les programmes en conséquence. Les politiques doivent satisfaire aux conditions et aux besoins locaux d'ordre politique, économique, social, écologique, culturel et financier et prendre en compte des facteurs tels que le niveau de maturité technologique, la disponibilité de capitaux réalisables et la base de ressources énergétiques renouvelables aux niveaux local et national. Il est, par ailleurs, généralement nécessaire d'adopter un ensemble de politiques pour faire face aux différents obstacles. Des cadres d'action transparents et durables (prévisibilité des politiques, tarification du carbone et autres externalités, objectifs à long terme en matière d'énergies renouvelables, etc.) se sont révélés indispensables pour réduire les risques liés aux investissements et faciliter la mise en valeur des énergies renouvelables et l'évolution des applications à faible coût. [11.5.7]

Répercussions des politiques en matière d'énergies renouvelables sur le plan macroéconomique

Les mesures de soutien de l'offre au profit des ÉR sont généralement financées à même les budgets publics (à l'échelle multinationale, nationale ou locale), alors qu'il incombe souvent aux utilisateurs finals de défrayer les coûts des mécanismes de soutien de la demande. Par exemple, si l'on adopte une politique en faveur de l'électricité renouvelable dans le secteur de l'électricité d'un pays donné, ce coût supplémentaire est souvent à la charge des consommateurs d'électricité, même si des exemptions ou des réaffectations peuvent réduire au besoin les coûts supportés par les clients du secteur industriel ou les clients vulnérables. Or les coûts doivent être défrayés, d'une manière ou d'une autre. Si l'on veut transformer le secteur de l'énergie dans les prochaines décennies, il importe alors de réduire les coûts au minimum sur toute cette période et de tenir compte en outre de tous les coûts et avantages pour la société dans le calcul. [11.5.7.2]

Une analyse intégrée des coûts et avantages des énergies renouvelables est très complexe, vu le très grand nombre de facteurs en jeu dans l'évaluation des effets nets. Les effets relèvent de trois catégories: coûts directs et indirects du système et avantages de l'expansion du secteur des énergies renouvelables; effets distributifs (avantages ou charges pour les acteurs ou groupes économiques par suite de l'adoption de politiques de mise en valeur des énergies renouvelables; et aspects macroéconomiques, comme l'incidence sur le PIB ou l'emploi. Par exemple, les politiques en faveur des énergies renouvelables ouvrent différentes perspectives de développement économique et de création d'emploi, mais l'évaluation des effets nets est complexe et incertaine, car les coûts supplémentaires des mesures d'appui aux ÉR engendrent des effets distributifs et budgétaires sur l'économie. Rares sont les études qui ont examiné ces répercussions sur les activités économiques au niveau national ou régional; mais dans celles qui ont été effectuées, il est apparu généralement que les effets économiques nets étaient positifs. [11.3.4, 11.5.7.2]

Interactions des politiques en matière d'énergies renouvelables et des politiques climatiques et conséquences imprévues éventuelles

Étant donné le chevauchement des facteurs et des raisons de la mise en valeur des ÉR et celui des juridictions (à l'échelle locale, nationale et internationale), on peut observer de nombreuses interactions des politiques, avec parfois des conséquences inattendues. Il est donc indispensable de bien comprendre la portée de ces interactions ainsi que des effets cumulatifs des multiples politiques mises en œuvre. [11.3, 11.5.7, 11.6.2]

Si elles ne sont pas appliquées à l'échelle mondiale et de manière globale, les politiques en matière de tarification du carbone et en faveur des énergies renouvelables créent des risques de «fuite de carbone». En effet, les mesures touchant une juridiction ou un secteur réduisent la demande de combustibles fossiles dans cette juridiction ou ce secteur, ce qui a pour effet, toutes choses étant égales par ailleurs, d'abaisser le prix des combustibles fossiles à l'échelle mondiale et, donc, d'augmenter la demande de cette forme d'énergie dans d'autres juridictions ou secteurs. Même appliquées à l'échelle mondiale, des politiques de ce type sous-optimales peuvent avoir pour effet d'accroître les émissions de carbone. Par exemple, si les propriétaires de ressources en combustibles fossiles craignent que les politiques de mise en valeur des énergies renouvelables soient renforcées à long terme, ils peuvent alors décider d'intensifier l'extraction de leurs ressources tant que le soutien apporté aux ÉR reste modéré. De même, la perspective de l'augmentation future des prix du carbone peut encourager les propriétaires de puits de pétrole et de gaz à accélérer l'extraction des ressources pendant que les taxes sur le carbone sont encore basses, ruinant ainsi les efforts des décideurs en matière d'atténuation des effets des changements climatiques et de mise en valeur des technologies ÉR. Les conditions inhérentes à un tel «paradoxe vert» sont plutôt spécifiques: les prix du carbone doivent d'abord être bas, puis augmenter rapidement. Simultanément, les énergies renouvelables subventionnées devraient continuer à coûter plus cher que les technologies fondées sur des combustibles fossiles. Mais si les prix du carbone et les subventions en faveur des énergies renouvelables sont élevés au départ, ce paradoxe a peu de chance de se concrétiser. [11.5.7]

Tableau TS.11.1 | Facteurs et acteurs pouvant contribuer à la réussite d'un mode de gouvernance en matière d'énergies renouvelables (ÉR). [Tableau 11.4]

Caractéristiques d'un environnement favorable Facteurs et acteurs contribuant à la réussite d'une politique en matière d'ÉR	Section 11.6.2 Intégration des politiques (échelon national ou supranational)	Section 11.6.3 Réduction des risques en matière de financement et d'investissement	Section 11.6.4 Planification et délivrance de permis à l'échelle locale	Section 11.6.5 Création d'infrastructures, de réseaux et de marchés pour les technologies ÉR	Section 11.6.6 Transfert de technologie et renforcement des capacités	Section 11.6.7 Apprentissage auprès des acteurs non gouvernementaux
Institutions	L'intégration des politiques ÉR avec d'autres politiques au stade de la conception réduit les possibilités de conflit entre les politiques gouvernementales.	La mise sur pied d'institutions et d'organismes de financement peut faciliter la coopération entre les pays ou permettre d'obtenir des prêts consentis à des conditions avantageuses ou un financement international selon les règles de fonctionnement du marché international du carbone (MDP). Un engagement à long terme peut diminuer la perception du risque.	Les processus de planification et d'attribution de permis facilitent l'intégration des politiques ÉR avec les autres politiques à l'échelon local.	Les décideurs et les organismes de réglementation peuvent mettre en œuvre des incitations et des règles pour les réseaux et les marchés, notamment des normes de sécurité et des règles d'accès.	La fiabilité des technologies ÉR peut être garantie par un processus de certification. Les accords institutionnels facilitent le transfert de technologie.	La volonté d'acquérir des connaissances auprès d'autres acteurs peut favoriser le processus de conception des politiques et renforcer leur efficacité en tenant compte des conditions sociales existantes.
Société civile (particuliers, ménages, ONG, syndicats, etc.)	Les municipalités ou les villes peuvent jouer un rôle décisif dans l'intégration des politiques nationales à l'échelon local.	Les investissements communautaires peuvent permettre de répartir et de réduire les risques d'investissement. Les partenariats public-privé en matière d'investissement et d'élaboration de projets peuvent contribuer à diminuer les risques associés aux instruments de politique. Les institutions internationales concernées peuvent assurer une répartition équitable des fonds.	La participation de la société civile aux processus de planification et d'attribution de permis peut permettre de sélectionner les projets ÉR les mieux adaptés sur le plan social.	La société civile peut faire partie des réseaux d'approvisionnement par le biais de la coproduction d'énergie et de nouveaux modèles décentralisés	Les acteurs locaux et les ONG peuvent contribuer au transfert de technologie par l'entremise de nouveaux modèles commerciaux associant entreprises multinationales, ONG et petites et moyennes entreprises.	La participation de la société civile à un processus d'élaboration des politiques ouvert peut générer de nouvelles connaissances et conduire à des changements institutionnels. Les municipalités et les villes peuvent mettre au point des solutions permettant de promouvoir les technologies ÉR à l'échelon local. La population (à titre individuel ou collectif) a la capacité de faire évoluer les comportements en matière d'énergie, à condition que les contraintes contextuelles et les signaux politiques soient cohérents.
Milieux de la finance et des affaires		Les partenariats public-privé en matière d'investissement et d'élaboration des projets peuvent contribuer à la réduction des risques associés aux instruments de politique.	Les promoteurs de projets ÉR peuvent offrir savoir-faire et réseaux professionnels en: i) assurant la conformité des projets avec les exigences en matière de planification et d'attribution de permis; ii) adaptant les processus de planification et d'attribution de permis aux conditions et besoins locaux. Les entreprises peuvent jouer un rôle en exerçant des pressions (lobbying) en faveur de politiques cohérentes et intégrées.	Des règles bien définies pour les réseaux et les marchés augmentent la confiance des investisseurs.	Les institutions et organismes de financement peuvent collaborer avec les gouvernements nationaux et offrir des prêts consentis à des conditions avantageuses ou assurer un financement selon les règles du marché international du carbone (MDP).	Les sociétés multinationales peuvent faire participer les ONG ou PME locales en tant que partenaires dans de nouveaux projets de développement technologique (nouveaux modèles commerciaux). La création de sociétés anonymes et d'institutions internationales réduit les risques d'investissement.
Infrastructures	L'intégration des politiques dans les règles propres aux réseaux et aux marchés peut permettre d'établir des infrastructures adaptées à une économie à faible intensité de carbone.	Des règles bien définies pour les réseaux et les marchés diminuent les risques d'investissement et augmentent la confiance des investisseurs.		Des règles bien définies et transparentes pour les réseaux et les marchés devraient créer des conditions favorables à l'établissement d'infrastructures adaptées à un monde futur à faible intensité de carbone.		Des cadres appropriés aux niveaux municipal et communautaire pour la mise en place d'infrastructures et de réseaux à long terme peuvent favoriser la participation d'acteurs locaux à l'élaboration des politiques.

Suite à la page suivante →

Caractéristiques d'un environnement favorable Facteurs et acteurs contribuant à la réussite d'une politique en matière d'ÉR	Section 11.6.2 Intégration des politiques (échelon national ou supranational)	Section 11.6.3 Réduction des risques en matière de financement et d'investissement	Section 11.6.4 Planification et délivrance de permis à l'échelle locale	Section 11.6.5 Création d'infrastructures, de réseaux et de marchés pour les technologies ÉR	Section 11.6.6 Transfert de technologie et renforcement des capacités	Section 11.6.7 Apprentissage auprès des acteurs non gouvernementaux
Politiques (accords ou coopération à l'échelle internationale, stratégies en matière de changements climatiques, transfert de technologie, etc.)	Des directives supranationales (initiative de l'Union européenne en matière de «rationalisation», planification concernant les ressources océaniques, études d'impact, etc.) peuvent contribuer à l'harmonisation des politiques ÉR avec les autres politiques.	L'engagement politique à long terme en faveur des politiques ÉR réduit les risques liés à l'investissement dans des projets ÉR.	Les directives supranationales peuvent contribuer à faire évoluer les processus de planification et d'attribution de permis.	La coopération en matière de développement favorise la création d'infrastructures et facilite l'accès aux technologies à faible intensité de carbone.	Les MDP, les droits de propriété intellectuelle et les accords de brevet peuvent contribuer au transfert de technologie.	La participation appropriée d'institutions non gouvernementales favorise la signature d'accords prenant mieux en compte les aspects sociaux. Les mécanismes relevant du processus de la CCNUCC, comme le Groupe d'experts du transfert de technologies, le Fonds pour l'environnement mondial (FEM), le Mécanisme de développement propre (MDP) et la Mise en œuvre conjointe, peuvent donner des orientations pour faciliter la participation des acteurs non gouvernementaux à l'élaboration des politiques ÉR.

L'effet cumulatif de la combinaison de politiques qui établissent des prix fixes pour le carbone, comme les taxes sur le carbone, et de subventions à l'appui des énergies renouvelables est de nature essentiellement additive: autrement dit, l'application d'une taxe sur le carbone et l'attribution conjointe de subventions aux énergies renouvelables ont pour effet de réduire les émissions et de favoriser la mise en valeur des énergies renouvelables. En revanche, l'effet combiné sur le système énergétique de politiques de prix endogènes, comme l'échange de droits d'émissions et/ou les obligations liées aux quotas d'énergie renouvelable, n'est habituellement pas aussi direct. Le fait d'assortir un système d'échange de droits d'émissions de politiques de mise en valeur des énergies renouvelables permet généralement d'abaisser les prix du carbone, ce qui a pour conséquence de rendre les technologies à forte intensité de carbone (notamment à base de charbon) plus attrayantes que d'autres options de réduction non fondées sur des énergies renouvelables comme le gaz naturel, l'énergie nucléaire et/ou l'amélioration du rendement énergétique. Dans ces conditions, même si les émissions globales demeurent fixes, les politiques en matière d'énergies renouvelables ne réduisent les coûts de conformité et/ou n'améliorent le bien-être social que si les technologies ÉR sont davantage soumises à des externalités et à des obstacles du marché que les autres technologies énergétiques. [11.5.7]

Enfin, les seules politiques de mise en valeur des énergies renouvelables (c'est-à-dire sans tarification du carbone) ne constituent pas nécessairement un moyen efficace de diminuer les émissions de carbone, car elles ne procurent pas une incitation suffisante à utiliser toutes les options d'atténuation à moindre coût disponibles, y compris les technologies pauvres en carbone non fondées sur des énergies renouvelables et les mesures d'amélioration du rendement énergétique. [11.5.7]

11.6 Conditions favorables et questions régionales

Les technologies ÉR peuvent davantage contribuer à l'atténuation des effets des changements climatiques si elles sont employées en conjonction avec des politiques plus vastes en mesure de faciliter l'évolution du système énergétique. Un environnement favorable ou «facilitant» pour les ÉR englobe toute une série d'institutions, d'acteurs (monde de la finance, milieu des affaires, société civile, gouvernements, etc.), d'infrastructures (réseaux, marchés, etc.) et d'instruments d'intervention (coopération internationale et accords internationaux, stratégies relatives aux changements climatiques, etc.) (voir le tableau TS.11.1). [11.6]

On peut créer des conditions favorables aux énergies renouvelables en encourageant l'innovation dans le système énergétique; en tenant compte des interactions possibles d'une politique donnée avec d'autres politiques de mise en valeur des énergies renouvelables et avec d'autres politiques ne concernant pas ces formes d'énergie; en renforçant la capacité des promoteurs d'énergies renouvelables à obtenir des fonds et à implanter leurs projets; en éliminant les obstacles qui empêchent les installations et leur production d'accéder aux réseaux et aux marchés; en facilitant le transfert de technologie et le renforcement des capacités; et en favorisant la sensibilisation et la prise de conscience au niveau des institutions et au sein des communautés. L'environnement «favorable» ainsi créé peut à son tour augmenter l'efficacité et l'efficience des politiques de promotion des énergies renouvelables. [11.6.1–11.6.8]

Il est largement reconnu dans les publications portant sur l'innovation que les systèmes sociotechniques établis ont tendance à limiter la diversité des innovations, car les technologies dominantes ont su établir un environnement institutionnel protecteur. Cela peut donner lieu à de fortes dépendances sur le plan des options et exclure (ou bloquer) la rivalité et l'adoption de solutions potentiellement plus efficaces. C'est pourquoi les systèmes sociotechniques mettent du temps à changer, les changements étant plus systémiques que linéaires. Les technologies ÉR sont actuellement intégrées dans un système énergétique qui, dans une grande partie du monde, a été conçu pour satisfaire les besoins du système d'approvisionnement actuel. Il en résulte que l'infrastructure favorise les combustibles qui prédominent actuellement, et il faut tenir compte de tous les lobbies et intérêts existants. Vu la complexité des changements technologiques, il importe que tous les paliers de gouvernement (de l'échelon local au niveau international) encouragent le développement des énergies renouvelables par

le biais de politiques appropriées et que les acteurs non gouvernementaux puissent aussi participer à la formulation et à la mise en œuvre de ces politiques. [11.6.1]

Des politiques gouvernementales complémentaires ont plus de chance de donner des résultats fructueux, et la façon dont chacune d'elles est conçue influera également sur les possibilités de coordination. Tenter de promouvoir activement la complémentarité des politiques entre de multiples secteurs (énergie, agriculture, ressources en eau, etc.) tout en tenant compte des objectifs propres à chacune d'elles n'est pas une tâche facile et pourrait aboutir à des situations gagnant-gagnant et/ou gagnant-perdant, avec de possibles compromis. Il faut pour cela se doter d'un solide mécanisme de coordination centralisé, afin d'éliminer les contradictions et les conflits entre politiques sectorielles et d'assurer simultanément la cohérence à plusieurs niveaux de gouvernance. [11.6.2] Un environnement favorable plus large comprend un secteur financier susceptible d'assurer un financement selon des modalités en accord avec le profil de risque/récompense particulier à une technologie ou à un projet ÉR donné. Le coût du financement et son accessibilité reposent sur la situation générale du marché financier au moment de l'investissement et sur les risques inhérents à un projet, à une technologie ou aux acteurs concernés. Outre les politiques relatives aux énergies renouvelables, le contexte général peut englober les risques politiques et monétaires, et certaines questions propres au secteur de l'énergie, notamment la concurrence au niveau des investissements et l'évolution des dispositions réglementaires ou des réformes dans ce secteur. [11.6.3]

La réussite du processus de mise en valeur des technologies ÉR était liée jusqu'ici à une combinaison de mesures de planification favorables prises à l'échelon national et local. Certains arrangements procéduraux universels, comme la «simplification» des demandes d'attribution de permis, ne devraient pas résoudre les conflits entre les parties prenantes au niveau de la mise en œuvre des projets, car ils ne tiennent pas compte des conditions inhérentes à l'emplacement et à l'échelle des sites. Un cadre de planification visant à faciliter la mise en valeur des énergies renouvelables pourrait inclure les éléments suivants: prise en compte des attentes et des intérêts des parties prenantes; apprentissage concernant l'importance du contexte pour la mise en valeur des ÉR; mise en place de mécanismes de partage des avantages; renforcement des réseaux de collaboration; et mise en œuvre de mécanismes permettant de cerner plus précisément les conflits en vue de négociations. [11.6.4]

Après réception de l'autorisation de planification d'un projet ÉR, les investissements ne peuvent être obtenus que lorsque son raccordement commercial à un réseau est approuvé; qu'un contrat de prise en charge de sa production dans le réseau a été conclu; et que la vente d'énergie, généralement par le biais d'un marché, est garantie. La faisabilité d'un projet ÉR repose essentiellement sur la capacité de satisfaire ces exigences, la facilité avec laquelle cela peut être fait et les coûts associés. Les moyens utilisés pour intégrer les énergies renouvelables dans le système énergétique auront un effet sur le coût total d'intégration des ÉR dans le système et sur le coût des différents scénarios applicables. Afin d'assurer l'expansion et le renforcement, en temps opportun, de l'infrastructure des projets ÉR et de leur raccordement, les organes de réglementation économique pourraient devoir autoriser des investissements «anticipés» ou «proactifs» dans le réseau et/ou permettre aux projets de se raccorder avant le renforcement complet de l'infrastructure. [11.6.5, 8.2.1.3]

Pour de nombreux pays, l'un des grands problèmes consiste à accéder aux technologies ÉR. La plupart des technologies pauvres en carbone, y compris celles fondées sur les énergies renouvelables, sont développées et concentrées dans un nombre réduit de pays. On a fait valoir que de nombreux pays en développement ne pourraient probablement pas sauter l'étape du développement industriel à pollution intensive s'ils n'ont pas accès aux technologies propres mises au point par les nations les plus avancées. Mais les technologies telles que celles qui sont à base d'énergies renouvelables ne traversent généralement pas les frontières si les politiques environnementales du pays destinataire ne sont pas assorties d'incitations pour leur adoption. Par ailleurs, le transfert de technologie ne devrait pas remplacer mais plutôt compléter les efforts de renforcement des capacités déployés à l'échelle nationale. Pour que des populations sans accès direct aux énergies renouvelables aient la possibilité d'adapter, d'exploiter, de maintenir, de réparer et d'améliorer ces technologies ÉR, les investissements réalisés dans le transfert de technologie doivent être complétés par d'autres investissements dans des services de vulgarisation de type communautaire qui puissent procurer une expertise, des conseils et une formation dans ces domaines. [11.6.6]

Outre le transfert de technologie, l'apprentissage institutionnel joue un rôle important sur le plan de la mise en valeur des énergies renouvelables. Ce processus induit des changements qui permettent aux institutions d'améliorer le choix et la conception des politiques ÉR. L'apprentissage institutionnel stimule, par ailleurs, le renforcement des capacités à un niveau moins élevé, souvent plus local, où de nombreuses décisions sont prises au sujet de l'emplacement du projet et des investissements associés. Il peut être très utile si les décideurs peuvent compter sur la collaboration des acteurs non gouvernementaux, y compris les intervenants du secteur privé (entreprises, etc.) et de la société civile, pour l'élaboration des politiques. L'information et l'éducation sont souvent considérées comme des outils privilégiés pour faire évoluer les comportements en matière d'énergie. L'efficacité des politiques fondées sur l'information et l'éducation est cependant limitée par des facteurs contextuels, et il faut donc veiller à ne pas se fier uniquement à ce type de mesures. L'évolution des comportements dans le domaine de l'énergie est le résultat d'un processus complexe où les valeurs et attitudes personnelles interagissent avec des éléments comme les prix, les signaux en matière de politiques et les technologies elles-mêmes, ainsi qu'avec le contexte social de chacun. Ces facteurs contextuels mettent en lumière le rôle décisif joué par l'action collective, malgré sa complexité, pour impulser des changements. Il convient donc de mettre en place des politiques coordonnées et systémiques qui transcendent la simple volonté de modifier les attitudes et les comportements, si l'on souhaite engager la population dans le processus de transition vers les ÉR. [11.6.7, 11.6.8]

11.7 Évolution structurelle

Si les décideurs ont l'intention d'augmenter la part des énergies renouvelables, tout en poursuivant des objectifs ambitieux en matière d'atténuation des effets climatiques, il est alors indispensable d'encourager les engagements à long terme et de renforcer la capacité de tirer des enseignements de l'expérience acquise. Afin d'atteindre des niveaux appropriés de stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre en accroissant la part des ÉR, une évolution structurelle des systèmes énergétiques actuels doit avoir lieu au cours des prochaines décennies. La transition vers des formes d'énergie pauvres en carbone diffère des transitions précédentes (par exemple du bois au charbon et du charbon au pétrole), car le délai est serré (quelques décennies) et les énergies renouvelables doivent se développer et s'intégrer dans un système conçu selon une structure très éloignée de celle qui pourrait être nécessaire pour permettre une plus grande pénétration des ÉR sur le marché. [11.7]

L'évolution vers un secteur énergétique mondial fondé principalement sur les énergies renouvelables doit commencer en mettant fortement l'accent sur le rendement énergétique. Il faut toutefois pour cela adopter une politique raisonnable en matière de tarification du carbone, prévoyant des taxes ou l'échange de droits d'émissions en vue d'éviter les fuites de carbone et les effets de rebond. Il faut aussi mettre en œuvre des politiques qui aillent au-delà de la recherche-développement pour faciliter la mise en valeur les technologies ; créer un environnement favorable qui stimule notamment l'éducation et la prise de conscience; et élaborer systématiquement des politiques d'intégration avec des secteurs plus vastes, notamment l'agriculture, les transports, la gestion des ressources en eau et l'aménagement urbain. [11.6, 11.7] Les cadres d'action qui permettent de mobiliser le maximum d'investissements dans les énergies renouvelables sont ceux qui visent à réduire les risques et à optimiser le rendement ainsi qu'à assurer la stabilité sur une période adaptée aux investissements. [11.5] Il est enfin primordial de pouvoir mettre en place un ensemble d'instruments pertinents et fiables dans un contexte où il reste à développer l'infrastructure nécessaire et où l'on prévoit de fortes hausses de la demande d'énergie. [11.7]

Annexes

ANNEXE I

Glossaire, abréviations, symboles chimiques et préfixes

Édition établie par:
Aviel Verbruggen (Belgique), William Moomaw (États-Unis d'Amérique)
et John Nyboer (Canada)

La présente annexe devrait être référencée comme suit:
Verbruggen, A., W. Moomaw, J. Nyboer, 2011: Annexe I: Glossaire, abréviations, symboles chimiques et préfixes. In Rapport spécial du GIEC sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation des effets des changements climatiques [publié sous la direction d'O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. v. Stechow], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique.

Glossaire, abréviations, symboles chimiques et préfixes

Les entrées du glossaire (**en gras**) correspondent de préférence à des sujets précis; une entrée peut comporter des **entrées secondaires**, en gras et en italique; par exemple, ***Énergie finale*** est définie sous l'entrée **Énergie**. Le glossaire est suivi d'une liste de sigles et d'abréviations, d'une liste de composés et de symboles chimiques et d'une liste de préfixes (unités standard internationales). Certaines définitions sont reprises de C.J. Cleveland and C. Morris, 2006: *Dictionary of Energy*, Elsevier, Amsterdam. Les définitions des régions et des groupes de pays sont indiquées à la section A.II.6 de l'annexe II du présent rapport.

Glossaire

Accès à l'énergie: Faculté de tirer profit de services énergétiques bon marché, propres et fiables, pour répondre aux besoins fondamentaux de l'être humain (cuisine et chauffage, éclairage, communication et mobilité) et servir à des fins de production.

Actualisation: Opération mathématique permettant de comparer des montants en numéraire (ou autres) reçus ou dépensés à des moments (années) différents (voir l'annexe II). L'opérateur utilise un taux d'actualisation fixe ou, éventuellement, variable (> 0) d'une année à l'autre, qui fait qu'une valeur future vaut moins aujourd'hui. En cas d'**approche descriptive de l'actualisation,** on accepte les taux d'actualisation qui sont effectivement appliqués par les particuliers (épargnants et investisseurs) dans leurs décisions quotidiennes (**taux d'actualisation privé**). Dans le cas d'une **approche prescriptive (éthique ou normative) de l'actualisation**, le taux d'actualisation est fixé d'un point de vue social, par exemple sur la base d'une appréciation éthique des intérêts des générations futures (**taux social d'actualisation**). Dans le présent rapport, le potentiel d'approvisionnement en énergies renouvelables est évalué à l'aide d'un taux d'actualisation de 3, 7 et 10 %.

Adaptation: Initiatives et mesures prises pour réduire la vulnérabilité ou augmenter la résilience des systèmes naturels et humains aux effets des changements climatiques réels ou prévus. On distingue plusieurs sortes d'adaptation: anticipative ou réactive, de caractère privé ou public, autonome ou planifiée. On peut, à titre d'exemple, citer l'édification de digues le long des cours d'eau ou des côtes, l'abandon des zones côtières sujettes aux inondations dues à l'élévation du niveau de la mer ou le remplacement des cultures traditionnelles par des cultures mieux adaptées à la hausse des températures et à la sécheresse.

Aérosols: Ensemble de particules solides ou liquides en suspension dans l'air, dont la taille varie généralement de 0,01 à 10 µm et qui séjournent dans l'atmosphère plusieurs heures au moins. Les aérosols peuvent être d'origine naturelle ou humaine. Voir aussi *Carbone noir*.

Amortissement: Terme principalement utilisé dans le domaine financier pour l'évaluation d'un investissement et qui correspond au laps de temps nécessaire pour que les résultats d'un projet permettent d'amortir l'investissement initial. Il y a **écart d'amortissement** lorsque, par exemple, des investisseurs privés et des mécanismes de microfinancement exigent des taux de rentabilité plus élevés dans le cas de projets concernant des énergies renouvelables que dans celui de projets fondés sur des combustibles fossiles. Imposer un retour financier x fois plus élevé pour des investissements concernant des énergies renouvelables revient à imposer un obstacle x fois plus élevé en matière de performances techniques pour ce qui est de la production d'énergie au moyen de solutions renouvelables originales en comparaison du renforcement des systèmes énergétiques existants. L'**amortissement en matière d'énergie** est le laps de temps nécessaire pour qu'un projet en matière d'énergie produise autant d'énergie qu'il en a fallu pour le mettre en œuvre. L'**amortissement en matière de carbone** est le laps de temps nécessaire pour qu'un projet concernant des énergies renouvelables permette de faire autant d'économies nettes en matière d'émissions de gaz à effet de serre (par rapport au système énergétique de référence utilisant des combustibles fossiles) que sa mise en œuvre a causé d'émissions de gaz à effet de serre selon une analyse du cycle de vie (y compris les changements d'affectation des terres et les pertes de stocks de carbone terrestres).

Analyse coûts-avantages: Estimation monétaire de toutes les conséquences positives et négatives d'une activité donnée. Les coûts et les avantages sont comparés du point de vue de leur différence et/ou de leur rapport et peuvent de ce fait servir d'indicateur des retombées d'un investissement donné ou de toute autre politique du point de vue de la société.

Analyse coût-efficacité: Cas particulier de l'analyse coûts-avantages, où l'ensemble des coûts d'une série de projets sont évalués en fonction de l'objectif d'une politique déterminée. Dans ce cas, l'objectif de la politique en question représente les avantages des projets, et toutes les autres conséquences sont évaluées en termes de coûts ou de coûts négatifs (avantages). Cet objectif peut par exemple consister à concrétiser un potentiel particulier en matière d'énergies renouvelables.

Analyse de portefeuille: Évaluation d'un portefeuille d'actifs ou de politiques se caractérisant par différents risques et avantages. La fonction d'objectifs est fondée sur la variabilité des profits et des risques associés et débouche sur la fonction de décision permettant d'opter pour le portefeuille dont on espère le meilleur rendement.

Analyse du cycle de vie: Démarche consistant à comparer l'ensemble des dommages environnementaux causés par un produit, une technologie ou un service donné (voir l'annexe II). L'analyse du cycle de vie tient

généralement compte de l'apport de matières premières, des besoins énergétiques et de la production de déchets et d'émissions. Cela inclut l'exploitation de la technologie, de l'installation ou du produit ainsi que l'ensemble des processus en amont (c'est-à-dire antérieurs au début de l'exploitation) et en aval (c'est-à-dire postérieurs à la durée de vie utile de la technologie, de l'installation ou du produit), comme dans l'approche «de bout en bout».

Anthropique: Lié à ou résultant de l'action de l'homme sur la nature. Les ***émissions anthropiques*** de gaz à effet de serre et de leurs précurseurs et d'aérosols résultent de la combustion de combustibles fossiles, du déboisement, des changements d'affectation des terres, de l'élevage, de la fertilisation et d'activités industrielles, commerciales ou autres qui donnent lieu à une augmentation nette des émissions.

Atténuation: Modification des techniques employées et des activités menées dans le but de réduire les apports de ressources et les émissions par unité de production. Bien que certaines politiques sociales, économiques et technologiques puissent contribuer à réduire les émissions, du point de vue de l'évolution du climat, l'atténuation signifie la mise en œuvre de politiques destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à renforcer les puits. La mise en valeur des énergies renouvelables est une solution possible en matière d'atténuation lorsque les émissions de gaz à effet de serre évitées sont supérieures à la somme des émissions directes et indirectes (voir *Émissions*). La ***capacité d'atténuation*** est la capacité d'un pays de réduire les émissions de gaz à effet de serre anthropiques ou de renforcer les puits naturels, cette capacité se rapportant aux savoir-faire, aux aptitudes et aux compétences dont dispose un pays et dépendant de la technologie, des institutions, de la richesse, de l'équité, des infrastructures et de l'information. La capacité d'atténuation est un élément essentiel de tout développement durable au niveau national.

Avantages connexes: Avantages accessoires des politiques ciblées qui renvoient à des objectifs pertinents non ciblés; par exemple un usage accru des énergies renouvelables peut également contribuer à limiter la présence de polluants atmosphériques tout en réduisant les émissions de CO_2. Il existe différentes définitions de ces avantages connexes selon qu'ils sont recherchés intentionnellement (à titre de possibilité) ou obtenus de façon non intentionnelle (à titre d'avantage fortuit). Le terme «effets connexes» est employé dans un sens plus général afin d'englober à la fois les avantages et les coûts. Voir aussi *Éléments moteurs* et *Opportunités*.

Base de référence: Scénario de référence pour les quantités mesurables, à partir duquel un autre résultat peut être mesuré; c'est par exemple un scénario de non-intervention qui sert de référence pour l'analyse des scénarios fondés sur l'hypothèse d'une intervention. Une base de référence peut être fondée sur une extrapolation des tendances récentes ou sur l'hypothèse d'un gel des technologies ou des coûts. Voir aussi *Maintien du statu quo*, *Modèles* et *Scénario*.

Bien public: Les biens publics sont utilisés simultanément par plusieurs parties (à l'inverse des biens privés). L'usage de certains biens publics est totalement exempt de rivalité; pour d'autres, l'usage par certains limite leur disponibilité pour d'autres, ce qui crée une congestion. L'accès aux biens publics peut être restreint selon que ces biens sont des biens communs, des biens contrôlés par l'État ou des choses n'appartenant à personne («res nullius»). L'atmosphère et le climat sont les biens publics ultimes de l'humanité. Nombre de sources d'énergie renouvelable sont aussi des biens publics.

Biocarburant: Tout carburant liquide, gazeux ou solide obtenu à partir de la biomasse (huile de soja, alcool obtenu par fermentation du sucre, liqueur noire issue de la préparation de la pâte à papier, bois, etc.). Au nombre des biocarburants traditionnels figurent le bois, le fumier, l'herbe et les résidus agricoles. Les ***biocarburants manufacturés de première génération*** sont tirés de céréales, de graines oléagineuses, de matières grasses et déjections animales et d'huiles végétales au moyen de technologies de conversion bien maîtrisées. Les ***biocarburants de deuxième génération*** sont obtenus par des procédés de conversion biochimique et thermochimique non conventionnels et à partir de matières biologiques principalement tirées des fractions lignocellulosiques des résidus agricoles et forestiers, des déchets urbains solides, etc. Quant aux ***biocarburants de troisième génération***, ils seront produits à partir de matières biologiques telles que les algues ou les cultures énergétiques par des procédés perfectionnés encore au stade de la mise au point. Ces biocarburants de deuxième et troisième génération obtenus par de nouveaux procédés sont aussi appelés biocarburants de nouvelle génération, améliorés ou obtenus au moyen de technologies de pointe.

Biodiversité: Variabilité des organismes vivants de toutes origines, dont les écosystèmes terrestres, marins ou aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; comprend la diversité au sein des espèces et entre les espèces et la diversité des écosystèmes.

Bioénergie: Énergie tirée de toute forme de biomasse.

Biomasse: Matière d'origine biologique (végétale ou animale), à l'exclusion des substances incorporées dans les formations géologiques et transformées en combustibles fossiles ou en tourbe. L'Agence internationale de l'énergie (*World Energy Outlook*, 2010) définit la **biomasse traditionnelle** comme la consommation de biomasse par le secteur résidentiel dans les pays en développement, qui prend souvent la forme d'une utilisation non durable de bois, de charbon de bois, de résidus agricoles et de déjections animales pour la cuisine et le chauffage. Toutes les autres utilisations de la biomasse sont définies comme la **biomasse moderne**, elle-même subdivisée dans ce rapport en deux catégories. La ***bioénergie moderne*** englobe la production d'électricité et la production combinée de chaleur et d'électricité à partir de biomasse, de déchets urbains solides et de biogaz ainsi que le chauffage de l'espace résidentiel et de l'eau dans les bâtiments et les applications commerciales à partir de biomasse, de déchets urbains solides, de biogaz et de carburants liquides. Les applications de la ***bioénergie industrielle*** comprennent le chauffage par production de vapeur et autoproduction d'électricité et la production combinée de chaleur et d'électricité dans les secteurs des pâtes et papier, des produits forestiers et des denrées alimentaires et autres industries connexes.

Boisement: Conversion directe par l'homme de terrains non boisés de très longue date en terres forestières par plantation, ensemencement et/ou promotion de l'ensemencement naturel[1]. Voir aussi *Déboisement*, *Reboisement* et *Utilisation des terres*.

Capacité: En général: puissance de produire, effectuer, utiliser ou contenir quelque chose. La ***capacité de production*** d'une unité de production d'énergie renouvelable est sa puissance maximale, c'est-à-dire la quantité maximale d'énergie produite par unité de temps. La ***marge excédentaire*** est la part de la capacité d'une unité de production d'énergie renouvelable qui est considérée comme disponible de façon certaine sur des périodes de temps données et acceptée comme une contribution «ferme» à la capacité totale de production du système. Le ***coefficient d'utilisation*** (aussi appelé «taux de charge» ou «facteur de charge») est le rapport de la performance réelle d'une unité de production sur une période de temps donnée (généralement une année) à la performance théorique qui serait obtenue si l'unité était exploitée sans interruption selon sa **capacité nominale** pendant la même période de temps. La capacité nominale correspond donc au degré de performance prévu d'une installation pour une période prolongée dans des circonstances normales.

Capital-risque: Type de capital privé généralement investi dans des entreprises à vocation technologique en phase de démarrage et à haut potentiel, dans le but d'obtenir un retour sur investissement par le biais d'une vente de commerce de l'entreprise ou d'une éventuelle entrée en bourse.

Captage et stockage du dioxyde de carbone (CSC): Processus consistant à extraire le CO_2 des sources d'émission industrielles et énergétiques, à le comprimer et à le transporter vers un site de stockage afin de l'isoler de l'atmosphère pendant une longue période de temps.

Capteur solaire: Dispositif servant à convertir l'énergie solaire en énergie thermique (chaleur) d'un fluide en mouvement.

Carbone noir: Type d'aérosol défini de manière opérationnelle à partir de mesures de l'absorption de la lumière, de la réactivité chimique et/ou de la stabilité thermique; le carbone noir est constitué de suie, de charbon de bois et/ou de matière organique réfractaire absorbant la lumière.

Cellulose: Principal constituant chimique des parois des cellules des plantes et source de matières fibreuses pour la fabrication de différents produits (papier, rayonne, cellophane, etc.). C'est la principale matière première pour la fabrication des biocarburants de deuxième génération.

Certificats négociables (certificats verts négociables): Les parties soumises à des quotas en matière d'énergies renouvelables s'acquittent de leurs obligations annuelles en délivrant la quantité appropriée de certificats négociables à un organisme de réglementation. Les certificats sont créés par cet organisme et attribués aux producteurs d'énergies renouvelables pour que ces derniers les vendent ou les utilisent pour respecter leurs obligations en matière de quotas. Voir *Quota*.

Changement climatique: Variation de l'état moyen du climat qui peut se reconnaître (par exemple au moyen de tests statistiques) à des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels, à des forçages externes ou à des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou l'affectation des terres. On notera que la CCNUCC, dans son article premier, définit les changements climatiques comme des «changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables». La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat due à des causes naturelles.

Charge (électrique): Demande d'électricité émanant au même moment des utilisateurs d'énergie (dont le nombre peut varier de quelques milliers à plusieurs millions), cumulée et augmentée des pertes dues au transport et à la distribution et qui doit être satisfaite par un système d'alimentation en énergie intégré donné. L'***écrêtement des pointes*** réduit l'amplitude des fluctuations de la charge avec le temps. Le ***délestage*** a lieu lorsque la capacité de production ou de transport disponible est insuffisante pour satisfaire la demande correspondant aux charges cumulées. La ***charge de pointe*** est la charge maximale observée sur une période de temps donnée (jour, semaine ou année) et de courte durée. La ***charge de base*** est l'énergie constamment demandée sur la période considérée.

Chauffage urbain: Des stations centrales distribuent l'eau chaude (ou la vapeur dans les systèmes anciens) aux bâtiments et aux industries situés dans une zone densément peuplée (un quartier, une ville ou une région industrielle). Le réseau isolé à deux tuyaux fonctionne comme un système de chauffage central à eau dans un immeuble. Les sources de chaleur centrale peuvent être des systèmes de récupération de la chaleur résiduelle de procédés industriels, des incinérateurs de déchets, des sources géothermiques, des centrales de cogénération ou des chaudières autonomes brûlant des combustibles fossiles ou de la biomasse. De plus en plus de systèmes de chauffage urbain assurent aussi un refroidissement par le biais d'eau ou de boues froides (**chauffage et refroidissement urbains**).

Coefficient d'émission: Taux d'émission par unité d'activité, en entrée ou en sortie.

Cogénération: Utilisation de la chaleur dissipée par les centrales thermiques – par exemple, la chaleur dégagée par les turbines à vapeur à condensation ou à l'échappement des turbines à gaz – à des fins industrielles, pour le chauffage

1 Pour une analyse détaillée du terme forêt et de termes apparentés tels que boisement, reboisement ou déboisement, on se reportera au rapport spécial du GIEC intitulé *«Land Use, Land-Use Change, and Forestry»* (Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie) (IPCC, 2000) [publié sous la direction de R.T. Watson, I.A. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo et D.J. Dokken], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique.

de l'eau ou des bâtiments ou pour le chauffage à distance. Synonyme de production combinée de chaleur et d'électricité.

Compensation (en matière de politique climatique): Unités d'équivalent-CO_2 correspondant aux émissions réduites, évitées ou séquestrées pour compenser des émissions rejetées ailleurs.

Conformité: La conformité fait référence à la façon dont les pays parviennent à se conformer aux dispositions d'un accord ou à celle dont des particuliers ou des entreprises parviennent à respecter des dispositions réglementaires. Elle dépend de la mise en œuvre des politiques ordonnées, mais aussi du degré de concordance des mesures appliquées avec ces politiques.

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC): Convention adoptée le 9 mai 1992 à New York et signée cette même année, lors du Sommet Planète Terre qui s'est tenu à Rio de Janeiro, par plus de 150 pays et par la Communauté européenne. Son objectif ultime est de «stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique». Elle contient des engagements pour toutes les Parties. Conformément à la Convention, les Parties figurant à l'annexe I doivent s'employer à ramener, d'ici l'an 2000, les émissions de gaz à effet de serre non réglementées par le Protocole de Montréal à leurs niveaux de 1990. La Convention est entrée en vigueur en mars 1994. En 1997, la Conférence des Parties à la CCNUCC a adopté le Protocole de Kyoto. Voir aussi *Pays visés à l'annexe I*, *Pays visés à l'annexe B* et *Protocole de Kyoto*.

Conversion: L'énergie se manifeste sous diverses formes, et ces transformations d'une forme à l'autre s'appellent conversions d'énergie. Ainsi, l'énergie cinétique des écoulements de vent se transforme en mouvement d'un arbre tournant, qui lui-même est converti en électricité; de même, la lumière solaire est convertie en électricité au moyen de piles photovoltaïques. De plus, un courant électrique de caractéristiques données (continu ou alternatif, niveau de tension, etc.) peut être converti en courant possédant d'autres caractéristiques. Un **convertisseur** est la machine permettant d'effectuer une conversion.

Courbe ou taux d'apprentissage: Diminution du coût ou du prix des approvisionnements en énergie renouvelable, exprimée comme une fonction de l'accroissement de ces approvisionnements (total ou annuel). L'apprentissage améliore à la longue les technologies et les procédés en raison de l'expérience acquise, à mesure que la production et/ou la recherche-développement augmentent. Le **taux d'apprentissage** correspond à la diminution en pourcentage du coût ou du prix pour chaque doublement des approvisionnements cumulés (aussi appelé **taux de progrès**).

Coût: Consommation de ressources (temps de travail, capitaux, matériel, combustibles, etc.) en conséquence d'une action. En économie, toutes les ressources sont évaluées à leur **coût de substitution**, qui est le coût du renoncement à une activité économique au profit d'une autre. Les coûts sont définis de multiples façons et en fonction de diverses hypothèses qui influent sur leur valeur. Les avantages sont le contraire des coûts, les deux étant souvent considérés conjointement; ainsi, le coût net correspond au coût brut, moins les avantages. Les ***coûts privés*** sont supportés par des personnes, des entreprises ou autres entités qui engagent l'action, tandis que les ***coûts sociaux*** comprennent en plus les coûts externes pour l'environnement et pour la société dans son ensemble, par exemple les **coûts des dommages** liés aux incidences du changement climatique sur les écosystèmes, les activités économiques et les populations. Le ***coût total*** correspond à l'ensemble des coûts découlant d'une activité donnée; le **coût moyen** (**unitaire, spécifique**) correspond au coût total divisé par le nombre d'unités produites; le **coût marginal** ou **différentiel** correspond au coût de la dernière unité additionnelle.

Le ***coût d'un projet*** en matière d'énergie renouvelable comprend les **coûts d'investissement** (coûts – actualisés à l'année de début du projet – du processus permettant de disposer d'une installation de production d'énergie renouvelable prête à fonctionner), les **coûts d'exploitation et de maintenance** (pendant la phase d'exploitation de l'installation de production d'énergie renouvelable) et les **coûts de déclassement** (lorsque la production a cessé et qu'il s'agit de remettre le site en état).

Le ***coût du cycle de vie*** correspond à l'ensemble des coûts mentionnés ci-dessus, actualisés à l'année de début du projet considéré.

Le ***coût moyen actualisé de l'énergie*** (voir l'annexe II) est le prix unique (en centièmes (cents) de dollars des É.-U. par kilowattheure ou en dollars des É.-U. par gigajoule) des produits résultant d'un projet rendant la valeur actuelle des recettes (avantages) égale à la valeur actuelle des coûts pendant la durée de vie du projet. Voir également *Actualisation* et *Valeur actuelle*.

Il existe de nombreuses autres sortes de coûts affectés de noms qui manquent souvent de clarté et qui peuvent prêter à confusion: par exemple, les frais d'installation peuvent se rapporter au matériel installé ou aux activités menées pour mettre ce matériel en place.

Coût actualisé de l'énergie – Voir *Coût*.

Coût d'un projet – Voir *Coût*.

Critères relatifs aux politiques: En général: norme sur laquelle peut être basé un jugement ou une décision. S'agissant des politiques et des instruments d'intervention concernant les énergies renouvelables, on distingue habituellement quatre critères inclusifs:

L'***efficacité*** correspond à la mesure dans laquelle les objectifs visés sont atteints, par exemple l'accroissement effectif de la production d'énergie électrique renouvelable ou la proportion des énergies renouvelables dans l'ensemble des approvisionnements en énergie sur une période de temps donnée. Outre des objectifs quantitatifs, cela peut inclure des facteurs tels que le degré d'achèvement en matière de diversité technologique (promotion des différentes technologies propres aux énergies renouvelables) ou de diversité spatiale (répartition géographique des approvisionnements en énergie renouvelable).

L'***efficience*** est le rapport des résultats obtenus aux facteurs de production; il peut s'agir par exemple du rapport entre les objectifs atteints en matière d'énergies renouvelables et les ressources économiques dépensées, la plupart du temps mesuré à un moment précis (efficience statique), aussi appelé efficacité par rapport au coût. L'efficience dynamique ajoute une dimension temporelle prospective en évaluant le degré d'innovation requis pour améliorer le rapport des résultats aux facteurs de production.

L'***équité*** englobe l'incidence et les conséquences redistributives d'une politique, notamment pour ce qui concerne l'impartialité, la justice et le respect des droits des populations autochtones. Le critère d'équité se rapporte à la répartition des coûts et avantages d'une politique ainsi qu'à la prise en compte et à la participation d'un grand nombre de parties prenantes différentes (populations locales, producteurs d'énergie indépendants, etc.).

La ***faisabilité institutionnelle*** correspond à la mesure dans laquelle une politique ou un instrument d'intervention est perçu comme légitime, est susceptible d'être accepté de plus en plus largement et peut être adopté et mis en œuvre. Elle englobe la **faisabilité administrative** en cas de compatibilité avec la base d'information disponible et la capacité administrative, la structure juridique et les réalités économiques. La **faisabilité politique** nécessite l'acceptation et le soutien des parties prenantes, des organisations et des groupes concernés ainsi que la compatibilité avec les cultures et traditions prédominantes.

Cycle du carbone: Expression utilisée pour désigner l'échange de carbone (sous la forme de dioxyde de carbone, de méthane, etc.) entre l'atmosphère, les océans, la biosphère terrestre et la lithosphère.

Déboisement: Procédé naturel ou anthropique consistant à convertir une forêt en terre non forestière. Voir *Boisement*, *Reboisement* et *Utilisation des terres*.

Décharge: Site d'élimination des déchets solides, où les déchets sont déposés au-dessous, au niveau ou au-dessus du sol. Les décharges se limitent aux sites aménagés avec matériaux de couverture, mise en décharge réglementée et gestion des liquides et des gaz et ne comprennent pas les décharges sauvages. Les décharges rejettent souvent du méthane, du CO_2 et d'autres gaz résultant de la décomposition des matières organiques.

Défaillance du marché: Lorsque des décisions privées sont fondées sur des prix du marché qui ne reflètent pas la pénurie réelle de certains biens et services, elles ne peuvent donner lieu à une allocation efficace des ressources, mais entraînent plutôt des baisses du niveau de vie. Les facteurs responsables de la déviation des prix du marché par rapport à la pénurie économique réelle sont les effets externes sur l'environnement, les biens publics et le pouvoir de monopole.

Densité: Quantité ou masse par unité de volume, de surface ou de longueur. La ***densité énergétique*** est la quantité d'énergie par unité de volume ou de masse (par exemple le pouvoir calorifique d'un litre de pétrole). La ***densité de puissance*** est généralement considérée comme la capacité livrable d'énergie solaire, éolienne, de biomasse, hydroélectrique ou marine par unité de surface (watts/m^2). Pour les batteries, on utilise la capacité par unité de poids (watts/kg).

Dépendance à l'égard du chemin parcouru: Situation dans laquelle les résultats d'un processus sont conditionnés par des décisions, événements et résultats antérieurs plutôt que par les seules actions menées actuellement. Les choix fondés sur des conditions transitoires peuvent exercer une influence persistante bien après la modification de ces conditions.

Développement durable: La notion de développement durable, qui a été introduite dans la Stratégie mondiale de la conservation (UICN, Union mondiale pour la nature, 1980) et qui est centrée sur le concept de société durable et de gestion des ressources renouvelables, a été adoptée par la Commission mondiale de l'environnement et du développement en 1987, puis à la Conférence de Rio en 1992. Elle correspond à un processus de changement dans lequel l'exploitation des ressources, la gestion des investissements, l'orientation du développement technologique et les changements institutionnels s'articulent harmonieusement et renforcent le potentiel existant et futur pour répondre aux besoins et aux aspirations de l'homme. Le développement durable comporte des dimensions politiques, sociales, économiques et environnementales et tient compte des contraintes liées aux ressources et aux puits.

Dioxyde de carbone (CO_2): Gaz d'origine naturelle ou résultant de la combustion des combustibles fossiles ou de la biomasse, des changements d'affectation des terres et des procédés industriels. C'est le principal gaz à effet de serre anthropique qui influe sur le bilan radiatif de la Terre. C'est aussi le gaz de référence pour la mesure des autres gaz à effet de serre, et son potentiel de réchauffement global est donc égal à 1.

Disponibilité (d'une unité de production): Pourcentage de temps pendant lequel une installation est en mesure de produire, correspondant au rapport du temps de fonctionnement au temps total (temps total = temps de fonctionnement + temps d'arrêt due aux activités de maintenance et aux interruptions de service).

Échange de droits d'émissions: Instrument fondé sur les mécanismes du marché servant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et autres émissions. L'objectif environnemental ou la somme totale des émissions autorisées sont qualifiés de plafond d'émissions. Ce plafond est divisé en permis d'émission négociables qui sont attribués – soit par mise aux enchères, soit par attribution en fonction de droits acquis – à des entités relevant de la compétence du système d'échange. Ces entités doivent céder des permis d'émissions correspondant au volume de leurs émissions (par exemple au nombre de tonnes de CO_2). Une entité peut aussi vendre des permis excédentaires. Des systèmes d'échange de droits d'émissions peuvent être mis en place à l'échelle d'une entreprise ou aux niveaux national ou international et peuvent concerner le CO_2, d'autres gaz à effet de serre ou d'autres substances. L'échange de droits d'émissions est également l'un des mécanismes du Protocole de Kyoto.

Échangeur de chaleur: Dispositif assurant un **transfert de chaleur** efficace d'un milieu à un autre sans mélange des flux chaud et froid (radiateurs, chaudières, générateurs de vapeur, condenseurs, etc.).

Éclairement énergétique solaire: Puissance de l'énergie solaire reçue par unité de surface (watts/m^2). L'éclairement énergétique dépend de l'orientation de la surface, certaines orientations revêtant un caractère particulier: a) surface perpendiculaire au rayonnement solaire direct; b) surface horizontale par rapport au sol ou parallèle au sol. Le **plein soleil** correspond à un éclairement énergétique solaire d'environ 1 000 W/m^2.

Économies d'échelle: Le coût unitaire d'une activité diminue avec l'extension de cette activité (production d'unités supplémentaires, par exemple).

Économies d'énergie: Diminution de l'intensité énergétique grâce à un changement des activités nécessitant des apports d'énergie. On peut faire des économies d'énergie en prenant des mesures d'ordre technique, organisationnel, institutionnel ou structurel ou en changeant de comportement.

Écosystème: Système ouvert d'organismes vivants en interaction les uns avec les autres et avec leur environnement inorganique, qui est, jusqu'à un certain point, en mesure de s'autoréguler. Selon le centre d'intérêt ou le thème de l'étude, un écosystème peut donc se limiter à un espace très réduit ou s'étendre à l'ensemble du globe.

Effet de blocage: Des technologies qui couvrent de larges parts du marché continuent d'être utilisées en raison de facteurs tels que des dépenses d'investissement potentiellement irrécupérables, le développement de l'infrastructure connexe, l'utilisation de technologies complémentaires et les structures et pratiques sociales et institutionnelles qui leur sont associées. S'agissant du carbone, l'***effet de blocage*** signifie que les technologies et pratiques en vigueur sont à forte intensité carbonique.

Effet de rebond: Après la mise en œuvre de technologies et de pratiques économes en énergie, une fraction des économies d'énergie escomptées ne sont pas réalisées, car elles peuvent servir à consommer davantage d'énergie. Par exemple, des améliorations du rendement énergétique des moteurs entraînent une baisse du coût par kilomètre parcouru, ce qui a pour effet pervers d'inciter les usagers à se servir plus souvent de leur véhicule ou à parcourir davantage de kilomètres ou encore à dépenser l'argent économisé pour d'autres activités consommant de l'énergie. Des politiques fructueuses en matière de rendement énergétique peuvent contribuer à réduire la demande d'énergie à l'échelle de l'économie dans son ensemble et, en ce cas, à diminuer les prix de l'énergie, les économies réalisées pouvant alors servir à impulser des effets de rebond. L'effet de rebond correspond au rapport des économies d'énergie et de ressources non réalisées aux économies potentielles au cas où la consommation serait restée constante comme avant la mise en œuvre des mesures de rationalisation. S'agissant du changement climatique, la principale préoccupation au sujet des effets de rebond consiste en leur incidence sur les émissions de CO_2 (rebond carbone).

Électricité: Écoulement d'une charge passante dans un conducteur, engendré par la différence de tension entre les extrémités du conducteur. L'énergie électrique est produite par l'action de la chaleur dans une turbine à gaz ou à vapeur, du vent, des océans ou des chutes d'eau, directement par la lumière du soleil au moyen d'un dispositif photovoltaïque ou encore par une réaction chimique dans une pile à combustible. Consistant en un courant, l'électricité ne peut être stockée et nécessite des fils et des câbles pour son transport (voir *Réseau*). Parce que le courant électrique circule immédiatement, il faut répondre à la demande d'électricité par une production en temps réel.

Éléments moteurs: Dans un contexte de politique générale, les éléments moteurs donnent une impulsion et une orientation pour le lancement et le soutien des initiatives prises dans ce domaine. La mise en valeur des énergies renouvelables est par exemple motivée par des préoccupations concernant le changement climatique ou la sécurité énergétique. Dans un sens plus général, un élément moteur est le moyen de susciter une réaction, par exemple en précisant que les émissions sont causées par la consommation de combustibles fossiles et/ou la croissance économique. Voir aussi *Opportunités*.

Émissions: Les **émissions directes** sont rejetées et attribuées en des points déterminés de la chaîne propre aux énergies renouvelables, que ce soit un secteur, une technologie ou une activité. C'est par exemple le cas des émissions de méthane émanant des matières organiques en décomposition immergées dans les réservoirs hydroélectriques ou des rejets du CO_2 dissous dans l'eau chaude des centrales géothermiques ou résultant de la combustion de la biomasse. Les **émissions indirectes** sont dues à des activités qui ne font pas partie de la chaîne propre aux énergies renouvelables considérée, mais qui sont nécessaires à la mise en valeur de ces énergies. C'est par exemple le cas des émissions résultant de l'accroissement de la production d'engrais utilisés pour les cultures à biocarburants ou des émissions liées aux productions végétales déplacées ou au déboisement résultant de ces cultures. Les **émissions évitées** correspondent aux réductions des émissions dues à des mesures d'atténuation telles que la mise en valeur des énergies renouvelables.

Émission d'équivalent CO_2: Quantité émise de CO_2 qui entraînerait un forçage radiatif de même ampleur qu'une quantité émise d'un gaz à effet de serre ou d'un mélange de gaz à effet de serre, tous multipliés par leurs potentiels de réchauffement global respectifs afin de prendre en compte la différence de leurs durées de vie dans l'atmosphère. Voir aussi *Potentiel de réchauffement global.*

Énergie: Quantité de travail ou de chaleur fournie. L'énergie se classe en différentes catégories et devient utile à l'homme lorsqu'elle circule d'un point à un autre ou qu'elle est convertie d'une catégorie en une autre. Chaque jour, le soleil fournit de grandes quantités d'énergie sous forme de rayonnement. Une partie de cette énergie est directement utilisable, alors qu'une autre partie subit plusieurs transformations aboutissant à l'évaporation de l'eau, à la formation des vents, etc. Une partie est stockée dans la biomasse ou les cours d'eau et peut être récupérée par l'homme. Une autre partie est directement utilisable, comme la lumière du jour, l'aération ou la chaleur ambiante. L'***énergie primaire*** (on parle également de sources d'énergie) est présente dans les ressources naturelles (charbon, pétrole brut, gaz naturel, uranium et sources d'énergie renouvelable). Il en existe plusieurs définitions. L'Agence internationale de l'énergie emploie la méthode du contenu énergétique

physique, qui définit l'énergie primaire comme l'énergie n'ayant encore fait l'objet d'aucune conversion anthropique. La méthode utilisée dans le présent rapport est la méthode d'équivalence directe (voir l'annexe II), qui assimile une unité d'énergie secondaire fournie par des sources non combustibles à une unité d'énergie primaire, mais considère l'énergie de combustion comme le potentiel énergétique contenu dans les combustibles avant traitement ou combustion. L'énergie primaire est transformée en **énergie secondaire** par purification (du gaz naturel), par raffinage (du pétrole brut en produits pétroliers) ou par conversion en électricité ou en chaleur. Lorsque l'énergie secondaire est fournie à des installations d'utilisation finale, elle est appelée **énergie finale** (par exemple l'électricité fournie par une prise de courant) et se transforme en **énergie utile** en fournissant des services (la lumière, par exemple). L'***énergie intrinsèque*** est l'énergie utilisée pour produire une substance (métaux industriels ou matériaux de construction), compte tenu de l'énergie utilisée dans l'unité de production (ordre zéro), de l'énergie utilisée pour produire des matières qui sont utilisées dans l'unité de production (premier ordre) et ainsi de suite.

L'***énergie renouvelable*** correspond à toute forme d'énergie d'origine solaire, géophysique ou biologique qui se reconstitue par des processus naturels à un rythme égal ou supérieur à son taux d'utilisation. L'énergie renouvelable est obtenue à partir des flux d'énergie continus ou répétitifs qui se produisent dans le milieu naturel et comprend des technologies à faible émission de carbone, comme l'énergie solaire, hydroélectrique, éolienne, marémotrice, houlomotrice et géothermique, ainsi que des combustibles renouvelables tels que la biomasse. Pour une description plus détaillée, on se reportera aux différents types d'énergie renouvelable mentionnés dans le présent glossaire (*biomasse, énergie solaire, énergie hydroélectrique, énergie marine, énergie géothermique, énergie éolienne, etc.*).

Énergie éolienne: Énergie cinétique tirée des courants atmosphériques résultant du réchauffement inégal de la surface du globe. Une éolienne est une machine tournante qui comprend une structure support servant à convertir l'énergie cinétique en énergie mécanique rotative en vue de la production d'électricité. Un **moulin à vent** fonctionne à l'aide d'aubes ou d'ailes obliques et produit une énergie mécanique qui est en général utilisée directement, par exemple pour le pompage de l'eau. Une **ferme**, une **centrale** ou un **parc éolien** est un groupe d'éoliennes reliées à un réseau d'alimentation électrique ordinaire par un système de transformateurs, de lignes de distribution et (généralement) d'une sous-station.

Énergie géothermique: Énergie thermique accessible stockée à l'intérieur de la Terre, aussi bien dans les roches que dans la vapeur d'eau ou l'eau liquide piégées (ressources hydrothermiques), qui peut servir à produire de l'énergie électrique dans une centrale thermique ou à fournir de la chaleur, selon les besoins. Les principales sources d'énergie géothermique sont l'énergie résiduelle de la formation de la planète et l'énergie produite en permanence par la désintégration des radionucléides.

Énergie hydroélectrique: Énergie de l'eau passant d'un point donné à un autre situé plus bas, qui est convertie en énergie mécanique par une turbine ou un autre dispositif, laquelle est utilisée soit directement pour effectuer un travail mécanique, soit plus généralement pour faire fonctionner un générateur produisant de l'électricité. Le terme sert également à décrire l'énergie cinétique d'un écoulement fluvial qui peut aussi être converti, par le biais d'une turbine mue par le courant, en énergie mécanique servant à faire fonctionner un générateur produisant de l'électricité.

Énergie marine: Énergie fournie par l'océan par le biais des vagues, des marnages, des courants océaniques et de marée et des gradients thermiques et salins (note: l'énergie géothermique sous-marine est prise en compte dans *Énergie géothermique* et la biomasse marine est prise en compte dans *Biomasse*).

Énergie renouvelable – Voir *Énergie*.

Énergie solaire: Énergie en provenance du Soleil qui est captée sous forme de chaleur ou de lumière et convertie en énergie chimique par photosynthèse naturelle ou artificielle ou directement en électricité par des cellules photovoltaïques. Les ***centrales solaires à concentration*** utilisent des lentilles ou des miroirs pour capter de grandes quantités d'énergie solaire et la concentrer vers une zone restreinte de l'espace. Les hautes températures obtenues peuvent faire fonctionner une turbine thermique à vapeur ou être utilisées dans des procédés industriels à haute température. L'***énergie solaire directe*** fait référence à l'énergie solaire qui arrive à la surface de la Terre, avant son stockage dans l'eau ou les sols. La ***technologie héliothermique*** se rapporte à l'utilisation de l'énergie solaire directe pour des emplois finals axés sur la chaleur, à l'exception de l'énergie solaire à concentration. Le ***solaire actif*** nécessite du matériel (panneaux, pompes, ventilateurs, etc.) pour capter et distribuer l'énergie. Le ***solaire passif*** se fonde sur une conception structurelle et des techniques de construction permettant d'utiliser l'énergie solaire pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage des bâtiments, sans recourir à des moyens mécaniques.

Énergie solaire directe: Voir *Énergie solaire.*

Évaluation intégrée: Méthode d'analyse qui combine en un ensemble cohérent les résultats et modèles propres aux sciences physiques, biologiques, économiques et sociales ainsi que les interactions de ces divers éléments, de façon à pouvoir évaluer l'ampleur et les conséquences des changements climatiques de même que les mesures prises pour y remédier. Voir aussi *Modèles*.

Évent (géothermique, hydrothermal ou sous-marin): Ouverture à la surface du globe (terrestre ou sous-marine) par laquelle s'écoulent des matières et de l'énergie.

Évolution technologique: Considérée habituellement comme synonyme d'amélioration technologique, en ce sens qu'avec une quantité donnée de ressources (facteurs de production), cette évolution permet d'obtenir des biens et services plus nombreux ou de meilleure qualité. Les modèles économiques distinguent l'évolution technologique autonome (exogène), endogène et induite.

L'***évolution technologique autonome (exogène)*** est un processus qui n'est pas pris en compte par le modèle (en tant que paramètre) et qui prend

souvent la forme d'une évolution chronologique influant sur la productivité des facteurs et/ou la productivité énergétique et, par conséquent, sur la demande en énergie ou la croissance de la production. L'***évolution technologique endogène*** est le résultat d'une activité économique prise en compte par le modèle (en tant que variable), de sorte que la productivité des facteurs ou le choix des technologies est inclus dans le modèle et qu'il affecte la demande en énergie et/ou la croissance économique. L'***évolution technologique induite*** englobe l'évolution technologique endogène, mais aussi d'autres changements induits par des politiques et des mesures telles que les taxes sur le carbone destinées à stimuler les activités de recherche-développement.

Externalité, coûts externes et avantages externes:
L'externalité résulte d'une activité humaine, lorsque le responsable de l'activité en question ne tient pas totalement compte de ses effets sur les possibilités de production et de consommation d'autrui et qu'il n'existe aucune forme de compensation pour ces effets. Lorsque les effets sont négatifs, on parle de coûts externes, et lorsqu'ils sont positifs, d'avantages externes.

Fiabilité: En général, degré de performance selon des normes ou des attentes bien définies. La ***fiabilité électrique*** correspond à l'absence de coupures imprévues du courant dues, par exemple, à une insuffisance de la capacité d'alimentation ou à des pannes de réseau. La fiabilité diffère de la sécurité et des fluctuations de la qualité énergétique dues aux impulsions ou harmoniques.

Financement: Collecte ou fourniture d'argent ou de capitaux par des particuliers, des entreprises, des banques, des fonds d'investissement, des instances publiques ou autres entités pour exécuter un projet ou poursuivre une activité. Selon le bailleur de fonds, l'argent est collecté et fourni différemment. Par exemple les entreprises peuvent se procurer de l'argent en puisant dans leurs propres recettes, en empruntant ou en émettant des actions. Le ***financement de projets*** en matière d'énergie renouvelable peut être assuré par des bailleurs de fonds au profit d'entreprises distinctes à but unique dont les ventes d'énergie renouvelable sont d'ordinaire garanties par des conventions d'achat d'énergie. Le ***financement sans recours*** est considéré comme hors bilan, puisque les bailleurs de fonds se fondent sur la certitude d'un excédent de trésorerie du projet pour rembourser le prêt, et non pas sur la solvabilité du promoteur du projet. Le ***financement par émission d'actions de caractère public*** correspond aux capitaux fournis pour des sociétés cotées en bourse. Le ***financement par émission d'actions de caractère privé*** correspond aux capitaux fournis directement à des sociétés non cotées en bourse. Le ***financement des entreprises*** par des banques au moyen de titres de créance utilise les actifs figurant au bilan comme garantie et est donc limité par le ratio d'endettement de ces entreprises, qui doivent harmoniser chaque emprunt supplémentaire avec les autres besoins en capitaux.

Financement public: Soutien public pour lequel un rendement financier est prévu (prêts, participation) ou un engagement financier est assumé (garantie).

Gaz à effet de serre (GES): Constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre. La vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxyde nitreux (N_2O), le méthane (CH_4) et l'ozone (O_3) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre. Il existe également, dans l'atmosphère, des gaz à effet de serre résultant uniquement des activités humaines tels que les hydrocarbures halogénés et autres substances contenant du chlore et du brome, dont traite le Protocole de Montréal. Outre le CO_2, le N_2O et le CH_4, le Protocole de Kyoto mentionne, quant à lui, d'autres gaz à effet de serre tels que l'hexafluorure de soufre (SF_6), les hydrofluorocarbones (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC).

Gestion de la demande: Politiques et programmes visant à influencer la demande de biens et/ou de services. Dans le secteur de l'énergie, la gestion de la demande consiste à réduire la demande d'électricité et des autres formes d'énergie requises pour assurer la prestation des services énergétiques.

Gouvernance: Notion générale englobant l'ensemble des moyens nécessaires pour la détermination, la gestion et la mise en œuvre des politiques et des mesures appropriées. Alors que le gouvernement se rapporte strictement à l'État-nation, le concept plus large de gouvernance recouvre les contributions des divers niveaux de gouvernement (mondial, international, régional et local) ainsi que le rôle du secteur privé, des acteurs non gouvernementaux et de la société civile, en vue de répondre aux diverses sortes de questions auxquelles fait face la communauté internationale.

Gradient géothermique: Rythme auquel la température de la Terre augmente selon la profondeur, ce qui donne une indication du flux de chaleur de l'intérieur du globe vers ses parties plus froides.

Incitation fiscale: Les acteurs (particuliers, ménages, entreprises) se voient accorder une réduction de leur contribution au trésor public par l'intermédiaire de l'impôt sur le revenu ou d'autres impôts.

Indicateur du développement humain (IDH): Indicateur permettant d'évaluer les progrès des pays en matière de développement social et économique. Il s'agit d'un indicateur composite fondé sur trois indicateurs: 1) la santé mesurée par l'espérance de vie à la naissance; 2) les connaissances mesurées par la combinaison du taux d'alphabétisation des adultes et du taux de scolarisation correspondant aux études primaires, secondaires et supérieures; et 3) le niveau de vie mesuré par le produit intérieur brut par habitant (en parité du pouvoir d'achat). L'IDH donne seulement une indication indirecte de certains des principaux aspects du développement humain; par exemple, il ne rend pas compte de la participation politique ou des inégalités hommes-femmes.

Institution: Structure visant à renforcer l'ordre social ou la coopération et qui régit le comportement d'un groupe de personnes au sein d'une collectivité. Les institutions doivent être fonctionnellement efficaces sur une longue période et doivent en outre être en mesure de contribuer à transcender les intérêts individuels et à régir le comportement des intéressés sur le plan de la coopé-

ration. Le terme peut être élargi afin d'englober également la réglementation, les normes technologiques, la certification et autres considérations.

Intensité énergétique: Rapport de la consommation d'énergie (en joules) à la production économique (en dollars) qui en résulte. L'intensité énergétique est la réciproque de la productivité énergétique. Au niveau national, l'intensité énergétique correspond au rapport de la consommation nationale totale d'énergie primaire (ou finale) au produit intérieur brut (PIB). L'intensité énergétique d'une économie est la somme pondérée des intensités énergétiques des diverses activités concernées, la pondération se fondant sur la part respective de ces activités dans le PIB. Les intensités énergétiques sont déterminées d'après les statistiques disponibles (Agence internationale de l'énergie, Fonds monétaire international) et publiées chaque année pour la plupart des pays. L'intensité énergétique sert aussi à qualifier le rapport de la consommation d'énergie à la production ou à la performance énergétique d'un point de vue physique (tonnes d'acier produit, tonnes par kilomètre transporté, etc.) et est en ce cas la réciproque du rendement énergétique.

Maintien à l'équilibre de l'énergie disponible: En raison des fluctuations instantanées et à court terme de la demande de courant et des incertitudes concernant la disponibilité des centrales électriques, il faut en permanence disposer d'une réserve tournante et de générateurs à démarrage rapide afin d'équilibrer la demande et l'offre aux niveaux de qualité requis pour la fréquence et la tension.

Maintien du statu quo: L'avenir est anticipé ou prévu en supposant que les conditions d'exploitation et les politiques appliquées resteront les mêmes qu'à présent. Voir aussi *Base de référence, Modèles* et *Scénario*.

Mécanisme de développement propre (MDP): Mécanisme défini dans le Protocole de Kyoto, qui permet aux pays développés (visés à l'annexe B) de financer des projets de réduction ou de suppression des émissions de gaz à effet de serre dans des pays en développement (non visés à l'Annexe B) et de recevoir pour ce faire des crédits qu'ils peuvent utiliser pour respecter les limites de caractère obligatoire concernant leurs propres émissions.

Mesures: En matière de politiques climatologiques, technologies, procédés ou pratiques visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre ou leurs effets en-deçà des niveaux anticipés pour l'avenir. Il peut s'agir, par exemple, de technologies concernant les énergies renouvelables, de procédés de réduction au minimum des déchets ou d'incitations à l'utilisation des transports en commun. Voir également *Politiques*.

Modèles: Imitations structurées des caractéristiques et des mécanismes d'un système donné (climat, économie d'un pays, culture, etc.), permettant de simuler son apparence ou son fonctionnement. Les modèles mathématiques assemblent des (nombreuses) variables et relations (souvent en code informatique) afin de simuler le fonctionnement et les performances de divers systèmes en faisant varier les paramètres et les entrées. Les ***modèles ascendants*** procèdent à l'agrégation des caractéristiques d'ordre technique, technologique et financier d'activités et de processus particuliers. Les ***modèles descendants*** appliquent la théorie macroéconomique et diverses techniques économétriques et d'optimisation pour regrouper des variables économiques telles que la consommation totale, les prix, les revenus et les coûts des facteurs de production. Les ***modèles hybrides*** combinent jusqu'à un certain point les caractéristiques des modèles ascendants et descendants.

Modèles concernant l'équilibre général: Modèles prenant en compte simultanément l'ensemble des marchés et des effets de rétroaction entre ces marchés dans une économie où le marché tend à l'équilibre.

Normes: Ensemble de règles ou de codes prescrivant ou définissant les performances des produits (classes, dimensions, caractéristiques, méthodes d'essai, règles d'utilisation, etc.). Les ***normes relatives aux produits, aux technologies*** ou ***aux performances*** établissent les prescriptions minimales requises pour les produits ou les technologies concernés.

Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD): Ensemble des huit objectifs à échéance déterminée et mesurables visant à lutter contre la pauvreté, la famine, les maladies, l'analphabétisme, la discrimination à l'égard des femmes et la dégradation de l'environnement, qui ont été adoptés en 2000 lors du Sommet du Millénaire des Nations Unies, au même titre qu'un plan d'action pour atteindre ces objectifs.

Obstacle: Difficulté qui s'oppose à l'élaboration et à la concrétisation d'un potentiel en matière d'énergies renouvelables et qui peut être surmontée ou atténuée par une politique, un programme ou une mesure. Les obstacles à l'utilisation d'énergies renouvelables sont placés intentionnellement ou non par l'homme (par exemple des bâtiments mal orientés ou des critères d'accès aux réseaux électriques qui pénalisent les générateurs d'énergie renouvelable indépendants). Par opposition aux obstacles, il existe des difficultés telles que des propriétés intrinsèquement naturelles qui empêchent l'application de certaines sources d'énergie renouvelable à certains endroits ou à certains moments (par exemple l'absence de relief faisant obstacle à la production d'énergie hydroélectrique ou l'impossibilité de récupérer de l'énergie solaire directe de nuit). La ***suppression des obstacles*** consiste notamment à remédier directement aux imperfections du marché ou à réduire les coûts de transaction dans le secteur public et le secteur privé, par exemple en renforçant les moyens institutionnels, en réduisant les risques et l'incertitude, en facilitant les transactions sur le marché et en mettant en pratique des politiques de réglementation.

Opportunités: En général: conditions favorisant d'éventuels progrès ou profits. S'agissant des considérations de politique générale, circonstances favorables à l'action, conjuguées à la notion de chance. Par exemple l'anticipation d'avantages supplémentaires peut aller de pair avec la mise en valeur des énergies renouvelables (meilleur accès à l'énergie et sécurité énergétique accrue, pollution de l'air réduite au niveau local), sans que ces avantages soient intentionnellement ciblés. Voir aussi *Avantages connexes* et *Éléments moteurs*.

Ordre d'appel (des centrales): Classement de toutes les unités de production d'énergie disponibles dans un système d'alimentation électrique selon leur coût marginal à court terme par kWh, en commençant par la moins chère pour ce qui concerne la distribution d'électricité au réseau.

Partenariats public-privé: Arrangements caractérisés par une collaboration du secteur public et du secteur privé. Dans un sens plus large, les partenariats public-privé englobent toutes formes de collaboration entre le secteur public et le secteur privé aux fins de fourniture de services ou d'infrastructures.

Pays non visés à l'annexe I – Voir *Pays visés à l'annexe I*.

Pays non visés à l'annexe B – Voir *Pays visés à l'annexe B*.

Pays visés à l'annexe I: Groupe de pays figurant à l'annexe I (telle qu'elle a été amendée après que Malte eut rejoint ce groupe) de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), y compris les pays développés et certains pays en transition vers une économie de marché. Conformément aux dispositions des alinéas a) et b) de l'article 4.2 de la Convention, les pays figurant à l'annexe I sont incités à ramener individuellement ou conjointement les émissions de gaz à effet de serre à leurs niveaux de 1990 d'ici l'an 2000. Ce groupe est très similaire à celui des pays visés à l'annexe B du Protocole de Kyoto. Par opposition, les autres pays sont appelés **pays non visés à l'annexe I**. Voir aussi *CCNUCC* et *Protocole de Kyoto*.

Pays visés à l'annexe B: Sous-groupe de pays faisant partie des pays visés à l'annexe I qui ont pris des engagements précis en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre au titre du Protocole de Kyoto. Ce sous-groupe est très similaire à celui des pays visés à l'annexe I de la CCNUCC. Par opposition, les autres pays sont appelés pays non visés à l'annexe B. Voir aussi *CCNUCC* et *Protocole de Kyoto*.

Photosynthèse: Processus par lequel les plantes, les algues et certaines bactéries utilisent l'énergie de la lumière pour produire des hydrates de carbone. Le CO_2 sert de source de carbone.

Photovoltaïque: Technologie consistant à convertir l'énergie lumineuse directement en électricité en mobilisant des électrons dans des dispositifs à semi-conducteur. Les semi-conducteurs en couche mince spécialement élaborés à cet effet sont appelés cellules photovoltaïques. Voir *Énergie solaire*.

Pile à combustible: Pile produisant de l'électricité de façon directe et continue à partir d'une réaction électrochimique contrôlée de l'hydrogène ou d'un autre combustible et de l'oxygène. Lorsque l'hydrogène sert de combustible, la réaction produit uniquement de l'eau (et pas de CO_2) et de la chaleur, laquelle peut être utilisée. Voir *Cogénération*.

Point de repère: Variable mesurable servant de base de référence ou de référence pour l'évaluation des performances d'une technologie, d'un système ou d'une organisation. Les points de repère peuvent être établis sur la base de l'expérience interne ou de celle d'autres organisations ou encore par obligation légale et servent souvent à évaluer l'évolution des performances en fonction du temps.

Politiques: Les politiques sont engagées et/ou prescrites par un gouvernement – souvent de concert avec les milieux d'affaires et des entreprises établies dans un seul pays ou collectivement avec d'autres pays –, afin d'accélérer l'application des mesures d'atténuation et d'adaptation. Au nombre des politiques figurent les mécanismes d'appui pour l'approvisionnement en énergies renouvelables, les taxes sur le carbone ou l'énergie et les normes en matière de rendement des carburants pour les véhicules automobiles. Par ***politiques communes et coordonnées*** ou ***politiques harmonisées***, on entend les politiques adoptées conjointement par les parties concernées. Voir aussi *Mesures*.

Pompe à chaleur: Installation qui assure un transfert de chaleur d'un endroit froid à un endroit plus chaud, à l'inverse des flux de chaleur naturels (voir *Transfert d'énergie*). Techniquement semblables à un réfrigérateur, les pompes à chaleur servent à extraire la chaleur de milieux ambiants tels que le sol (source géothermique ou constituée par le sol), l'eau ou l'air. Les pompes à chaleur peuvent être «inversées» pour assurer un refroidissement en été.

Potentiel: Plusieurs niveaux de potentiels d'alimentation en énergies renouvelables peuvent être distingués, bien que chacun d'eux puisse englober un vaste domaine. Dans le présent rapport, le **potentiel en matière de ressources** englobe tous les niveaux pour une source d'énergie renouvelable donnée.

Potentiel du marché: quantité d'énergie renouvelable susceptible d'être produite dans les conditions prévues du marché, déterminées par les agents économiques privés et réglementées par les pouvoirs publics. Les agents économiques privés réalisent des objectifs privés dans des conditions données, ressenties et prévues. Les potentiels du marché sont fondés sur les revenus et dépenses privés prévus, calculés en prix du privé (compte tenu des subventions, des taxes et des rentes) et avec les taux d'actualisation du privé. Le contexte propre au privé est en partie défini par les politiques des pouvoirs publics.

Potentiel économique: quantité d'énergie renouvelable susceptible d'être produite lorsque l'ensemble des coûts et avantages sociaux liés à ce résultat sont pris en compte, ce qui suppose une totale transparence de l'information, et en admettant que les échanges économiques instaurent un équilibre général caractérisé par une efficience spatiale et temporelle. Le prix des externalités négatives et des avantages connexes de tous les emplois de l'énergie et des autres activités économiques est fixé. Les taux d'actualisation sociaux préservent les intérêts des générations humaines futures.

Potentiel de développement durable: quantité d'énergie renouvelable susceptible d'être produite dans des conditions idéales se caractérisant par des marchés économiques parfaits, des systèmes sociaux optimaux (tant sur le plan institutionnel que sur celui de la gouvernance) et la réalisation d'un flux durable de biens et services environnementaux. Ce potentiel se distingue du potentiel économique en cela qu'il prend explicitement en compte les questions d'équité (de distribution) et de gouvernance inter et intragénérationnelles.

Potentiel technique: quantité d'énergie renouvelable susceptible d'être obtenue par suite d'une pleine application des technologies ou pratiques éprouvées. Il n'est fait aucune référence explicite aux coûts, aux obstacles ou aux politiques. Les potentiels techniques décrits dans des documents publiés

qui sont évalués dans le présent rapport peuvent cependant prendre en compte des contraintes pratiques, qui sont mentionnées dans le rapport pour peu qu'elles soient explicitement indiquées dans ces documents.

Potentiel théorique: le potentiel théorique est établi à partir de paramètres naturels et climatiques (physiques) (par exemple l'irradiation solaire à la surface d'un continent). Il peut être quantifié avec une assez bonne précision, mais présente un intérêt pratique limité. Il représente la limite supérieure de ce qui peut être produit à l'aide d'une source d'énergie sur la base des principes de la physique et des connaissances scientifiques actuelles. Il ne prend pas en compte les pertes d'énergie dues au processus de conversion nécessaire pour faire usage de la ressource ni aucune sorte d'obstacles.

Potentiel de réchauffement global (PRG): Indice fondé sur les propriétés radiatives d'un mélange homogène de gaz à effet de serre, qui sert à mesurer le forçage radiatif d'une unité de masse d'un tel mélange dans l'atmosphère actuelle, intégré pour un horizon temporel donné par rapport à celui du CO_2. Le PRG représente l'effet combiné des temps de séjour différents de ces gaz dans l'atmosphère et de leur pouvoir relatif d'absorption du rayonnement infrarouge sortant. Le Protocole de Kyoto classe les gaz à effet de serre en fonction de leurs PRG correspondant à des émissions par impulsions isolées sur une période de 100 ans. Voir aussi *Changement climatique* et *Émission d'équivalent CO_2*.

Prêts: Argent que les prêteurs du secteur public ou du secteur privé octroient aux emprunteurs, qui sont tenus de rembourser la somme nominale augmentée des intérêts. Les ***prêts consentis*** à des conditions avantageuses (on parle aussi de financement à des conditions de faveur) se caractérisent par des conditions de remboursement souples ou clémentes, généralement assorties d'un taux d'intérêt inférieur à ceux du marché ou nul. Ces prêts sont habituellement consentis par des organismes gouvernementaux et non pas par des institutions financières. Les ***emprunts convertibles*** donnent au créancier le droit de convertir le prêt en actions ordinaires ou privilégiées à un taux de conversion déterminé et dans un délai précis.

Principe pollueur-payeur: En 1972, l'OCDE est convenue que les pollueurs doivent prendre en charge les coûts de la lutte contre la pollution de l'environnement dont ils sont responsables, par exemple grâce à l'installation de filtres, d'unités d'assainissement et autres moyens techniques additionnels. Il s'agit là d'une définition restreinte. Selon une définition plus large, les pollueurs doivent en outre prendre en charge les dommages causés par leur pollution résiduelle (éventuellement aussi la pollution historique). Une autre extension de ce principe consiste dans le principe pollueur-payeur de précaution, selon lequel les pollueurs potentiels doivent prendre en charge les frais d'assurance ou les mesures préventives pour la pollution qui peut se produire à l'avenir. Le sigle PPP a aussi d'autres significations (partenariat public-privé, etc.).

Productivité énergétique: Réciproque de l'intensité énergétique.

Produit intérieur brut (PIB): Total de la valeur brute ajoutée, aux prix d'acquisition, par tous les producteurs résidents et non résidents dans l'économie, auquel on ajoute toutes les taxes et on retranche toutes les subventions non comprises dans la valeur des produits, dans une zone géographique ou un pays déterminé pour une période de temps donnée, en général un an. Dans le calcul du produit intérieur brut, il n'est pas tenu compte de la dépréciation des biens fabriqués ni de la raréfaction et de la dégradation des ressources naturelles.

Protocole de Kyoto: Le Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a été adopté à la troisième session de la Conférence des Parties à la CCNUCC, qui s'est tenue en 1997 à Kyoto. Il comporte des engagements contraignants, en plus de ceux qui figurent dans la CCNUCC. Les pays visés à l'annexe B du Protocole sont convenus de ramener leurs émissions anthropiques de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitreux, hydrofluorocarbones, hydrocarbures perfluorés et hexafluorure de soufre) à 5 % au moins au-dessous de leurs niveaux de 1990 pour la période d'engagement 2008-2012. Le Protocole de Kyoto est entré en vigueur le 16 février 2005. Voir aussi *CCNUCC*.

Puissance: Rythme auquel l'énergie est transférée ou convertie par unité de temps ou rythme auquel un travail est effectué. La puissance s'exprime en watts (joules/seconde).

Puissance réactive: Partie de la puissance instantanée qui ne produit réellement aucun travail. Sa fonction consiste à établir et maintenir les champs électriques et magnétiques requis pour que la puissance active accomplisse un travail utile.

Puits: Tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre ou d'aérosol.

«puits-à-la-roue» (Méthode dite du –) (WTW): Méthode consistant en une analyse particulière du cycle de vie, appliquée aux carburants et à leur utilisation dans les véhicules. Cette méthode prend en compte l'extraction de la ressource, la production du carburant, l'acheminement du carburant jusqu'au réservoir du véhicule et l'emploi final du carburant aux fins de déplacement du véhicule. Bien que les matières premières biologiques utilisées pour produire de nouveaux carburants ne proviennent pas nécessairement de puits, on a conservé les expressions «puits-au-réservoir» et «puits-à-la-roue» pour l'analyse concernant les carburants.

«puits-au-réservoir» (Méthode dite du –) (WTT): Méthode d'analyse prenant en compte les activités allant de l'extraction de la ressource au remplissage du réservoir du véhicule en carburant en passant par la production du carburant. Contrairement à la méthode dite du «puits-à-la-roue», cette méthode ne tient pas compte de l'utilisation du carburant aux fins de déplacement du véhicule.

Quota (en matière d'électricité ou d'énergie renouvelable): L'établissement de quotas oblige les parties désignées (producteurs ou fournisseurs) à respecter des objectifs minimaux (souvent graduellement croissants) en matière d'énergies renouvelables, généralement exprimés en pourcentages des approvisionnements totaux ou en une quantité d'énergie

renouvelable à produire, les coûts étant pris en charge par les consommateurs. Les pays utilisent différents noms pour les quotas (normes standard relatives aux sources d'énergie renouvelable, obligations en matière d'énergies renouvelables, etc.). Voir aussi *Certificats négociables*.

Rayonnement solaire: Le Soleil émet par rayonnement une énergie lumineuse et thermique dans des longueurs d'onde allant de l'ultraviolet à l'infrarouge. Le rayonnement qui arrive sur une surface peut être absorbé, réfléchi ou transmis. Le ***rayonnement solaire global*** consiste en un **rayonnement direct** (arrivant à la surface de la Terre en ligne droite) et en un **rayonnement diffus** (arrivant à la surface de la Terre après avoir été diffusé par l'atmosphère et les nuages).

Reboisement: Action humaine consistant à convertir directement en forêts (par plantation, ensemencement et/ou promotion de l'ensemencement naturel) des terres anciennement forestières converties à d'autres usages. Voir également *Boisement*, *Déboisement* et *Utilisation des terres*.

Réglementation: Règle ou instruction émanant des pouvoirs publics ou d'organismes de réglementation et ayant force de loi. Les réglementations mettent en œuvre des politiques et sont généralement propres à des groupes de personnes, des entités juridiques ou des activités ciblées particuliers. La réglementation est aussi l'acte consistant à concevoir et imposer des règles ou des instructions. Diverses contraintes d'ordre informationnel, transactionnel, administratif et politique limitent en pratique la capacité des responsables de la réglementation de mettre en œuvre les politiques recommandées.

Régulation de la production: La production d'électricité dans une installation de production d'énergie renouvelable peut faire l'objet de diverses régulations. Une ***régulation active*** est une intervention délibérée visant à modifier le fonctionnement d'un système (par exemple la **régulation du pas** d'une éolienne consiste à modifier l'orientation des pales pour optimiser la production). Une ***régulation passive*** a lieu lorsque des forces naturelles corrigent le fonctionnement d'un système (par exemple la **régulation par décrochage** d'une éolienne consiste à donner aux pales une forme telle qu'à la vitesse souhaitée, elles laissent le vent s'échapper, de façon à contrôler automatiquement la production).

Rendement énergétique: Rapport de la quantité d'énergie utile ou d'autres produits physiques utiles obtenue au moyen d'un système, d'un procédé de conversion ou d'une activité de transport ou de stockage à la quantité d'énergie consommée (mesuré en kWh/kWh, en tonnes/kWh ou en toute autre unité de mesure physique des produits utiles comme le nombre de tonnes par kilomètre transporté). Le rendement énergétique est une composante de l'intensité énergétique.

Renforcement des capacités: Dans le cadre des politiques ayant trait aux changements climatiques, processus consistant à améliorer les compétences techniques et la capacité (la façon de faire) et les moyens institutionnels des pays, afin de leur permettre de participer à tous les aspects de l'adaptation aux effets des changements climatiques, de l'atténuation des effets de ces changements et des travaux de recherche connexes. Voir aussi *Capacité d'atténuation*.

Répartition (répartition de l'énergie): La gestion des systèmes d'alimentation électrique qui sont constitués d'un grand nombre d'unités et de réseaux est assurée par des opérateurs de système. Ceux-ci permettent aux générateurs de fournir de l'énergie au système pour équilibrer l'offre et la demande de manière fiable et économique. Les unités de production peuvent faire l'objet d'une pleine répartition lorsqu'elles peuvent être mises en charge de zéro à leur capacité nominale sans retard majeur. Ne peuvent faire l'objet d'une telle répartition les sources d'énergie renouvelable variables qui dépendent de courants naturels, mais aussi les grandes centrales thermiques avec leurs faibles taux d'accroissement pour une éventuelle modification de leur production. Voir aussi *Maintien à l'équilibre de l'énergie disponible*, *Capacité* et *Réseau*.

Réseau électrique: Réseau constitué de fils, de commutateurs et de transformateurs servant à acheminer l'électricité des sources d'énergie aux utilisateurs. Un grand réseau comprend à la fois des sous-systèmes d'alimentation à basse tension (110 à 240 volts), à moyenne tension (1 à 50 kilovolts) et à haute tension (50 kV à plusieurs MV). Les réseaux interconnectés couvrent de larges zones jusqu'à des continents entiers. Le réseau est une plate-forme d'échange d'énergie qui rend l'approvisionnement plus fiable et assure des économies d'échelle. Pour un producteur d'énergie, la ***connexion au réseau*** est le facteur primordial aux fins d'exploitation économique. Les ***codes réseau*** sont les conditions techniques en matière de matériel et d'exploitation que tout producteur d'énergie doit respecter pour avoir accès au réseau; de plus, les connexions des consommateurs doivent satisfaire aux règles techniques. L'***accès au réseau*** va de pair avec le fait que les producteurs d'énergie acceptent d'alimenter le réseau. L'***intégration du réseau*** harmonise la production d'énergie assurée par toute une série de sources d'énergie diverses et parfois variables en un réseau électrique équilibré. Voir aussi *Transport et distribution*.

Saut d'étapes: Possibilité, pour les pays en développement, de sauter plusieurs étapes du développement technologique et de passer directement aux technologies avancées «propres». Le saut d'étapes peut permettre aux pays en développement de progresser sur une voie de développement caractérisée par des émissions réduites.

Scénario: Description vraisemblable de ce que nous réserve l'avenir, fondée sur un ensemble cohérent et intrinsèquement homogène d'hypothèses concernant les principales relations et forces motrices (rythme de l'évolution technologique, prix, etc.) intervenant dans le développement économique et social, l'utilisation d'énergie, etc. Les scénarios ne sont ni des prédictions ni des prévisions, mais permettent cependant de mieux cerner les conséquences d'une évolution ou d'actions différentes. Voir aussi *Base de référence*, *Maintien du statu quo* et *Modèles*.

Secteur ou économie non structuré: Généralement caractérisé par des unités de production opérant à petite échelle et à faible niveau d'organisation, avec peu ou pas de distinction entre la main-d'œuvre et le capital comme facteurs de production et dans le but primordial d'assurer un revenu

et un emploi aux personnes concernées. L'activité économique du secteur non structuré n'est pas prise en compte dans la détermination de l'activité économique sectorielle ou nationale.

Sécurité énergétique: Objectif que doit se fixer un pays donné, ou la communauté internationale dans son ensemble, pour s'assurer d'un approvisionnement en énergie approprié. Les mesures en la matière consistent à sauvegarder l'accès aux sources d'énergie, à favoriser l'élaboration et la mise en œuvre de technologies appropriées, à mettre en place une infrastructure permettant de produire, stocker et acheminer l'énergie requise, à garantir des contrats de distribution exécutoires et à assurer l'accès à l'énergie à des prix abordables pour une population donnée ou certains groupes en son sein.

Services énergétiques: Tâches à accomplir au moyen d'énergie. Un service énergétique donné tel que l'éclairage peut être fourni par un certain nombre de moyens allant de la lumière du jour et de la lampe à huile aux luminaires à incandescence, à fluorescence ou à diodes électroluminescentes. La quantité d'énergie servant à assurer un service peut varier d'un facteur de 10 ou plus, et les émissions de gaz à effet de serre correspondantes peuvent varier d'une valeur nulle à une valeur très élevée selon la source d'énergie et le type de dispositif d'utilisation finale.

Sismicité: Distribution et fréquence des tremblements de terre en fonction du temps, de l'intensité et du lieu; il peut s'agir, par exemple, du nombre annuel de tremblements de terre de magnitude comprise entre 5 et 6 par 100 km^2 ou dans une région donnée.

Subvention: Initiative gouvernementale consistant à octroyer directement des crédits ou à accorder une réduction d'impôt à une entité privée afin de faciliter la mise en œuvre d'une pratique que le gouvernement souhaite promouvoir. On encourage la réduction des émissions de gaz à effet de serre en restreignant les subventions existantes qui ont pour effet d'augmenter ces émissions (par exemple les subventions destinées à favoriser l'utilisation des combustibles fossiles) ou en octroyant des subventions destinées à encourager les pratiques qui contribuent à réduire ces émissions ou à renforcer les puits (par exemple grâce à des projets axés sur les énergies renouvelables, à l'isolation des bâtiments ou à la plantation d'arbres).

Tarif d'alimentation: Prix par unité d'électricité que doit payer une entreprise de distribution d'énergie ou une compagnie d'électricité pour l'électricité distribuée ou renouvelable qui est fournie au réseau par des générateurs sans vocation de service public. Une autorité publique détermine le tarif. Un tarif peut aussi être défini pour favoriser l'alimentation en chaleur renouvelable.

Taux de progrès – Voir *Courbe ou taux d'apprentissage*.

Taxe: La **taxe sur le carbone** est un impôt sur la teneur en carbone des combustibles fossiles. Puisque pratiquement tout le carbone présent dans ces combustibles est en définitive rejeté sous forme de CO_2, une taxe sur le carbone équivaut à une taxe sur les émissions de CO_2. Une **taxe sur l'énergie** – un impôt sur le contenu énergétique des combustibles – contribue à réduire la demande d'énergie et, par conséquent, les émissions de CO_2 dues à l'emploi de combustibles fossiles. Une **écotaxe** est une taxe sur le carbone, les émissions ou l'énergie qui vise à influencer le comportement humain (notamment sur le plan économique), de sorte qu'il ne porte pas atteinte à l'environnement. Un crédit d'impôt est une réduction de taxe visant à stimuler l'achat d'un produit donné ou l'investissement dans ce produit, par exemple certaines techniques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les termes **impôt** ou **imposition** sont utilisés comme synonyme de taxe.

Technologie: Mise en pratique de connaissances en vue d'accomplir des tâches particulières qui nécessitent à la fois des artefacts techniques (matériel et équipement) et des informations (sociales) («logiciels», savoir-faire pour la production et l'utilisation des artefacts). ***Soutien de l'offre:*** démarche consistant à promouvoir l'élaboration de technologies spécifiques en favorisant les activités de recherche-développement et de démonstration. ***Soutien de la demande:*** démarche consistant à mettre en place des incitations commerciales ou autres pour favoriser la mise en œuvre d'ensembles particuliers de technologies (par exemple des technologies à faible intensité de carbone par le biais d'une fixation du prix du carbone) ou de technologies particulières (par exemple par le biais de tarifs promotionnels pour les technologies privilégiées)

Technologie pauvre en carbone: Technologie qui produit, durant son cycle d'application, des émissions d'équivalent-CO_2 presque nulles. Voir également *Émissions*.

Transfert d'énergie: L'énergie est transférée sous forme de travail, de lumière ou de chaleur. Le **transfert thermique** s'effectue de façon spontanée, des objets les plus chauds aux objets les moins chauds, selon les catégories suivantes: conduction (lorsque les objets sont en contact), convection (lorsqu'un fluide comme l'air ou l'eau se réchauffe au contact d'un objet à température relativement élevée et se déplace vers un objet plus froid à qui il transmet de la chaleur) et rayonnement (lorsque la chaleur se propage à travers l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques).

Transfert de technologie: Échange de connaissances, de matériel et de logiciels connexes, de moyens financiers et de biens entre les différentes parties prenantes, qui favorise la diffusion des technologies d'adaptation aux changements climatiques ou d'atténuation de leurs effets. L'expression recouvre à la fois la diffusion de technologies et la mise en place d'une coopération technique dans les pays et entre les pays.

Transport et distribution (électricité): Le réseau transmet l'électricité par l'intermédiaire de fils reliant les lieux de production aux lieux de consommation. Le système de distribution consiste en un système basse tension qui achemine réellement l'électricité vers les utilisateurs finals. Voir aussi *Réseau*.

Turbine: Dispositif qui convertit l'énergie cinétique d'un écoulement d'air, d'eau, de gaz chaud ou de vapeur en énergie mécanique rotative, laquelle est utilisée aux fins d'entraînement direct ou pour la production d'électricité (voir éolienne, hydroturbine, turbine à gaz ou turbine à vapeur). Dans les **turbines à vapeur à condensation**, la vapeur d'échappement est envoyée dans un échangeur de chaleur (appelé condenseur) mettant à profit le refroidissement ambiant assuré par des sources d'eau (cours d'eau, lacs, mer) ou d'air (tours de refroidissement). Les **turbines à vapeur à contrepression**, pour leur part, sont dépourvues de condenseurs aux conditions de température

ambiante, mais dégagent toute leur vapeur à des températures plus élevées aux fins d'emplois finals tels que le chauffage.

Turbine à gaz à cycle mixte: Centrale associant deux procédés pour la production d'électricité. En premier lieu, une turbine à gaz est alimentée par du gaz ou du mazout léger, ce qui dégage des gaz de combustion à haute température (plus de 600 °C). En second lieu, la récupération de cette chaleur, conjuguée à un allumage supplémentaire, produit de la vapeur qui entraîne une turbine à vapeur, laquelle fait tourner des alternateurs distincts. On parle de **turbine à gaz à cycle mixte intégrée** lorsque le combustible utilisé est du gaz synthétique produit par un gazogène à charbon ou à biomasse, des échanges de flux d'énergie ayant lieu entre les gazogènes et les centrales à turbines à gaz à cycle mixte.

Utilisation des terres (changement d'affectation des terres, direct et indirect): Ensemble des dispositions prises, des activités menées et des apports pour un type de couverture du sol donné. Objectifs sociaux et économiques de l'exploitation des terres (pâturage, exploitation forestière et conservation, par exemple). Des ***changements d'affectation des terres*** interviennent lorsque les terres sont affectées à d'autres usages, par exemple lorsque la forêt est transformée en terres agricoles ou en zone urbaine. Comme les divers modes d'utilisation des terres correspondent à différents potentiels de séquestration du carbone (ce potentiel est par exemple plus élevé pour les forêts que pour les terres agricoles ou les zones urbaines), les changements d'affectation des terres peuvent donner lieu à des émissions nettes ou à une absorption de carbone. Les ***changements d'affectation des terres indirects*** font référence à des changements soumis à l'influence du marché ou orientés par des politiques qui ne peuvent être directement imputés à des décisions de particuliers ou de groupes en matière de gestion de l'utilisation des terres. Par exemple, si des terres agricoles sont utilisées pour produire des biocarburants, un déboisement peut avoir lieu ailleurs pour remplacer les anciennes cultures. Voir aussi *Boisement*, *Déboisement* et *Reboisement*.

Valeur: Qualité essentielle d'un objet qui le fait apprécier par celui qui le possède, désire le posséder ou l'utilise. La définition de la valeur varie selon les disciplines des sciences sociales. En ce qui concerne la nature et l'environnement, on distingue les valeurs intrinsèques et les valeurs instrumentales, ces dernières étant assignées par l'homme. Parmi les valeurs instrumentales, il en existe tout une série (d'ailleurs fluctuante), et notamment la valeur d'usage (direct et indirect), la valeur d'option, la valeur patrimoniale, la valeur de fortuité, la valeur de transmission et la valeur d'existence.

En économie, la valeur totale de toute ressource est généralement définie comme la somme des valeurs propres aux différentes parties qui contribuent à l'utilisation de cette ressource. La valeur économique, sur laquelle est fondée l'estimation des coûts, s'évalue d'après la volonté de payer de la part de ceux qui se procurent la ressource ou le consentement à accepter un paiement de la part de ceux qui s'en défont.

Valeur actuelle: La valeur d'une somme d'argent varie en fonction du temps (de l'année considérée). Pour pouvoir comparer et additionner des montants disponibles à des moments différents, on fixe une date correspondant au moment «actuel». Les montants disponibles à différents moments dans l'avenir sont réactualisés à leur valeur actuelle et additionnés pour obtenir la valeur actuelle d'une série de disponibilités futures. La **valeur actuelle nette** correspond à la différence entre la valeur actuelle des recettes (bénéfices) et la valeur actuelle des coûts. Voir également *Actualisation*.

Valeur ajoutée: Production nette d'un secteur ou d'une activité après addition de la valeur de tous les produits obtenus et soustraction de tous les facteurs de production intermédiaires.

«Vallée de la mort»: Expression correspondant à une phase de la mise au point d'une technologie donnée, pendant laquelle l'accroissement des coûts de mise au point entraîne un important flux de trésorerie négatif, tandis que les risques liés à cette technologie ne sont pas assez atténués pour attirer des investisseurs privés.

Vecteur d'énergie: Substance permettant d'exécuter un travail mécanique ou d'effectuer un transfert de chaleur. Au nombre des vecteurs d'énergie figurent les combustibles solides, liquides ou gazeux (biomasse, charbon, pétrole, gaz naturel, hydrogène, etc.), les fluides pressurisés, chauffés ou refroidis (air, eau vapeur) et le courant électrique.

Véhicule hybride: Tout véhicule utilisant deux sources de propulsion, et notamment les véhicules propulsés par un moteur à combustion interne couplé à un moteur électrique et à des accumulateurs.

Abréviations

AEPC	Alternative Energy Promotion Centre (Centre de promotion des énergies de substitution)
AIE	Agence internationale de l'énergie
APU	auxiliary power unit (groupe auxiliaire de bord)
AVCI	année de vie corrigée du facteur invalidité
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Ministère fédéral allemand de l'environnement, de la protection de la nature et de la sûreté nucléaire)
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
c.a.	courant alternatif
c.c.	courant continu
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CEI	Communauté des États indépendants
CEI	Commission électrotechnique internationale
CHG	chauffage d'habitations par granulés
CHP	production combinée de chaleur et d'électricité; cogénération
CIBG	Commission internationale des grands barrages
CMA	Administration météorologique chinoise
CMA_{ca}	coût moyen actualisé des carburants
$CMA_{él}$	coût moyen actualisé de l'électricité
CMA_{th}	coût moyen actualisé de l'énergie thermique (de la chaleur)
CNUCED	Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement
CNUED	Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement
CNUSTD	Centre des Nations Unies pour la science et la technique au service du développement
COP	coefficient de performance
CRO	cycle de Rankine à fluide (ou caloporteur) organique
CSC	captage et stockage du dioxyde de carbone (CO_2)
CSIRO	Organisation de la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth
CVC	chauffage, ventilation et climatisation
dBA	décibel pondéré en gamme A
DEL	diode électroluminescente
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Centre aérospatial allemand)
DPI	droits de propriété intellectuelle
DUS	déchets urbains solides
ECS	eau chaude sanitaire
EGTT	Groupe d'experts du transfert de technologies
EMEC	European Marine Energy Centre (Centre européen de l'énergie marine)
EMI	interférence électromagnétique
EPRI	Electric Power Research Institute (États-Unis d'Amérique)
EREC	Conseil européen des énergies renouvelables
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program (Programme d'assistance à la gestion du secteur énergétique)
ETBE	éther de t-butyle et d'éthyle
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEM	Fonds pour l'environnement mondial
GES	gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GNC	gaz naturel comprimé
GNL	gaz naturel liquéfié
GPL	gaz de pétrole liquéfiés
GPS	système de positionnement global
ICTSD	International Centre for Trade and Sustainable Development (Centre international pour le commerce et le développement durable)
IDH	indicateur du développement humain
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens)
IHA	International Hydropower Association (Association internationale pour l'hydroélectricité)
IREDA	Agence indienne de développement des énergies renouvelables
IRENA	Agence internationale pour les énergies renouvelables
ISES	Société internationale d'énergie solaire
ISO	Organisation internationale de normalisation
J	joule
LFC	lit fluidisé circulant
MCI	moteur à combustion interne
MCM	modèle climatique mondial
MDP	mécanisme de développement propre
MITI	Ministry of International Trade and Industry (Ministère du commerce extérieur et de l'industrie) (Japon)
NASA	Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace
NDRC	Commission nationale pour le développement et la réforme (Chine)
Nm^3	normo mètre cube (ou mètre cube normal)
NRC	National Research Council (Conseil national de la recherche) (États-Unis d'Amérique)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (Laboratoire national des énergies renouvelables)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OGM	organisme génétiquement modifié
OMC	Organisation mondiale du commerce
OMD	objectifs du Millénaire pour le développement
ONG	organisation non gouvernementale

ONU	Organisation des Nations Unies
OTEC	conversion de l'énergie thermique des mers (conversion ETM)
PCG	pompe à chaleur géothermique
PCI	pouvoir calorifique inférieur
PCS	pouvoir calorifique supérieur
PIB	produit intérieur brut
PME	petites et moyennes entreprises
PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
PPN	production primaire nette
Proálcool	Programa Nacional do Álcool (Programme national de production d'éthanol) (Brésil)
PSI	Institut Paul-Scherrer
RBMK	Reaktory Bolshoi Moshchnosti Kanalnye (réacteur de forte puissance à tubes de force ou réacteur RBMK)
RCE	réduction certifiée des émissions
REP	réacteur à eau sous pression
SEGS	centrale solaire SEGS (Californie)
SIG	système d'information géographique
SNV	Netherlands Development Organization (Organisation néerlandaise de développement)
SRES	Rapport spécial du GIEC consacré aux scénarios d'émissions
SRREN	Rapport spécial du GIEC sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation des effets des changements climatiques
TPWind	Plate-forme technologique européenne consacrée à l'énergie éolienne
UE	Union européenne
V	volt
VAN	valeur actualisée nette
W	watt
WBG	Groupe Banque mondiale
Wc	watt-crête
WCD	Commission mondiale des barrages
WCED	Commission mondiale de l'environnement et du développement
WTT	«puits-au-réservoir» (méthode dite du –)
WTW	«puits-à-la-roue» (méthode dite du –)

Symboles chimiques

C	carbone
CdS	sulfure de cadmium
CdTe	tellurure de cadmium
CH_4	méthane
CH_3CH_2OH	éthanol
CH_3OCH_3	méthoxyméthane
CH_3OH	méthanol
CIGS	diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium
Cl	chlore
CO	monoxyde de carbone
CO_2	dioxyde de carbone
Cu	cuivre
$CuInSe_2$	diséléniure de cuivre et d'indium
Fe	fer
GaAs	arsénure de gallium
H_2	hydrogène gazeux
H_2O	eau
H_2S	sulfure d'hydrogène
HFC	hydrofluorocarbone
K	potassium
Mg	magnésium
N	azote
N_2	azote gazeux
N_2O	oxyde de diazote (ou oxyde nitreux)
Na	sodium
Na-S	sodium-soufre
NH_3	ammoniac
Ni	nickel
Ni-Cd	nickel-cadmium
NO_x	oxydes d'azote
O_3	ozone
P	phosphore
PFC	hydrocarbure perfluoré
SF_6	hexafluorure de soufre
Si	silicium
SiC	carbure de silicium
SO_2	dioxyde de soufre
ZnO	oxyde de zinc

Préfixes (unités standard internationales)

Symbole	Multiplicateur	Préfixe	Symbole	Multiplicateur	Préfixe
Z	10^{21}	zetta	d	10^{-1}	deci
E	10^{18}	exa	c	10^{-2}	centi
P	10^{15}	peta	m	10^{-3}	milli
T	10^{12}	tera	µ	10^{-6}	micro
G	10^{9}	giga	n	10^{-9}	nano
M	10^{6}	mega	p	10^{-12}	pico
k	10^{3}	kilo	f	10^{-15}	femto
h	10^{2}	hecto	a	10^{-18}	atto

ANNEXE II

Méthodologie

Rédacteurs:
William Moomaw (États-Unis d'Amérique), Peter Burgherr (Suisse),
Garvin Heath (États-Unis d'Amérique), Manfred Lenzen (Australie, Allemagne),
John Nyboer (Canada), Aviel Verbruggen (Belgique)

La présente annexe doit être citée ainsi:
Moomaw, W., P. Burgherr, G. Heath, M. Lenzen, J. Nyboer et A. Verbruggen, 2011: Annexe II: Méthodologie. In Rapport spécial du GIEC sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation des effets des changements climatiques [sous la direction de O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer et C von Stechow], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, NY, États-Unis d'Amérique

Table des matières

A.II.1 Introduction ... 183

A.II.2 Paramètres d'analyse employés dans le présent rapport ... 183

A.II.3 Évaluation financière des technologies sur la durée de vie des projets ... 183

A.II.3.1 Valeurs constantes (réelles) ... 183

A.II.3.2 Actualisation et valeur nette actuelle ... 183

A.II.3.3 Coûts moyens actualisés ... 184

A.II.3.4 Coefficient d'actualisation ou de récupération du capital ... 184

A.II.4 Comptabilisation de l'énergie primaire ... 184

A.II.5 Analyse du cycle de vie et analyse des risques ... 186

A.II.5.1 Durée d'amortissement de l'énergie et quotient énergétique ... 187

A.II.5.2 Études des évaluations sur le cycle de vie des technologies de production d'électricité ... 187
A.II.5.2.1 Méthodes employées pour l'étude ... 188
A.II.5.2.2 Liste des références ... 189

A.II.5.3 Étude de l'utilisation opérationnelle d'eau pour des technologies de production d'électricité ... 199
A.II.5.3.1 Méthodes employées pour l'étude ... 199
A.II.5.3.2 Liste des références ... 200

A.II.5.4 Analyse des risques ... 201

A.II.6 Définitions régionales et regroupements par pays ... 202

A.II.7 Facteurs généraux de conversion de l'énergie ... 205

A.II.1 Introduction

Les parties doivent convenir de données, de normes, de théories connexes et de méthodes communes. La présente annexe résume un ensemble de conventions et de méthodes convenues. Celles-ci incluent la conception de paramètres, la détermination d'une année de référence, la définition de méthodes et la cohérence de protocoles qui permettent une comparaison légitime entre divers types d'énergie dans le contexte des phénomènes liés au changement climatique. La présente section porte sur ces définitions et notions fondamentales, utilisées dans tout le rapport, compte tenu du fait que la documentation présente souvent des définitions et des hypothèses contradictoires.

Le présent rapport traite de l'incertitude lorsque cela se justifie, en montrant par exemple les résultats d'analyses de sensibilité et en présentant quantitativement des fourchettes de coûts et des fourchettes de résultats des scénarios. Il n'est pas fait usage, dans ce rapport, de la terminologie officielle du GIEC concernant l'incertitude, du fait qu'au moment de son approbation, les indications du GIEC concernant l'incertitude étaient en cours de révision.

A.II.2 Paramètres d'analyse employés dans le présent rapport

Certains paramètres peuvent être énoncés simplement ou sont relativement faciles à définir. L'annexe II présente l'ensemble des paramètres convenus. On trouvera ci-après ceux qui nécessitent une description plus détaillée. Dans ce rapport, les unités employées et les paramètres de base concernant l'analyse de chaque type d'ÉR sont les suivants:

- Le Système international d'unités (SI) pour les normes et les unités;
- Les tonnes métriques (t) pour le CO_2 et l'éqCO_2;
- Les exajoules (EJ) pour l'énergie primaire;
- Les facteurs de conversion de l'énergie de l'AIE entre unités physiques et unités d'énergie;
- La capacité en GW thermiques (GW_{th}) et en GW électriques ($GW_{él}$);
- Le coefficient d'utilisation de la capacité;
- La durée de vie technique et économique;
- Une comptabilité transparente de l'énergie (par ex. lors de la transformation de l'énergie nucléaire ou hydraulique en électricité);
- Le coût d'investissement en dollars É.-U./kW (capacité de pointe);
- Le coût de l'énergie en dollars É.-U.$_{2005}$/kWh ou en dollars É.-U.$_{2005}$/EJ;
- La valeur des monnaies en dollars É.-U.$_{2005}$ (au taux de change du marché le cas échéant, sans tenir compte de la parité du pouvoir d'achat);
- Les taux d'actualisation utilisés: 3, 7 et 10 %;
- Les perspectives énergétiques mondiales de 2008 quant aux hypothèses concernant le prix des combustibles fossiles;
- L'année de référence: 2005 pour tous les éléments (population, capacité, production, coûts). On notera que des données plus récentes peuvent également être incluses (par ex. la consommation d'énergie en 2009);
- Les années d'échéance: 2020, 2030 et 2050.

A.II.3 Évaluation financière des technologies sur la durée de vie des projets

Les paramètres définis ici donnent la base à partir de laquelle un type de ressource renouvelable (ou un projet) peut être comparé à un autre. Pour rendre les projets ou les ressources comparables, du moins en matière de coûts, les coûts pouvant intervenir à divers moments (par ex. lors d'années différentes) sont représentés par un seul nombre fixé pour une année donnée, à savoir l'année de référence (2005). Les manuels sur l'évaluation des investissements donnent la base des notions de valeurs constantes, d'actualisation, du calcul de la valeur actuelle nette et des coûts moyens actualisés, par exemple (Jelen et Black, 1983).

A.II.3.1 Valeurs constantes (réelles)

Les analyses des coûts sont exprimées en dollars constants ou réels[1] (c.-à-d. en excluant les incidences de l'inflation) pour une année donnée, l'année de référence – 2005 –, en dollars É.-U. Dans certaines études sur lesquelles est fondé le rapport, on peut utiliser les taux de change par défaut ou les parités du pouvoir d'achat, mais lorsque ceux-ci font partie de l'analyse, ils sont énoncés clairement et, si possible, convertis en dollars É.-U.$_{2005}$.

Lorsque les séries monétaires des analyses sont exprimées en dollars réels, il faut, par souci de cohérence, que le taux d'actualisation soit également réel (sans élément lié à l'inflation). Cette cohérence n'est souvent pas respectée: les études parlent de «taux observés d'intérêt du marché» ou de «taux observés d'actualisation», qui tiennent compte de l'inflation ou des attentes concernant l'inflation. Les taux d'intérêt «réels/constants» ne sont jamais observés directement, mais sont déduits de l'identité ex post:

$$(1+m) = (1+i) \times (1+f) \qquad (1)$$

où

m = taux nominal (%)
i = taux réel ou constant (%)
f = taux d'inflation (%)

L'année de référence pour l'actualisation et l'année de référence pour la fixation de prix constants peuvent être différentes dans les études présentées dans les divers chapitres. Nous nous sommes efforcés autant que possible d'harmoniser les données pour tenir compte des taux d'actualisation employés ici.

A.II.3.2 Actualisation et valeur nette actuelle

Les agents privés donnent moins de valeur aux éléments éloignés dans l'avenir qu'aux éléments actuels du fait d'une «préférence pour la consommation présente» ou pour tenir compte du «rendement des investissements». L'actualisation réduit les futurs mouvements de trésorerie d'une valeur inférieure à 1. Si l'on applique cette règle à une série de flux nets de trésorerie exprimés en dollars É.-U. réels, la valeur actuelle nette (VAN) d'un projet peut être déterminée, donc comparée à celle d'autres projets, grâce à la formule:

$$VAN = \sum_{j=0}^{n} \frac{\textit{flux nets de trésorerie}(j)}{(1+i)^{j}} \qquad (2)$$

où

n = durée de vie du projet
i = taux d'actualisation

1 Le terme «réel» employé par les économistes risque d'être déroutant, car ce qu'ils appellent réel ne correspond pas à des flux financiers observés («nominaux», tenant compte de l'inflation), «réel» indiquant le pouvoir d'achat réel des flux en dollars constants.

Pour ce rapport, les spécialistes de l'analyse ont fait appel à trois valeurs du taux d'actualisation (i = 3, 7 et 10 %) en vue de l'évaluation des coûts. Les taux d'actualisation peuvent être caractéristiques de ceux utilisés, les plus élevés incluant une prime de risque. Ces taux font l'objet de nombreux débats, et nous ne pouvons proposer aucun paramètre ou directive clair pour déterminer une prime de risque adéquate. Ces débats ne sont pas présentés ici, notre objectif étant d'offrir un moyen de comparaison approprié entre projets, types d'énergies renouvelables et nouveaux éléments du système énergétique par rapport aux anciens.

A.II.3.3 Coûts moyens actualisés

Les coûts moyens actualisés sont utilisés pour évaluer les investissements dans la production d'énergie, où la production est quantifiable (MWh produits pendant la durée de vie de l'investissement). Le coût moyen actualisé est le coût correspondant au seuil de rentabilité où le revenu actualisé (prix x quantités)[2] est égal aux charges nettes actualisées:

$$C_{act} = \frac{\sum_{j=0}^{n} \frac{charges_j}{(1+i)^j}}{\sum_{j=0}^{n} \frac{quantités_j}{(1+i)^j}} \qquad (3)$$

où

C_{act} = coût moyen actualisé
n = durée de vie du projet
i = taux d'actualisation

A.II.3.4 Coefficient d'actualisation ou de récupération du capital

Une pratique très courante consiste à convertir une somme donnée d'argent au moment 0 en un nombre n de montants annuels constants au cours des n années à venir:

Soit A le montant annuel constant des paiements à effectuer sur n années
Soit B le montant à verser pour le projet au cours de l'année 0

On obtient A à partir de B en utilisant une variante légèrement modifiée de l'équation (2): le prêteur veut récupérer la somme B au taux d'actualisation i. La valeur actuelle nette de n fois les recettes A à l'avenir doit donc être exactement égale à B:

$$\sum_{j=1}^{n} \frac{A}{(1+i)^j} = B, \text{ ou: } A \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{(1+i)^j} = B \qquad (4)$$

Nous pouvons placer A avant la sommation, car il s'agit d'une constante (qui ne dépend pas de j).

La somme des coefficients d'actualisation (série géométrique finie) est déductible en tant que nombre particulier. Une fois ce nombre calculé, on trouve A en divisant B par celui-ci. C'est ce qu'on appelle le *coefficient de récupération du capital*, ou *coefficient d'actualisation*, δ. Tout comme la valeur actuelle nette, δ dépend des deux paramètres i et n:

$$\delta = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

On peut utiliser le coefficient de récupération du capital (ou δ) pour calculer rapidement les coûts moyens actualisés pour des projets très simples où les investissements au cours d'une année donnée sont les seules dépenses et où la production reste constante pendant la durée de vie n:

$$C_{act} \times Q = B \times \delta, \text{ d'où } C_{act} = (B \times \delta)/Q \qquad (5)$$

Ou, si l'on peut supposer que les frais d'exploitation et de maintenance (E&M) ne changent pas d'une année à l'autre:

$$C_{act} = \frac{B \times \delta + E\&M}{Q} \qquad (6)$$

où

C_{act} = coût moyen actualisé
B = coût d'investissement
Q = production
$E\&M$ = frais annuels d'exploitation et de maintenance
n = durée de vie du projet
i = taux d'actualisation

A.II.4 Comptabilisation de l'énergie primaire

Nous présentons ici la méthode de comptabilisation de l'énergie primaire utilisée dans l'ensemble du présent rapport. On emploie, pour diverses analyses de l'énergie, des méthodes de comptabilisation différentes qui conduisent à des résultats quantitatifs différents lors de l'établissement de l'utilisation actuelle d'énergie primaire et de l'emploi d'énergie dans des scénarios où sont étudiées de futures transitions énergétiques. Des définitions, des méthodes et des paramètres multiples sont appliqués. Des systèmes de comptabilisation de l'énergie sont utilisés dans la documentation souvent sans indication claire du système employé (Lightfoot, 2007; Martinot *et al.*, 2007). Un aperçu des différences de comptabilisation de l'énergie primaire dans diverses statistiques a été donné (Macknick, 2009), et les incidences de l'application de divers systèmes de comptabilisation dans l'analyse de scénarios à long terme ont été illustrées par Nakicenovic *et al.* (1998).

On utilise surtout trois méthodes distinctes pour rendre compte de l'énergie primaire. Alors que la comptabilisation des sources de combustibles, y compris toutes les formes d'énergie fossile et la biomasse, est sans équivoque et identique selon les diverses méthodes, ces méthodes font appel à diverses conventions sur la façon de calculer l'énergie primaire fournie par des sources d'énergie non combustibles, c'est-à-dire l'énergie nucléaire et toutes les sources d'énergie renouvelable à l'exception de la biomasse.

Ces méthodes sont les suivantes:

- La *méthode de la teneur en énergie physique* adoptée par exemple par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et Eurostat (AIE/OCDE/Eurostat, 2005);
- La *méthode de substitution*, utilisée selon des variantes légèrement différentes par BP (2009) et l'Energy Information Administration américaine (glossaire en ligne de l'Administration), qui publient tous deux des statistiques internationales sur l'énergie;

2 On parle aussi de prix moyen actualisé. Il est à noter que dans ce cas, les MWh sont actualisés.

- La *méthode de l'équivalent direct*, employée par la Division de statistique de l'ONU (2010) et dans de nombreux rapports du GIEC portant sur des scénarios relatifs à l'énergie et aux émissions à long terme (Nakicenovic et Swart, 2000; Morita *et al.*, 2001; Fisher *et al.*, 2007).

Pour les sources d'énergie non combustibles, on adopte, dans la *méthode de la teneur en énergie physique*, le principe selon lequel l'énergie primaire doit être la première forme d'énergie utilisée en aval dans le processus de production, pour laquelle de multiples utilisations de l'énergie sont possibles (AIE/OCDE/Eurostat, 2005). Cela mène au choix des formes d'énergie *primaire* suivantes:

- La chaleur pour l'énergie nucléaire, géothermique et solaire;
- L'électricité pour l'énergie hydroélectrique, éolienne, des marées, des vagues et des océans et solaire photovoltaïque.

Lorsqu'on emploie cette méthode, on suppose, pour l'équivalent en énergie primaire de l'énergie hydroélectrique et solaire photovoltaïque, par exemple, un rendement de 100 % de la conversion en «électricité primaire», de façon que l'énergie brute fournie pour la source soit de 3,6 MJ d'énergie primaire = 1 kWh d'électricité. On calcule l'énergie nucléaire à partir de la production brute en supposant un rendement de conversion thermique de 33 %[3], autrement dit 1 kWh = (3,6 ÷ 0,33) =10,9 MJ. Pour l'énergie géothermique, si aucune information d'origine nationale n'est disponible, on calcule l'équivalent en énergie primaire en posant un rendement de conversion de 10 % pour l'électricité géothermique (de façon que 1 kWh = (3,6 ÷ 0,1) = 36 MJ) et de 50 % pour la chaleur géothermique.

La *méthode de substitution* permet de présenter l'énergie primaire émanant de sources d'énergie non combustibles comme si elle remplaçait une énergie combustible. On notera toutefois que, dans diverses variantes de la méthode de substitution, on fait appel à des coefficients de conversion quelque peu différents. Par exemple, BP applique un rendement de conversion de 38 % pour l'électricité issue de l'énergie nucléaire et hydroélectrique, alors que le Conseil mondial de l'énergie emploie un coefficient de 38,6 % pour le nucléaire et les sources d'énergie renouvelable non combustibles (CMÉ, 1993) et que l'Energy Information Administration utilise des valeurs encore différentes. Macknick (2009) donne un aperçu plus complet. Pour calculer la chaleur utile produite par des sources d'énergie non combustibles, on utilise d'autres rendements de conversion.

Dans la *méthode de l'équivalent direct*, on compte une unité d'énergie secondaire fournie par des sources d'énergie non combustibles comme une unité d'énergie primaire; autrement dit, 1 kWh d'électricité ou de chaleur représente 1 kWh = 3,6 MJ d'énergie primaire. Cette méthode est utilisée principalement dans la documentation sur des scénarios à long terme, et notamment dans de nombreux rapports du GIEC (GIEC, 1995; Nakicenovic et Swart, 2000; Morita *et al.*, 2001; Fisher *et al.*, 2007), du fait qu'elle porte sur des transitions fondamentales de systèmes énergétiques fondées dans une grande mesure sur des sources d'énergie non combustibles et à faible intensité de carbone.

Dans ce rapport, nous utilisons des données de l'AIE, mais nous calculons la production d'énergie en utilisant la *méthode de l'équivalent direct*. La principale différence entre celle-ci et la *méthode de la teneur en énergie physique* concerne la quantité d'énergie primaire indiquée pour la production d'électricité à partir de la chaleur géothermique, le solaire thermodynamique, les gradients de température des océans et l'énergie nucléaire. Le tableau A.II.1 permet de comparer les quantités d'énergie primaire mondiale par source et en pourcentage en employant la *méthode de la teneur en énergie physique*, la *méthode de l'équivalent direct* et une variante de la *méthode de substitution* pour l'année 2008 à partir de données de l'AIE (IEA, 2010a). Dans les statistiques actuelles sur l'énergie, les principales différences, en valeur absolue, apparaissent quand on compare l'énergie nucléaire et l'énergie hydroélectrique. Comme ces deux formes d'énergie ont produit, sur le plan mondial, une quantité comparable d'électricité en 2008, selon la *méthode de l'équivalent direct* et la *méthode de substitution*, leur part de la consommation finale totale est semblable, alors que selon la *méthode de la teneur en énergie physique*, l'énergie nucléaire est égale à trois fois environ l'énergie hydroélectrique primaire.

Pour les autres méthodes présentées ci-dessus, nous soulignons divers aspects de l'approvisionnement en énergie primaire. C'est pourquoi une méthode peut être plus appropriée qu'une autre selon l'application. Toutefois, aucune de ces méthodes n'est supérieure aux autres sur tous les plans. En outre, il faut savoir que l'approvisionnement total en énergie primaire ne décrit pas intégralement un système énergétique, mais n'est qu'un indicateur parmi d'autres. Les bilans énergétiques publiés par l'AIE (2010a) offrent un ensemble beaucoup plus vaste d'indicateurs, ce qui permet de retracer le flux d'énergie depuis la source jusqu'à l'utilisation finale. Par exemple, en complétant la consommation totale d'énergie primaire avec d'autres indicateurs tels que la consommation totale finale d'énergie et la production d'énergie secondaire (électricité, chaleur, etc.) à partir de diverses sources, on peut lier les processus de conversion à l'utilisation finale d'énergie. On trouvera un résumé de cette approche à la figure 1.16 et dans le texte associé.

Aux fins du présent rapport, nous avons choisi la *méthode de l'équivalent direct* pour les raisons suivantes:

- Dans cette méthode, nous soulignons la perspective de l'énergie secondaire pour les sources d'énergie non combustibles, axe principal des analyses présentées dans les chapitres techniques (chapitres 2 à 7);
- Toutes les sources d'énergie non combustibles sont traitées de façon identique: on y considère la quantité d'énergie secondaire qu'elles produisent. Cela permet de comparer toutes les sources d'énergie renouvelable non productrices de CO_2 et d'énergie nucléaire sur une base commune. L'énergie primaire issue des combustibles fossiles et de la biomasse associe les pertes d'énergie secondaire et d'énergie thermique émanant du processus de conversion. Lorsque les combustibles fossiles ou les biocombustibles sont remplacés par l'énergie nucléaire ou par des technologies renouvelables autres que la biomasse, l'énergie primaire totale déclarée diminue sensiblement (Jacobson, 2009);
- Dans la documentation sur les scénarios concernant l'énergie et les émissions de CO_2 qui traite des transitions fondamentales du système énergétique pour éviter à long terme (50 à 100 ans) des interférences dangereuses d'origine humaine avec le système climatique, c'est à la méthode de l'équivalent direct qu'on recourt le plus fréquemment (Nakicenovic et Swart, 2000; Fisher *et al.*, 2007).

Le tableau A.II.2 présente les différences dans la comptabilisation de l'énergie primaire selon les trois méthodes dans un scénario où la stabilisation en 2100 se produirait pour 550 ppm éqCO_2.

3 Comme on ne connaît pas toujours la quantité de chaleur produite par les réacteurs nucléaires, l'AIE évalue l'équivalent en énergie primaire émanant de la production d'électricité en supposant un rendement de 33 %, qui est la moyenne pour les centrales nucléaires européennes (AIE, 2010b).

Tableau A.II.1 | Comparaison de l'approvisionnement mondial total en énergie primaire en 2008 selon diverses méthodes de comptabilisation de l'énergie primaire (données de l'AIE, 2010a).

	Méthode de la teneur en énergie physique		Méthode de l'équivalent direct		Méthode de substitution[1]	
	EJ	%	EJ	%	EJ	%
Combustibles fossiles	418,15	81,41	418,15	85,06	418,15	79,14
Nucléaire	29,82	5,81	9,85	2,00	25,90	4,90
Énergies renouvelables:	65,61	12,78	63,58	12,93	84,27	15,95
Bioénergie[2]	*50,33*	*9,80*	*50,33*	*10,24*	*50,33*	*9,53*
Solaire	*0,51*	*0,10*	*0,50*	*0,10*	*0,66*	*0,12*
Géothermique	*2,44*	*0,48*	*0,41*	*0,08*	*0,82*	*0,16*
Hydroélectrique	*11,55*	*2,25*	*11,55*	*2,35*	*30,40*	*5,75*
Marine	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,01*	*0,00*
Éolienne	*0,79*	*0,15*	*0,79*	*0,16*	*2,07*	*0,39*
Autres	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01
Total	**513,61**	**100,00**	**491,61**	**100,00**	**528,35**	**100,00**

Notes:

1 Pour la méthode de substitution, on a employé un rendement de conversion de 38 % pour l'électricité et de 85 % pour la chaleur émanant de sources d'énergie non combustibles. BP utilise un taux de conversion de 38 % pour l'électricité issue de l'énergie hydroélectrique et nucléaire et ne tient pas compte de l'énergie solaire, éolienne et géothermique dans ses statistiques: ici, un taux de conversion de 38 % pour l'électricité et de 85 % pour la chaleur est utilisé.

2 On notera que l'AIE classe les biocombustibles de première génération parmi les énergies secondaires (la biomasse primaire utilisée pour produire les biocombustibles étant plus élevée en raison de pertes lors de la conversion; voir les sections 2.3 et 2.4).

Alors que les différences en cas d'application des trois méthodes de comptabilisation à la consommation actuelle d'énergie sont peu marquées, ces différences augmentent sensiblement dans le cas des scénarios énergétiques caractérisés par de plus faibles émissions de CO_2 à long terme, où les technologies sans combustion ont un rôle relatif plus important (tableau A.II.2). Les différences entre les diverses méthodes s'accroissent avec le temps (figure A.II.1). Il existe des différences importantes entre les sources d'énergie non combustibles en 2050, et même la part de l'approvisionnement total en énergie primaire renouvelable varie de 24 à 37 % selon les méthodes (tableau A.II.2). La plus grande différence absolue et relative pour une seule source concerne l'énergie thermique, avec une différence de 200 EJ environ entre la méthode de l'équivalent direct et la méthode de la teneur en énergie physique, la différence entre l'énergie primaire hydroélectrique et nucléaire restant considérable. Le scénario présenté ici est assez représentatif et nullement extrême. L'objectif de stabilisation à 550 ppm choisi n'est pas particulièrement rigoureux, et la part d'énergie non combustible n'est pas très élevée.

A.II.5 Analyse du cycle de vie et analyse des risques

La présente section présente des méthodes ainsi qu'une documentation et des hypothèses sous-jacentes concernant l'analyse de la durée d'amortissement et du quotient énergétique (A.II.5.1), les émissions de GES pendant le cycle de vie (A.II.5.2), l'utilisation opérationnelle d'eau (A.II.5.3) et les dangers et risques (A.II.5.4) des technologies énergétiques présentées dans le chapitre 9. Les résultats de l'analyse des émissions de GES pendant le cycle de vie sont également présentés dans les sections 2.5, 3.6, 4.5, 5.6, 6.5 et 7.6. On

Tableau A.II.2 | Comparaison de l'approvisionnement mondial total en énergie primaire en 2050 selon diverses méthodes de comptabilisation de l'énergie primaire pour un scénario de stabilisation à 550 ppm éqCO2 (Loulou *et al.*, 2009).

	Méthode de la teneur en énergie physique		Méthode de l'équivalent direct		Méthode de substitution	
	EJ	%	EJ	%	EJ	%
Combustibles fossiles	581,6	55,2	581,56	72,47	581,6	61,7
Nucléaire	81,1	7,7	26,76	3,34	70,4	7,8
Énergies renouvelables:	390,1	37,1	194,15	24,19	290,4	30,8
Bioénergie	*120,0*	*11,4*	*120,0*	*15,0*	*120,0*	*12,7*
Solaire	*23,5*	*2,2*	*22,0*	*2,8*	*35,3*	*3,8*
Géothermique	*217,3*	*20,6*	*22,9*	*2,9*	*58,1*	*6,2*
Hydroélectrique	*23,8*	*2,3*	*23,8*	*3,0*	*62,6*	*6,6*
Marine	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Éolienne	*5,5*	*0,5*	*5,5*	*0,7*	*14,3*	*1,5*
Total	**1 052,8**	**100**	**802,5**	**100**	**942,4**	**100**

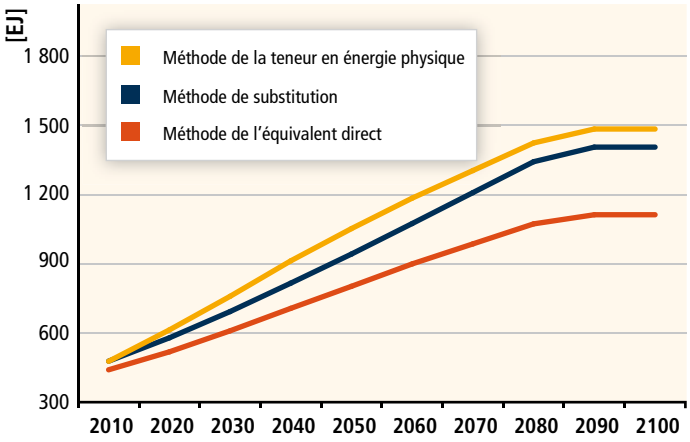


Figure A.II.1 | Comparaison de l'approvisionnement mondial total en énergie primaire entre 2010 et 2100 selon diverses méthodes de comptabilisation de l'énergie primaire pour un scénario de stabilisation à 550 ppm éqCO_2 (Loulou *et al.*, 2009).

notera que la documentation sur les études présentées en A.II.5.2 et A.II.5.3 fait l'objet de listes dans chaque section.

A.II.5.1 Durée d'amortissement de l'énergie et quotient énergétique

Le quotient énergétique $Q\acute{E}$ (également appelé quotient de la durée d'amortissement de l'énergie ou rendement énergétique des investissements dans l'énergie; voir Gagnon, 2008) d'un système d'approvisionnement en énergie dont la puissance est égale à P et le facteur de charge, à λ se définit comme le rapport

$$Q\acute{E} = \frac{\acute{E}_{vie}}{\acute{E}} = \frac{P \times 8\,760\ hy^{-1} \times \lambda \times T}{\acute{E}}$$

de la production d'électricité $\acute{E}_{vie}$ d'une centrale pendant sa durée de vie T à l'énergie totale (brute) $\acute{E}$ nécessaire pour sa construction, son exploitation et son déclassement (Gagnon, 2008). Lors du calcul de $\acute{E}$, par convention, a) on exclut l'énergie émanant du travail humain, l'énergie issue du sol (énergie fossile et minérale), l'énergie solaire et le potentiel hydrostatique, et b) on n'exclut pas les besoins à venir en énergie par rapport aux besoins actuels (Perry *et al.*, 1977; Herendeen, 1988). En outre, pour le calcul des besoins totaux en énergie $\acute{E}$, tous les éléments doivent avoir les mêmes caractéristiques énergétiques (par ex. électricité uniquement ou énergie thermique uniquement; voir le «problème de la valorisation» abordé par Leach (1975), Huettner (1976), Herendeen (1988) et en particulier Rotty *et al.* (1975, p. 5-9 dans le cas de l'énergie nucléaire)). Si l'énergie $\acute{E}$ peut comprendre des formes d'énergie dérivées ou primaires (par ex. l'électricité et l'énergie thermique), elle s'exprime généralement sour forme d'énergie primaire, la composante électrique étant convertie en équivalent en énergie primaire par le biais du rendement thermique $R_{conv} \approx 0{,}3$ d'une centrale sous-critique caractéristique alimentée par de la houille comme facteur de conversion. Le présent rapport respecte ces conventions. $\acute{E}$ est parfois exprimé en $kWh_{él}/MJ_{prim}$ et parfois en $kWh_{él}/kWh_{prim}$. Dans le premier cas, on a choisi les unités les plus courantes pour les deux formes d'énergie, et dans le deuxième, le lecteur peut comprendre facilement le pourcentage ou le multiple liant l'énergie intégrée et la production d'énergie. En outre, on a débattu du fait (voir Voorspools *et al.*, (2000, p. 326)) qu'en l'absence d'autres technologies, l'électricité devrait être produite par des moyens traditionnels. C'est pourquoi nous utilisons l'unité $kWh_{él}/kWh_{prim}$ dans le présent rapport.

L'application du paramètre d'énergie pendant le cycle de vie à un système de production d'énergie permet de définir une durée d'amortissement en matière d'énergie. Il s'agit du temps t_{amort} qu'il faut au système pour produire une quantité d'énergie égale à ses propres besoins en énergie $\acute{E}$. Ici encore, la meilleure façon de mesurer l'énergie est de faire appel à l'équivalent en énergie primaire $\frac{\acute{E}_{amort}}{R_{conv}}$ de la production d'électricité $\acute{E}_{amort}$ du système pendant la durée d'amortissement. Voorspools *et al.* (2000, p. 326) notent que, si le système devait amortir son énergie primaire intégrée par une quantité égale d'électricité, la durée d'amortissement en matière d'énergie serait plus de trois fois plus longue.

Sur le plan mathématique, la relation ci-dessus s'exprime par

$$\acute{E} = \frac{\acute{E}_{amort}}{R_{conv}} = \frac{P \times 8\,760\ hy^{-1} \times \lambda \times t_{amort}}{R_{conv}}$$

$$\text{d'où} \quad t_{amort} \frac{\frac{\acute{E}}{P \times 8\,760\ hy^{-1} \times \lambda}}{R_{conv}} = \frac{\frac{\acute{E}}{\acute{E}_{prod/an}}}{R_{conv}}$$

(ce qui, par exemple, coïncide avec la définition standard allemande VDI 4600). Ici, $\frac{\acute{E}_{prod/an}}{R_{conv}}$ désigne la production annuelle nette d'énergie du système exprimée en équivalent en énergie primaire. On peut démontrer que le quotient énergétique $Q\acute{E}$ et la durée d'amortissement en matière d'énergie t_{amort} peuvent être convertis l'un en l'autre selon la formule

$$t_{amort} = \frac{\frac{\acute{E}\,T}{\acute{E}_{prod/an}\,T}}{R_{conv}} = \frac{\frac{\acute{E}\,T}{\acute{E}_{vie}}}{R_{conv}} = \frac{R_{conv}}{Q\acute{E}} T$$

On notera que la durée d'amortissement en matière d'énergie ne dépend pas de la durée de vie T, car

$$t_{amort} \frac{\acute{E}\,R_{conv}}{P \times 8\,760\ hy^{-1} \times \lambda} \quad .$$

Les durées d'amortissement en matière d'énergie ont été en partie converties à partir des quotients énergétiques figurant dans la documentation (Lenzen, 1999, 2008; Lenzen et Munksgaard, 2002; Lenzen *et al.*, 2006; Gagnon, 2008; Kubiszewski *et al.*, 2010) selon les durées de vie moyennes présumées présentées dans le tableau 9.8 (chapitre 9). On notera également que l'amortissement en matière d'énergie défini dans le glossaire (annexe I) et utilisé dans certains chapitres techniques renvoie à ce que nous définissons ici comme la durée d'amortissement en matière d'énergie..

A.II.5.2 Étude des évaluations sur le cycle de vie des technologies de production d'électricité

Le National Renewable Energy Laboratory américain a procédé à une étude complète des évaluations publiées sur le cycle de vie des technologies de production d'électricité. Sur les 2 165 références recueillies, 296 ont été jugées, selon des méthodes présentées ci-après, d'une qualité et d'intérêt satisfaisants et ont été stockées dans une base de données. Cette base constitue le fondement de l'évaluation, pendant le cycle de vie, des émissions de GES issues des technologies de production d'électricité présentées dans ce rapport. À partir des valeurs estimées réunies dans la base de données, des graphiques sur les estimations publiées concernant les émissions de GES pendant le cycle de vie apparaissent dans tous les chapitres techniques du

présent rapport (chapitres 2 à 7) et dans les chapitres 1 et 9, où les émissions de GES pendant le cycle de vie dues aux technologies ÉR sont comparées à celles émanant de technologies de production d'électricité faisant appel aux énergies fossiles et à l'énergie nucléaire. Les sections suivantes présentent les méthodes appliquées pour cette étude (A.II.5.2.1) et la liste de toutes les références apparaissant dans les résultats finals, classées par technologie (A.II.5.2.2).

A.II.5.2.1 Méthodes employées pour l'étude

Pour l'essentiel, dans l'étude, on a suivi les indications données pour des *études systématiques* telles que celles réalisées en médecine (Neely *et al.*, 2010). Les méthodes employées en médecine diffèrent quelque peu de celles utilisées dans les sciences physiques, du fait qu'on recourt, pour ces dernières, à des études multiples et indépendantes de chaque référence proposée en utilisant des critères de tri prédéfinis, qu'on crée à cet effet une équipe composée, en ce cas, de spécialistes des analyses du cycle de vie, de spécialistes des technologies et de spécialistes de la recherche dans la documentation qui se réunissent régulièrement pour assurer une application cohérente des critères de tri et qu'on effectue des recherches exhaustives dans la documentation publiée pour veiller à ce qu'il n'y ait pas de préjugés, par exemple quant au type de publications (revues, rapports, etc.).

Il est à noter dès le départ que, dans cette étude, on n'a pas modifié (sauf pour convertir les unités) les estimations concernant les émissions de GES pendant le cycle de vie publiées dans des documents ayant satisfait aux critères de tri et qu'on n'en a pas vérifié l'exactitude. En outre, on n'a pas tenté de déceler ou de trier les valeurs aberrantes ou de s'assurer de la validité des hypothèses concernant les paramètres d'entrée. Du fait que les valeurs estimées sont reproduites telles qu'elles sont publiées, une forte incohérence méthodologique est inévitable, qui limite la comparabilité des estimations pour des catégories données de technologies de production d'énergie et entre ces catégories. Cette limitation est partiellement compensée par l'exhaustivité des recherches dans la documentation et par l'importance de cette documentation. Il y a eu peu de tentatives visant à étudier largement la documentation sur les analyses du cycle de vie concernant les technologies de production d'électricité. Les études qui existent sont généralement axées sur des technologies particulières et sont d'une portée plus limitée que la présente étude (par ex. Lenzen et Munksgaard, 2002; Fthenakis et Kim, 2007; Lenzen, 2008; Sovacool, 2008b; Beerten *et al.*, 2009; Kubiszewski *et al.*, 2010).

La procédure d'étude comprenait les étapes suivantes: collecte, tri et analyse de la documentation.

Collecte de la documentation
À partir de mai 2009, on a recensé la documentation potentiellement pertinente grâce à de multiples mécanismes, dont des recherches dans de grandes bases de données bibliographiques (Web of Science, WorldCat, etc.) au moyen de divers algorithmes de recherche, de diverses combinaisons de mots clés, de l'examen de listes de référence ou de la documentation pertinente et de recherches spécialisées, sur le Web, à propos de séries d'études connues (comme ExternE de l'Union européenne et ses descendants) et de bases de données documentaires connues sur les analyses du cycle de vie (comme la bibliothèque du progiciel SimaPro concernant les analyses du cycle de vie). Toute la documentation recueillie a d'abord été classée selon son contenu (avec des informations clés issues de chaque référence recueillie et stockée dans une base de données) et ajoutée à une base de données bibliographique.

Les méthodes de collecte de documentation présentées ici s'appliquent à tous les types de technologies de production d'électricité étudiés dans ce rapport, sauf le pétrole et l'énergie hydroélectrique. Les données concernant les analyses du cycle de vie pour l'énergie hydroélectrique et le pétrole, ajoutées ultérieurement à la base de données du National Renewable Energy Laboratory, ont subi un processus de collecte moins approfondi.

Tri de la documentation
On a soumis les références recueillies à trois séries indépendantes de tris effectués par de nombreux experts, afin de choisir celles qui respectaient les critères de qualité et de pertinence. Dans ces références, on a souvent présenté de nombreuses estimations sur les émissions de GES fondées sur des scénarios différents. Le cas échéant, on a appliqué les critères de tri au niveau de l'évaluation des scénarios, ce qui a parfois conduit à ne retenir qu'un sous-ensemble des scénarios analysés pour une référence donnée.

Les références retenues à la suite du premier tri en fonction de la qualité comprenaient des articles de revues examinés par des pairs, des comptes rendus de conférences détaillés sur le plan scientifique, des thèses de doctorat et des rapports (émanant de services gouvernementaux, d'établissements universitaires, d'organisations non gouvernementales, d'institutions internationales ou d'entreprises) publiés en anglais après 1980. On s'est efforcé d'obtenir la version anglaise d'ouvrages publiés dans d'autres langues et dans quelques cas, on a procédé à des traductions. Lors du premier tri, on a aussi veillé à ce que les références retenues soient des analyses du cycle de vie, définies comme analysant deux étapes ou plus du cycle de vie (à l'exception du solaire photovoltaïque et de l'énergie éolienne, vu que la documentation montre que la grande majorité des émissions de GES pendant le cycle de vie se produisent durant la phase de fabrication (Frankl *et al.*, 2005; Jungbluth *et al.*, 2005)).

Toutes les références retenues lors du premier tri ont ensuite été jugées directement selon des critères plus sévères de qualité et de pertinence:

- Emploi d'analyses attributives du cycle de vie et de méthodes de comptabilisation des GES actuellement acceptées (des analyses indirectes du cycle de vie n'ont pas été incluses du fait que leurs résultats ne sont fondamentalement pas comparables aux résultats obtenus par des méthodes d'analyse attributive; on trouvera à la section 9.3.4 une description plus précise des analyses attributives et indirectes du cycle de vie);
- Indication des intrants, des caractéristiques des scénarios ou des technologies, des principales hypothèses et de résultats suffisamment détaillés pour qu'on les retrouve et qu'on puisse s'y fier;
- Évaluation de technologies suffisamment modernes ou prometteuses.

Pour que les résultats publiés soient analysés, les estimations ont dû respecter un dernier ensemble de critères:

- Pour assurer l'exactitude de la transcription, seules les estimations chiffrées concernant les émissions de GES (et pas seulement communiquées sous forme graphique) ont été retenues;
- Les estimations déjà publiées dans des travaux antérieurs n'ont pas été retenues;
- Les résultats devaient être faciles à convertir dans l'unité fonctionnelle choisie pour cette étude: g éqCO_2 par kWh produit.

Le tableau A.II.3 indique le nombre de références à chaque étape du processus de tri pour les grandes catégories de technologies de production d'électricité prises en compte dans le présent rapport.

Analyse des estimations

Les estimations concernant les émissions de GES pendant le cycle de vie tirées d'études qui ont subi avec succès les deux processus de tri ont ensuite été analysées et ont fait l'objet de graphiques. D'abord, ces estimations ont été classées par technologie selon les grandes catégories prises en compte dans le rapport, comme il est indiqué dans le tableau A.II.3. Ensuite, elles ont été converties dans l'unité fonctionnelle commune: g éqCO_2 par kWh produit. Cette conversion a été réalisée sans hypothèses exogènes (les estimations nécessitant de telles hypothèses n'ont pas été retenues). Troisièmement, les estimations des émissions totales de GES pendant le cycle de vie émanant de changements d'affectation des sols ou de production de chaleur (en cas de cogénération) ont été exclues. Pour cette étape, il fallait que les études où l'on prenait en considération des changements d'affectation des sols ou des émissions de GES liées à la production de chaleur indiquent ces apports de façon distincte, de sorte que les estimations retenues concernent la production d'électricité uniquement. Enfin, les informations sur la répartition nécessaires pour une présentation dans des «boîtes à moustache» ont été calculées: minimum, 25^{e} percentile, 50^{e} percentile, 75^{e} percentile et maximum. Les technologies correspondant à des ensembles de données comprenant moins de cinq estimations (comme pour l'énergie géothermique) ont fait l'objet de graphiques composés de points discrets plutôt qu'obtenus par superposition de données sur la répartition synthétiques.

Les valeurs résultantes sous-jacentes à la figure 9.8 apparaissent dans le tableau A.II.4. Les chiffres présentés dans les chapitres consacrés aux technologies sont fondés sur le même ensemble de données, mais sont affichés avec un degré plus élevé de résolution pour ce qui est des sous-catégories des technologies (par ex. énergie éolienne terrestre et au large des côtes).

A.II.5.2.2 Liste des références

On trouvera ci-après la liste de toutes les références qui ont été prises en compte dans les résultats finals du présent rapport pour ce qui concerne l'examen de l'analyse du cycle de vie des émissions de GES issues de la production d'électricité, classées par technologie et présentées dans l'ordre alphabétique.

Production d'énergie à partir de biomasse (52)

Beals, D. et D. Hutchinson (1993). *Environmental Impacts of Alternative Electricity Generation Technologies: Final Report.* Beals and Associates, Guelph, Ontario, Canada, 151 p.

Beeharry, R.P. (2001). *Carbon balance of sugarcane bioenergy systems. Biomass & Bioenergy*, 20(5), p. 361-370.

Commission européenne (1999). *National Implementation.* ExternE: Externalities of Energy. Commission européenne, Direction générale XII, Luxembourg, 20, 534 p.

Corti, A. et L. Lombardi (2004). *Biomass integrated gasification combined cycle with reduced CO_2 emissions: Performance analysis and life cycle assessment (LCA).* Energy, 29(12-15), p. 2109-2124.

Cottrell, A., J. Nunn, A. Urfer et L. Wibberley (2003). *Systems Assessment of Electricity Generation Using Biomass and Coal in CFBC.* Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development, Pullenvale, Qld., Australie, 21 p.

Cowie, A.L. (2004). *Greenhouse Gas Balance of Bioenergy Systems Based on Integrated Plantation Forestry in North East New South Wales, Australia: International Energy Agency (IEA)Bioenergy Task 38 on GHG Balances of Biomass and Bioenergy Systems.* AIE, Paris, France. 6 p. Disponible à l'adresse www.ieabioenergy-task38.org/projects/task38casestudies/aus-brochure.pdf.

Tableau A.II.3 | Nombre d'analyses du cycle de vie des technologies de production d'électricité («références») à chaque étape de la collecte de documentation et du processus de tri et nombre de scénarios («estimations») concernant les émissions de GES pendant leur cycle de vie évalués ici.

Type de technologie	Références étudiées	Références ayant passé le test du premier tri	Références ayant passé le test du deuxième tri	Références fournissant des estimations des émissions de GES pendant leur cycle de vie	Estimations des émissions de GES pendant leur cycle de vie ayant passé le test des tris
Bioénergie	369	162	84	52	226
Charbon	273	192	110	52	181
Solaire thermodynamique	125	45	19	13	42
Énergie géothermique	46	24	9	6	8
Énergie hydroélectrique	89	45	11	11	28
Gaz naturel	251	157	77	40	90
Énergie nucléaire	249	196	64	32	125
Énergie marine	64	30	6	5	10
Pétrole	68	45	19	10	24
Photovoltaïque	400	239	75	26	124
Énergie éolienne	231	174	72	49	126
TOTAUX	**2 165**	**1 309**	**546**	**296**	**984**
% du total étudié		60 %	25 %	14 %	
% ayant passé le test du premier tri			42 %	23 %	
% ayant passé le test du deuxième tri				54 %	

Note: Dans certains cas, les totaux indiqués témoignent d'un double comptage du fait que certaines références portent sur plus d'une technologie.

Table A.II.4 | Résultats globaux de l'examen de la documentation concernant l'analyse du cycle de vie des émissions de GES issues des technologies de production d'électricité présentées à la figure 9.8 (g éqCO2/kWh).

Valeurs	Bio-énergie	Solaire		Énergie géothermique	Énergie hydroélec.	Énergie marine	Énergie éolienne	Énergie nucléaire	Gaz naturel	Pétrole	Charbon
		Photovolt.	Thermodyn.								
Minimum	-633	5	7	6	0	2	2	1	290	510	675
25e percentile	360	29	14	20	3	6	8	8	422	722	877
50e percentile	18	46	22	45	4	8	12	16	469	840	1 001
75e percentile	37	80	32	57	7	9	20	45	548	907	1 130
Maximum	75	217	89	79	43	23	81	220	930	1 170	1 689
Min. avec CSC	-1 368								65		98
Max. avec CSC	-594								245		396

Note: CSC = Captage et stockage du carbone

Cuperus, M.A.T. (2003). *Biomass Systems: Final Report.* Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for Present and Future Power Systems in Europe (ECLIPSE): N.V. tot Keuring van Electrotechnische Materialen (KEMA) Nederland B.V., Arnhem, Pays-Bas, 83 p.

Damen, K. et A.P.C. Faaij (2003). *A Life Cycle Inventory of Existing Biomass Import Chains for "Green" Electricity Production.* NW&S-E-2003-1, Universiteit Utrecht Copernicus Institute, Department of Science, Technology and Society, Utrecht, Pays-Bas, 76 p.

Daugherty, E.C. (2001). *Biomass Energy Systems Efficiency: Analyzed Through a Life Cycle Assessment.* Thèse de maîtrise, Université de Lund, Lund, Suède, 39 p.

Dones, R., C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, T. Heck, A. Roder, M.F. Emenegger, R. Frischknecht, N. Jungbluth et M. Tuchschmid (2007). *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries.* Rapport N°5 d'Ecoinvent, Institut Paul Scherrer, Centre suisse pour les inventaires de cycle de vie écologiques, Villigen, Suisse, 185 p. Disponible à l'adresse www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf.

Dowaki, K., H. Ishitani, R. Matsuhashi et N. Sam (2002). *A comprehensive life cycle analysis of a biomass energy system.* Technology, 8(4-6), p. 193-204.

Dowaki, K., S. Mori, H. Abe, P.F. Grierson, M.A. Adams, N. Sam, P. Nimiago, J. Gale et Y. Kaya (2003). *A life cycle analysis of biomass energy system tanking [sic] sustainable forest management into consideration.* In: Greenhouse Gas Control Technologies – 6th International Conference, Kyoto, Japon, 1er-4 october 2002. Pergamon, Oxford, p. 1383-1388.

Dubuisson, X. et I. Sintzoff (1998). *Energy and CO_2 balances in different power generation routes using wood fuel from short rotation coppice.* Biomass & Bioenergy, 15(4-5), p. 379-390.

Elsayed, M.A., R. Matthews et N.D. Mortimer (2003). *Carbon and Energy Balances for a Range of Biofuel Options.* Resources Research Institute, Université de Sheffield Hallam, Sheffield, Royaume-Uni, 341 p.

Faaij, A., B. Meuleman, W. Turkenburg, A. van Wijk, B. Ausilio, F. Rosillo-Calle et D. Hall (1998). *Externalities of biomass based electricity production compared with power generation from coal in the Netherlands.* Biomass and Bioenergy, 14(2), p. 125-147.

Faix, A., J. Schweinle, S. Scholl, G. Becker et D. Meier (2010). *(GTI-tcbiomass) life-cycle assessment of the BTO-Process (biomass-to-oil) with combined heat and power generation.* Environmental Progress and Sustainable Energy, 29(2), p. 193-202.

Forsberg, G. (2000). *Biomass energy transport – Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method.* Biomass & Bioenergy, 19(1), p. 17-30.

Froese, R.E., D.R. Shonnard, C.A. Miller, K.P. Koers et D.M. Johnson (2010). *An evaluation of greenhouse gas mitigation options for coal-fired power plants in the US Great Lakes states.* Biomass and Bioenergy, 34(3), p. 251-262.

Gaunt, J.L. et J. Lehmann (2008). *Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production.* Environmental Science & Technology, 42(11), p. 4152-4158.

Gmünder, S.M., R. Zah, S. Bhatacharjee, M. Classen, P. Mukherjee et R. Widmer (2010). *Life cycle assessment of village electrification based on straight Jatropha oil in Chhattisgarh, India.* Biomass and Bioenergy, 34(3):347-355

Hanaoka, T. et S.-Y. Yokoyama (2003). *CO_2 mitigation by biomass-fired power generation in Japan.* International Energy Journal, 4(2), p. 99-103.

Hartmann, D. et M. Kaltschmitt (1999). *Electricity generation from solid biomass via co-combustion with coal - Energy and emission balances from a German case study.* Biomass & Bioenergy, 16(6), p. 397-406.

Heller, M.C., G.A. Keoleian, M.K. Mann et T.A. Volk (2004). *Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass.* Renewable Energy, 29(7), p. 1023-1042.

Herrera, I., C. Lago, Y. Lechon, R. Saez, M. Munarriz et J. Gil (2008). *Life cycle assessment of two biomass power generation plants.* In: 16th European Biomass Conference & Exhibition, Valence, Espagne, 2-6 juin 2008, p. 2606-2613.

Hong, S.W. (2007). *The Usability of Switchgrass, Rice Straw, and Logging Residue as Feedstocks for Power Generation in East Texas.* Thèse de maîtrise, Texas A&M University, College Station, TX, États-Unis d'Amérique, 83 p.

IEA (2002). *Environmental and Health Impacts of Electricity Generation.* A Comparison of the Environmental Impacts of Hydropower with those of Other Generation Technologies. Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 239 p.

Jungmeier, G. et J. Spitzer (2001). *Greenhouse gas emissions of bioenergy from agriculture compared to fossil energy for heat and electricity supply.* Nutrient Cycling in Agroecosystems, 60(1-3), p. 267-273.

Jungmeier, G., J. Spitzer et G. Resch (1998). *Environmental burdens over the entire life cycle of a biomass CHP plant.* Biomass and Bioenergy 15(4-5), p. 311-323.

Lettens, S., B. Muys, R. Ceulemans, E. Moons, J. Garcia et P. Coppin (2003). *Energy budget and greenhouse gas balance evaluation of sustainable coppice systems for electricity production.* Biomass and Bioenergy, 24(3), p. 179-197.

Ma, X., F. Li, Z. Zhao, C. Wu et Y. Chen (2003). *Life cycle assessment on biomass gasification combined cycle and coal fired power plant.* In: Energy and the Environment – Proceedings of the International Conference on Energy and the Environment, Shanghai, Chine, 22-24 mai 2003. Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai, Chine, 1, p. 209-214.

Malkki, H. et Y. Virtanen (2003). *Selected emissions and efficiencies of energy systems based on logging and sawmill residues.* Biomass and Bioenergy, 24, p. 321-327.

Mann, M.K. et P.L. Spath (1997). *Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined-Cycle System.* NREL/TP-430-23076, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, États-Unis d'Amérique, 157 p.

Mann, M.K. et P.L. Spath (2001). *A life-cycle assessment of biomass cofiring in a coal-fired power plant.* Clean Products and Processes, 3, p. 81-91.

Mohan, T. (2005). *An Integrated Approach for Techno-economic and Environmental Analysis of Energy from Biomass and Fossil Fuels.* Thèse de maîtrise, Texas A&M University, College Station, TX, États-Unis d'Amérique, 200 p.

Pehnt, M. (2006). *Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies.* Renewable Energy, 31(1), p. 55-71.

Rafaschieri, A., M. Rapaccini etnd G. Manfrida (1999). *Life cycle assessment of electricity production from poplar energy crops compared with conventional fossil fuels.* Energy Conversion and Management 40(14), p. 1477-1493.

Ramjeawon, T. (2008). *Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius.* Journal of Cleaner Production, 16(16), p. 1727-1734.

Renouf, M.A. (2002). *Preliminary LCA of Electricity Generation from Sugarcane Bagasse.* Environmental Energy Centre, University of Queensland, Queensland, Australie, 10 p. Disponible à l'adresse www.docstoc.com/docs/39528266/PRELIMINARY-LCA-OF-ELECTRICITY-GENERATION-FROM-SUGARCANE-BAGASSE.

Robertson, K. (2003). *Greenhouse Gas Benefits of a Combined Heat and Power Bioenergy System in New Zealand.* FORCE Consulting, Kirkland, WA, États-Unis d'Amérique, 16 p. Disponible à l'adresse www.ieabioenergy-task38.org/projects/task38casestudies/nz_fullreport.pdf.

Saskatchewan Energy Conservation and Development Authority (1994). *Levelized Cost and Full Fuel Cycle Environmental Impacts of Saskatchewan's Electric Supply Options.* Publication SECDA N° T800-94-004, Saskatoon, SK, Canada, 205 p.

Schaffner, B., K. Persson, U. Nilsson et J. Peterson (2002). *Environmental and Health Impacts of Electricity Generation.* A Comparison of the Environmental Impacts of Hydropower with Those of Other Generation Technologies. Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 221 p. Disponible à l'adresse www.ieahydro.org/reports/ST3-020613b.pdf.

Searcy, E. et P. Flynn (2008). *Processing of straw/corn stover: Comparison of life cycle emissions.* International Journal of Green Energy, 5(6), p. 423-437.

Setterwall, C., M. Munter, P. Sarkozi et B. Bodlund (2003). *Bio-fuelled Combined Heat and Power Systems.* Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for Present and Future Power Systems in Europe (ECLIPSE). N.V. tot Keuring van Electrotechnische Materialen (KEMA) Nederland B.V., Arnhem, Pays-Bas.

Sikkema, R., M. Junginger, W. Pichler, S. Hayes et A.P.C. Faaij (2010). *The international logistics of wood pellets for heating and power production in Europe: Costs, energy-input and greenhouse gas balances of pellet consumption in Italy, Sweden and the Netherlands.* Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 4(2), p. 132-153.

Spath, P.L. et M.K. Mann (2004). *Biomass Power and Conventional Fossil Systems with and without CO_2 Sequestration – Comparing the Energy Balance, Greenhouse Gas Emissions and Economics.* NREL/TP-510-32575. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, États-Unis d'Amérique, 28 p.

Styles, D. et M.B. Jones (2007). *Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop electricity.* Biomass & Bioenergy, 31(11-12), p. 759-772.

Tiwary, A. et J. Colls (2010). *Mitigating secondary aerosol generation potentials from biofuel use in the energy sector.* Science of the Total Environment, 408(3), p. 607-616.

Wibberley, L. (2001). *Coal in a Sustainable Society.* Australian Coal Association Research Program, Brisbane, Queensland, Australie.

Wibberley, L., J. Nunn, A. Cottrell, M. Searles, A. Urfer et P. Scaife (2000). *Life Cycle Analysis for Steel and Electricity Production in Australia.* Australian Coal Association Research Program, Brisbane, Queensland, Australie, 36 p.

Wicke, B., V. Dornburg, M. Junginger et A. Faaij (2008). *Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications.* Biomass and Bioenergy, 32(12), p. 1322-1337.

Yoshioka, T., K. Aruga, T. Nitami, H. Kobayashi et H. Sakai (2005). *Energy and carbon dioxide (CO_2) balance of logging residues as alternative energy resources: System analysis based on the method of a life cycle inventory (LCI) analysis.* Journal of Forest Research, 10(2), p. 125-134.

Zhang, Y.M., S. Habibi et H.L. MacLean (2007). *Environmental and economic evaluation of bioenergy in Ontario, Canada.* Journal of the Air and Waste Management Association, 57(8), p. 919-933.

Production d'énergie à partir de charbon (52)

Akai, M., N. Nomura, H. Waku et M. Inoue (1997). *Life-cycle analysis of a fossil-fuel power plant with CO_2 recovery and a sequestering system.* Energy, 22(2-3), p. 249-256.

Bates, J.L. (1995). *Full Fuel Cycle Atmospheric Emissions and Global Warming Impacts from UK Electricity Generation.* Rapport N° ETSU-R-88, Energy Technical Support Unit (ETSU), Londres, Royaume-Uni, 51 p. (ISBN 011 515 4027).

Commission européenne (1995). *Coal & Lignite. ExternE: Externalities of Energy.* Luxembourg, Commission Européenne, Direction générale XII. 3, 573 p.

Commission européenne (1999). *National Implementation.* ExternE: Externalities of Energy. Luxembourg, Commission européenne, Direction générale XII. 20, 534 p.

Corrado, A., P. Fiorini et E. Sciubba (2006). *Environmental assessment and extended exergy analysis of a "Zero CO_2 Emission", high-efficiency steam power plant.* Energy, 31(15), p. 3186-3198.

Cottrell, A., J. Nunn, A. Urfer et L. Wibberley (2003). *Systems Assessment of Electricity Generation Using Biomass and Coal in CFBC.* Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development, Pullenvale, Qld., Australie, 21 p.

Damen, K. et A.P.C. Faaij (2003). *A Life Cycle Inventory of Existing Biomass Import Chains for "Green" Electricity Production.* NW&S-E-2003-1, Universiteit Utrecht Copernicus Institute, Department of Science, Technology and Society, Utrecht, Pays-Bas, 76 p.

Dolan, S.L. (2007). *Life Cycle Assessment and Emergy Synthesis of a Theoretical Offshore Wind Farm for Jacksonville, Florida.* Thèse de maîtrise, Université de Floride, 125 p.

Dones, R., U. Ganter et S. Hirschberg (1999). *Environmental inventories for future electricity supply systems for Switzerland.* International Journal of Global Energy Issues, 12(1-6), p. 271-282.

Dones, R., X. Zhou et C. Tian (2004). *Life cycle assessment (LCA) of Chinese energy chains for Shandong electricity scenarios.* International Journal of Global Energy Issues, 22(2/3/4), p. 199-224.

Dones, R., C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, T. Heck, A. Roder, M.F. Emenegger, R. Frischknecht, N. Jungbluth et M. Tuchschmid (2007). *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries.* Rapport N° 5 d'Ecoinvent, Institut Paul Scherrer, Centre suisse pour les inventaires de cycle de vie écologiques, Villigen, Suisse, 185 p. Disponible à l'adresse www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf.

Dones, R., C. Bauer, T. Heck, O. Mayer-Spohn et M. Blesl (2008). *Life cycle assessment of future fossil technologies with and without carbon capture and storage.* Life-Cycle Analysis for New Energy Conversion and Storage Systems,1041, p. 147-158.

Fiaschi, D. et L. Lombardi (2002). *Integrated gasifier combined cycle plant with integrated CO_2 - H_2S removal: Performance analysis, life cycle assessment and exergetic life cycle assessment.* International Journal of Applied Thermodynamics, 5(1), p. 13-24.

Friedrich, R. et T. Marheineke (1996). *Life cycle analysis of electric systems: Methods and results.* In: IAEA Advisory Group Meeting on Analysis of Net Energy Balance and Full-energy-chain Greenhouse Gas Emissions for Nuclear and Other Energy Systems, Beijing, Chine, 7 octobre 1994, Agence internationale de l'énergie atomique, p. 67-75. Disponible à l'adresse www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/013/28013414.pdf.

Froese, R.E., D.R. Shonnard, C.A. Miller, K.P. Koers et D.M. Johnson (2010). *An evaluation of greenhouse gas mitigation options for coal-fired power plants in the US Great Lakes States.* Biomass and Bioenergy, 34(3), p. 251-262.

Gorokhov, V., L. Manfredo, M. Ramezan et J. Ratafia-Brown (2000). *Life Cycle Assessment of IGCC.* Systems Phase II Report, Science Applications International Corporation (SAIC), McLean, VA, États-Unis d'Amérique, 162 p.

Hartmann, D. et M. Kaltschmitt (1999). *Electricity generation from solid biomass via co-combustion with coal - Energy and emission balances from a German case study.* Biomass & Bioenergy, 16(6), p. 397-406.

Heller, M.C., G.A. Keoleian, M.K. Mann et T.A. Volk (2004). *Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass.* Renewable Energy, 29(7), p. 1023-1042.

Herrick, C.N., A. Sikri, L. Greene et J. Finnell (1995). *Assessment of the Environmental Benefits of Renewables Deployment: A Total Fuel Cycle Analysis of the Greenhouse Gas Impacts of Renewable Generation Technologies in Regional Utility Systems.* DynCorp EENSP, Inc., Alexandria, VA, États-Unis d'Amérique.

Hondo, H. (2005). *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case.* Energy, 30(11-12), p. 2042-2056.

Jaramillo, P., W.M. Griffin et H.S. Matthews (2006). *Comparative Life Cycle Carbon Emissions of LNG Versus Coal and Gas for Electricity Generation*, aucun éditeur cité, 16 p. Disponible à l'adresse www.ce.cmu.edu/~gdrg/readings/2005/10/12/Jaramillo_LifeCycleCarbonEmissionsFromLNG.pdf.

Koornneef, J., T. van Keulen, A. Faaij et W. Turkenburg (2008). *Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO_2.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2(4), p. 448-467.

Kreith, F., P. Norton et D. Brown (1990). *CO_2 Emissions from Coal-fired and Solar Electric Power Plants.* Solar Energy Research Institute (SERI), Golden, CO, États-Unis d'Amérique, 44 p.

Krewitt, W., P. Mayerhofer, R. Friedrich, A. Truckenmüller, T. Heck, A. Gressmann, F. Raptis, F. Kaspar, J. Sachau, K. Rennings, J. Diekmann et B. Praetorius (1997). *ExternE National Implementation in Germany.* Université de Stuttgart, Stuttgart, Allemagne, 189 p.

Lee, K.-M., S.-Y. Lee et T. Hur (2004). *Life cycle inventory analysis for electricity in Korea.* Energy, 29(1), p. 87-101.

Lee, R. (1994). *Estimating externalities of coal fuel cycles.* In: External Costs and Benefits of Fuel Cycles, Vol. 3. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, États-Unis d'Amérique, 719 p.

Lenzen, M. (2008). *Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review.* Energy Conversion and Management, 49, p. 2178-2199. Disponible à l'adresse www.isa.org.usyd.edu.au/publications/documents/ISA_Nuclear_Report.pdf.

Markewitz, P., A. Schreiber, S. Vögele et P. Zapp (2009). *Environmental impacts of a German CCS strategy.* Energy Procedia, 1(1), p. 3763-3770.

Martin, J.A. (1997). *A total fuel cycle approach to reducing greenhouse gas emissions: Solar generation technologies as greenhouse gas offsets in U.S. utility systems.* In: Solar Energy (Selected Proceeding of ISES 1995: Solar World Congress. Part IV), 59(4-6), p. 195-203.

May, J.R. et D.J. Brennan (2003). *Life cycle assessment of Australian fossil energy options.* Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, 81(5), p. 317-330.

Meier, P.J., P.P.H. Wilson, G.L. Kulcinski et P.L. Denholm (2005). *US electric industry response to carbon constraint: A life-cycle assessment of supply side alternatives.* Energy Policy, 33(9), p. 1099-1108.

Meridian Corporation (1989). *Energy System Emissions and Materiel Requirements.* Meridian Corporation, Alexandria, VA, États-Unis d'Amérique, 34 p.

Odeh, N.A. et T.T. Cockerill (2008). *Life cycle analysis of UK coal fired power plants.* Energy Conversion and Management, 49(2), p. 212-220.

Odeh, N.A. et T.T. Cockerill (2008). *Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage.* Energy Policy, 36(1), p. 367-380.

Pacca, S.A. (2003). *Global Warming Effect Applied to Electricity Generation Technologies.* Thèse de doctorat, Université de Californie, Berkeley, CA, États-Unis d'Amérique, 191 p.

Peiu, N. (2007). *Life cycle inventory study of the electrical energy production in Romania.* International Journal of Life Cycle Assessment, 12(4), p. 225-229.

Ruether, J.A., M. Ramezan et P.C. Balash (2004). *Greenhouse gas emissions from coal gasification power generation systems.* Journal of Infrastructure Systems, 10(3), p. 111-119.

San Martin, R.L. (1989). *Environmental Emissions from Energy Technology Systems: The Total Fuel Cycle.* Département américain de l'énergie, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 21 p.

Saskatchewan Energy Conservation and Development Authority (1994). *Levelized Cost and Full Fuel Cycle Environmental Impacts of Saskatchewan's Electric Supply Options.* Publication SECDA N° T800-94-004, Saskatoon, SK, Canada, 205 p.

Schreiber, A., P. Zapp et W. Kuckshinrichs (2009). *Environmental assessment of German electricity generation from coal-fired power plants with amine-based carbon capture.* International Journal of Life Cycle Assessment, 14(6), p. 547-559.

SENES Consultants Limited (2005). *Methods to Assess the Impacts on the Natural Environment of Generation Options.* Preparé par SENES Consultants pour l'Ontario Power Authority, Richmond Hill, ON, Canada, 166 p.

Shukla, P.R. et D. Mahapatra (2007). *Full Fuel Cycle for India.* In: CASES: Cost Assessment of Sustainable Energy Systems. Document N° 7.1, Indian Institute of Management Ahmedabad (IIMA), Vestrapur, Ahemdabad, Inde, 10 p.

Spath, P.L. et M.K. Mann (2004). *Biomass Power and Conventional Fossil Systems with and without CO_2 Sequestration – Comparing the Energy Balance, Greenhouse Gas Emissions and Economics.* NREL/TP-510-32575. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, États-Unis d'Amérique, 28 p.

Spath, P.L., M.K. Mann et D.R. Kerr (1999). *Life Cycle Assessment of Coal Fired Power Production.* National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, États-Unis d'Amérique, 172 p.

Styles, D. et M.B. Jones (2007). *Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop electricity.* Biomass & Bioenergy, 31(11-12), p. 759-772.

Uchiyama, Y. (1996). *Validity of FENCH-GHG study: Methodologies and databases comparison of energy sources in terms of their full-energy-chain emission factors of greenhouse gases*. In: IAEA Advisory Group Meeting on Analysis of Net Energy Balance and Full-energy-chain Greenhouse Gas Emissions for Nuclear and Other Energy Systems, Beijing, Chine, 4-7 oct 1994, Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), p. 85-94. Disponible à l'adresse www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/013/28013414.pdf.

White, S.W. (1998). *Net Energy Payback and CO_2 Emissions from Helium-3 Fusion and Wind Electrical Power Plants.* Thèse de doctorat, Université du Wisconsin, Madison, WI, États-Unis d'Amérique, 166 p.

Wibberley, L. (2001). *Coal in a Sustainable Society.* Australian Coal Association Research Program, Brisbane, Queensland, Australie.

Wibberley, L., J. Nunn, A. Cottrell, M. Searles, A. Urfer et P. Scaife (2000). *Life Cycle Analysis for Steel and Electricity Production in Australia.* Australian Coal Association Research Program, Brisbane, Queensland, Australie, 36 p.

Zerlia, T. (2003). *Greenhouse gases in the life cycle of fossil fuels: Critical points in the assessment of pre-combustion emissions and repercussions on the complete life cycle.* La Rivista dei Combustibili, 57(6), p. 281-293.

Zhang, Y.M., S. Habibi et H.L. MacLean (2007). *Environmental and economic evaluation of bioenergy in Ontario, Canada.* Journal of the Air and Waste Management Association, 57(8), p. 919-933.

Zhang, Y.M., J. McKechnie, D. Cormier, R. Lyng, W. Mabee, A. Ogino et H.L. MacLean (2010). *Life cycle emissions and cost of producing electricity from coal, natural gas, and wood pellets in Ontario, Canada.* Environmental Science & Technology, 44(1), p. 538-544.

Solaire thermodynamique (13)

Burkhardt, J., G. Heath et C. Turchi (2010). *Life cycle assessment of a model parabolic trough concentrating solar power plant with thermal energy storage.* In: ASME 4th International Conference on Energy Sustainability, American Society of Mechanical Engineers (ASME), Phoenix, AZ, États-Unis d'Amérique, 17-22 mai 2010.

Cavallaro, F. et L. Ciraolo (2006). *Life Cycle Assessment (LCA) of Paraboloidal-dish Solar Thermal Power Generation System.* In: 1st International Symposium on

Environment Identities and Mediterranean Area, ISEIM, IEEE, Corte-Ajaccio, France, 10-13 juillet 2006, p. 260-265.

Centre aérospatial allemand (DLR) (2006). *Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power. Final Report.* Institute of Technical Thermodynamics, and Section Systems Analysis and Technology Assessment, Centre aérospatial allemand (DLR), Stuttgart, Allemagne, 190 p.

Jacobson, M.Z. (2009). *Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security.* Energy & Environmental Science, 2, p. 148-173.

Kreith, F., P. Norton et D. Brown (1990). *CO_2 Emissions from Coal-fired and Solar Electric Power Plants.* SERI/TP-260-3772, Solar Energy Research Institute (SERI), Golden, CO, États-Unis d'Amérique, 44 p.

Lenzen, M. (1999). *Greenhouse gas analysis of solar-thermal electricity generation.* Solar Energy, 65(6), p. 353-368.

Ordóñez, I., N. Jiménez et M.A. Silva (2009). *Life cycle environmental impacts of electricity production by dish/Stirling systems in Spain.* In: SolarPACES 2009, Berlin, Allemagne, 15-18 septembre 2009, 8 p.

Pehnt, M. (2006). *Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies.* Renewable Energy, 31(1), p. 55-71.

Piemonte, V., M.D. Falco, P. Tarquini et A. Giaconia (2010). *Life cycle assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant.* In: 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20, sous la direction de Pierucci, S. et G.B. Ferraris, Elsevier, Naples, Italie, 6-9 juin 2010, 6 p.

Vant-Hull, L. (1992). *Solar thermal electricity: An environmentally benign and viable alternative.* Perspectives in Energy, 2, p. 157-166.

Viebahn, P., S. Kronshage et F. Trieb (2008). *Final Report on Technical Data, Costs, and Life Cycle Inventories of Solar Thermal Power Plants.* Projet n° 502687. New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS), Rome, Italie, 95 p. Disponible à l'adresse www.needs-project.org/docs/results/RS1a/RS1a%20D12.2%20Final%20report%20concentrating%20solar%20thermal%20power%20plants.pdf.

Weinrebe, G., M. Bohnke et F. Trieb (1998). *Life cycle assessment of an 80 MW SEGS plant and a 30 MW PHOEBUS power tower.* In: International Solar Energy Conference. Solar Engineering. ASME, Albuquerque, NM, États-Unis d'Amérique, 14-17 juin 1998, p. 417-424.

Wibberley, L. (2001). *Coal in a Sustainable Society.* Australian Coal Association Research Program, Brisbane, Queensland, Australie.

Énergie géothermique (6)

Frick, S., M. Kaltschmitt et G. Schroder (2010). *Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs.* Energy, 35(5), p. 2281-2294.

Hondo, H. (2005). *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case.* Energy, 30(11-12), p. 2042-2056.

Karlsdottir, M.R., O.P. Palsson et H. Palsson (2010). *Factors for Primary Energy Efficiency and CO_2 Emission of Geothermal Power Production.* In: World Geothermal Congress 2010, International Geothermal Association, Bali, Indonésie, 25-29 avril 2010, 7 p.

Rogge, S. et M. Kaltschmitt (2003). *Electricity and heat production from geothermal energy – An ecologic comparison.* Erdoel Erdgas Kohle/EKEP, 119(1), p. 35-40.

Rule, B.M., Z.J. Worth et C.A. Boyle (2009). *Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand.* Environmental Science & Technology, 43(16), p. 6406-6413.

Uchiyama, Y. (1997). *Environmental life cycle analysis of geothermal power generating technology; Chinetsu hatsuden gijutsu no kankyo life cycle bunseki.* Denki Gakkaishi (Revue de l'Institut japonais des ingénieurs électriciens), 117(11), p. 752-755.

Énergie hydroélectrique (11)

Barnthouse, L.W., G.F. Cada, M.-D. Cheng, C.E. Easterly, R.L. Kroodsma, R. Lee, D.S. Shriner, V.R. Tolbert et R.S. Turner (1994). *Estimating Externalities of the Hydro Fuel Cycles.* Report 6. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, États-Unis d'Amérique, 205 p.

Denholm, P. et G.L. Kulcinski (2004). *Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems.* Energy Conversion and Management, 45(13-14), p. 2153-2172.

Dones, R., T. Heck, C. Bauer, S. Hirschberg, P. Bickel, P. Preiss, L.I. Panis et I. De Vlieger (2005). *Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications: New Energy Technologies.* ENG1-CT-2002-00609, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen, Suisse, 76 p.

Dones, R., C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, T. Heck, A. Roder, M.F. Emenegger, R. Frischknecht, N. Jungbluth et M. Tuchschmid (2007). *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries.* Rapport N° 5 d'Ecoinvent, Institut Paul Scherrer, Centre suisse pour les inventaires de cycle de vie écologiques, Villigen, Suisse, 185 p. Disponible à l'adresse www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf.

Horvath, A. (2005). *Decision-making in Electricity Generation Based on Global Warming Potential and Life-cycle Assessment for Climate Change.* University of California Energy Institute, Berkeley, CA, États-Unis d'Amérique, 16 p. Disponible à l'adresse repositories.cdlib.org/ucei/devtech/EDT-006.

IEA (1998). *Benign Energy? The Environmental Implications of Renewables.* Agence internationale de l'énergie, Paris, France, 128 p.

Pacca, S. (2007). *Impacts from decommissioning of hydroelectric dams: A life cycle perspective.* Climatic Change, 84(3-4), p. 281-294.

Rhodes, S., J. Wazlaw, C. Chaffee, F. Kommonen, S. Apfelbaum et L. Brown (2000). *A Study of the Lake Chelan Hydroelectric Project Based on Life-cycle Stressor-effects Assessment.* Final Report. Scientific Certification Systems, Oakland, CA, États-Unis d'Amérique, 193 p.

Ribeiro, F.d.M. et G.A. da Silva (2009). *Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study.* Journal of Cleaner Production, 18(1), p. 44-54.

Vattenfall (2008). *Vattenfall AB Generation Nordic Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower.* Rapport N° S-P-00088, Vattenfall, Stockholm, Suède, 50 p.

Zhang, Q., B. Karney, H.L. MacLean et J. Feng (2007). *Life-Cycle Inventory of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Two Hydropower Projects in China.* Journal of Infrastructure Systems, 13(4), p. 271-279.

Production d'énergie à partir de gaz naturel (40)

Audus, H. et L. Saroff, 1995: *Full Fuel Cycle Evaluation of CO_2 Mitigation Options for Fossil Fuel Fired Power Plant.* Energy Conversion and Management, 36(6-9), p. 831-834.

Badea, A.A., I. Voda et C.F. Dinca (2010). *Comparative Analysis of Coal, Natural Gas and Nuclear Fuel Life Cycles by Chains of Electrical Energy Production.* UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering, 72(2), p. 221-238.

Bergerson, J. et L. Lave (2007). *The Long-term Life Cycle Private and External Costs of High Coal Usage in the US.* Energy Policy, 35(12), p. 6225-6234.

Bernier, E., F. Maréchal et R. Samson (2010). *Multi-Objective Design Optimization of a Natural Gas-combined Cycle with Carbon Dioxide Capture in a Life Cycle Perspective.* Energy 35(2), p. 1121-1128.

Berry, J.E., M.R. Holland, P.R. Watkiss, R. Boyd et W. Stephenson (1998). *Power Generation and the Environment: a UK Perspective.* AEA Technology, Oxfordshire, Royaume-Uni, 275 p.

Commission européenne, 1995: *Oil & Gas. ExternE: Externalities of Energy.* Commission européenne, Direction générale XII, Luxembourg, 4, 470 p.

Conseil mondial de l'énergie (2004). *Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment.* Conseil mondial de l'énergie, Londres, Royaume-Uni, 67 p.

Dolan, S.L. (2007). *Life Cycle Assessment and Emergy Synthesis of a Theoretical Offshore Wind Farm for Jacksonville, Florida.* Thèse de maîtrise, Université de Floride, 125 p. Disponible à l'adresse http://etd.fcla.edu/UF/UFE0021032/dolan_s.pdf.

Dones, R., S. Hirschberg et I. Knoepfel (1996). *Greenhouse gas emission inventory based on full energy chain analysis.* In: IAEA Advisory Group Meeting on Analysis of Net Energy Balance and Full-energy-chain Greenhouse Gas Emissions for Nuclear and Other Energy Systems. Beijing, Chine, 4-7 octobre 1994, p. 95-114. Disponible à l'adresse www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/013/28013414.pdf.

Dones, R., U. Ganter et S. Hirschberg (1999). *Environmental inventories for future electricity supply systems for Switzerland.* International Journal of Global Energy Issues, 12(1-6), p. 271-282.

Dones, R., T. Heck et S. Hirschberg (2004). *Greenhouse gas emissions from energy systems, comparison and overview.* Encyclopedia of Energy, 3, p. 77-95, doi:10.1016/B0-12-176480-X/00397-1.

Dones, R., X. Zhou et C. Tian (2004). *Life cycle assessment (LCA) of Chinese energy chains for Shandong electricity scenarios.* International Journal of Global Energy Issues, 22(2/3/4), p. 199-224.

Dones, R., T. Heck, C. Bauer, S. Hirschberg, P. Bickel, P. Preiss, L.I. Panis et I. De Vlieger (2005). *Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications: New Energy Technologies.* ENG1-CT-2002-00609, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen, Suisse, 76 p.

Dones, R., C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, T. Heck, A. Roder, M.F. Emenegger, R. Frischknecht, N. Jungbluth et M. Tuchschmid (2007). *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries.* Rapport N° 5 d'Ecoinvent, Institut Paul Scherrer, Centre suisse pour les inventaires de cycle de vie écologiques, Villigen, Suisse, 185 p. Disponible à l'adresse www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf.

Frischknecht, R. (1998). *Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making: Scope-Dependent Inventory System Models and Context-Specific Joint Product Allocation.* Dissertation, Institut fédéral suisse de technologie de Zurich, Zurich, Suisse, 256 p.

Gantner, U., M. Jakob et S. Hirschberg (2001). *Total greenhouse gas emissions and costs of alternative Swiss energy supply strategies.* In: Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-5). CSIRO Publishing, Cairns, Australie, 13-16 août 2000, p. 991-996.

Herrick, C.N., A. Sikri, L. Greene et J. Finnell, 1995: *Assessment of the Environmental Benefits of Renewables Deployment: A Total Fuel Cycle Analysis of the Greenhouse Gas Impacts of Renewable Generation Technologies in Regional Utility Systems.* DynCorp EENSP, Inc., Alexandria, VA, États-Unis d'Amérique.

Hondo, H. (2005). *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case.* Energy, 30(11-12), p. 2042-2056.

IEA (2002). *Environmental and Health Impacts of Electricity Generation. A Comparison of the Environmental Impacts of Hydropower with those of Other Generation Technologies.* Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 239 p. Disponible à l'adresse www.ieahydro.org/reports/ST3-020613b.pdf.

Kannan, R., K.C. Leong, R. Osman et H.K. Ho (2007). *Life cycle energy, emissions and cost inventory of power generation technologies in Singapore.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, p. 702-715.

Kato, S. et A. Widiyanto (1999). *A life cycle assessment scheme for environmental load estimation of power generation systems with NETS evaluation method.* In: International Joint Power Generation Conference. Sous la direction de S.R.H. Penfield et R. McMullen. American Society of Mechanical Engineers (ASME), Burlingame, CA, États-Unis d'Amérique, 25-28 juillet 1999, 2, p. 139-146.

Krewitt, W., P. Mayerhofer, R. Friedrich, A. Truckenmüller, T. Heck, A. Gressmann, F. Raptis, F. Kaspar, J. Sachau, K. Rennings, J. Diekmann et B. Praetorius (1997). *ExternE National Implementation in Germany.* Université de Stuttgart, Stuttgart, Allemagne, 189 p.

Lee, R. (1998). *Estimating Externalities of Natural Gas Fuel Cycles.* External Costs and Benefits of Fuel Cycles: A Study by the U.S. Department of Energy and the Commission of the European Communities. Rapport N° 4, Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Oak Ridge, TN, États-Unis d'Amérique, 440 p.

Lenzen, M. (1999). *Greenhouse gas analysis of solar-thermal electricity generation.* Solar Energy, 65(6), p. 353-368.

Lombardi, L. (2003). *Life cycle assessment comparison of technical solutions for CO_2 emissions reduction in power generation.* Energy Conversion and Management, 44(1), p. 93-108.

Martin, J.A. (1997). *A total fuel cycle approach to reducing greenhouse gas emissions: Solar generation technologies as greenhouse gas offsets in U.S. utility systems.* Solar Energy (Selected Proceeding of ISES 1995: Solar World Congress. Part IV), 59(4-6), p. 195-203.

Meier, P.J. (2002). *Life-Cycle Assessment of Electricity Generation Systems and Applications for Climate Change Policy Analysis.* Thèse de doctorat, Université du Wisconsin, Madison, WI, États-Unis d'Amérique, 147 p.

Meier, P.J. et G.L. Kulcinski (2001). *The Potential for fusion power to mitigate US greenhouse gas emissions.* Fusion Technology, 39(2), p. 507-512.

Meier, P.J., P.P.H. Wilson, G.L. Kulcinski et P.L. Denholm (2005). *US electric industry response to carbon constraint: A life-cycle assessment of supply side alternatives.* Energy Policy, 33(9), p. 1099-1108.

Norton, B., P.C. Eames et S.N.G. Lo (1998). *Full-energy-chain analysis of greenhouse gas emissions for solar thermal electric power generation systems.* Renewable Energy, 15(1-4), p. 131-136.

Odeh, N.A. et T.T. Cockerill (2008). *Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage.* Energy Policy, 36(1), p. 367-380.

Pacca, S.A. (2003). *Global Warming Effect Applied to Electricity Generation Technologies.* Thèse de doctorat, Université de Californie, Berkeley, CA, États-Unis d'Amérique, 191 p.

Phumpradab, K., S.H. Gheewala et M. Sagisaka (2009). *Life cycle assessment of natural gas power plants in Thailand.* International Journal of Life Cycle Assessment, 14(4), p. 354-363.

Raugei, M., S. Bargigli et S. Ulgiati (2005). *A multi-criteria life cycle assessment of molten carbonate fuel cells (MCFC) – A comparison to natural gas turbines.* International Journal of Hydrogen Energy, 30(2), p. 123-130.

Riva, A., S. D'Angelosante et C. Trebeschi (2006). *Natural gas and the environmental results of life cycle assessment.* Energy, 31(1), p. 138-148.

Saskatchewan Energy Conservation and Development Authority (1994). *Levelized Cost and Full Fuel Cycle Environmental Impacts of Saskatchewan's Electric Supply Options.* Publication SECDA N° T800-94-004, Saskatoon, SK, Canada, 205 p.

SENES Consultants Limited (2005). *Methods to Assess the Impacts on the Natural Environment of Generation Options.* Preparé par SENES Consultants pour l'Ontario Power Authority, Richmond Hill, Ontario, Canada, 166 p.

Spath, P.L. et M.K. Mann (2000). *Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System.* NREL/TP-570-27715, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, États-Unis d'Amérique, 54 p.

Spath, P.L. et M.K. Mann (2004). *Biomass Power and Conventional Fossil Systems with and without CO_2 Sequestration – Comparing the Energy Balance, Greenhouse Gas Emissions and Economics.* NREL/TP-510-32575. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, États-Unis d'Amérique, 28 p.

Uchiyama, Y. (1996). *Validity of FENCH-GHG study: Methodologies and databases.* comparison of energy sources in terms of their full-energy-chain emission factors of greenhouse gases. In: IAEA Advisory Group Meeting on Analysis of Net Energy Balance and Full-energy-chain Greenhouse Gas Emissions for Nuclear and Other Energy Systems, Beijing, Chine, 4-7 oct 1994, Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), p. 85-94. Disponible à l'adresse www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/013/28013414.pdf.

Énergie nucléaire (32)

AEA Technologies (2005). *Environmental Product Declaration of Electricity from Torness Nuclear Power Station.* British Energy, Londres, Royaume-Uni, 52 p.

AEA Technologies (2006). *Carbon Footprint of the Nuclear Fuel Cycle.* British Energy, Londres, Royaume-Uni, 26 p.

Andseta, S., M.J. Thompson, J.P. Jarrell et D.R. Pendergast (1998). *Candu reactors and greenhouse gas emissions.* In: Canadian Nuclear Society 19th Annual Conference. Sous la direction de D.B. Buss et de D.A. Jenkins, Association nucléaire canadienne, Toronto, Ontario, Canada, 18-21 octobre 1998.

AXPO Nuclear Energy (2008). *Beznau Nuclear Power Plant.* Axpo AG, Baden, Allemagne, 21 p.

Badea, A.A., I. Voda et C.F. Dinca (2010). *Comparative analysis of coal, natural gas and nuclear fuel life cycles by chains of electrical energy production.* UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering, 72(2), p. 221-238.

Beerten, J., E. Laes, G. Meskens et W. D'haeseleer (2009). *Greenhouse gas emissions in the nuclear life cycle: A balanced appraisal.* Energy Policy, 37(12), p. 5056-5058.

Dones, R., S. Hirschberg et I. Knoepfel (1996). *Greenhouse gas emission inventory based on full energy chain analysis.* In: IAEA Advisory Group Meeting on Analysis of Net Energy Balance and Full-energy-chain Greenhouse Gas Emissions for Nuclear and Other Energy Systems. Beijing, Chine, 4-7 octobre 1994, p. 95-114. Disponible à l'adresse www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/013/28013414.pdf.

Dones, R., X. Zhou et C. Tian (2004). *Life cycle assessment (LCA) of Chinese energy chains for Shandong electricity scenarios.* International Journal of Global Energy Issues, 22(2/3/4), p. 199-224.

Dones, R., T. Heck, C. Bauer, S. Hirschberg, P. Bickel, P. Preiss, L.I. Panis et I. De Vlieger (2005). *Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications: New Energy Technologies.* ENG1-CT-2002-00609, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen, Suisse, 76 p.

Dones, R., C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, T. Heck, A. Roder, M.F. Emenegger, R. Frischknecht, N. Jungbluth et M. Tuchschmid (2007). *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries.* Ecoinvent Rapport N° 5, Institut Paul Scherrer, Centre suisse pour les inventaires de cycle de vie écologiques, Villigen, Suisse, 185 p. Disponible à l'adresse www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf.

Dones, R., C. Bauer et T. Heck (2007). *LCA of Current Coal, Gas and Nuclear Electricity Systems and Electricity Mix in the USA.* Institut Paul Scherrer, Villigen, Suisse, 4 p.

Frischknecht, R. (1998). *Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making: Scope-Dependent Inventory System Models and Context-Specific Joint Product Allocation.* Dissertation, Institut fédéral suisse de technologie de Zurich, Zurich, Suisse, 256 p.

Fthenakis, V.M. et H.C. Kim (2007). *Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: A life-cycle study.* Energy Policy, 35(4), p. 2549-2557.

Hondo, H. (2005). *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case.* Energy, 30(11-12), p. 2042-2056.

Kivisto, A., 1995: *Energy payback period and carbon dioxide emissions in different power generation methods in Finland.* In: IAEE International Conference. International Association for Energy Economics, Washington, D.C., 5-8 juillet 1995, p. 191-198.

Krewitt, W., P. Mayerhofer, R. Friedrich, A. Truckenmüller, T. Heck, A. Gressmann, F. Raptis, F. Kaspar, J. Sachau, K. Rennings, J. Diekmann et B. Praetorius (1997). *ExternE National Implementation in Germany.* Université de Stuttgart, Stuttgart, Allemagne, 189 p.

Lecointe, C., D. Lecarpentier, V. Maupu, D. Le Boulch et R. Richard (2007). *Final Report on Technical Data, Costs and Life Cycle Inventories of Nuclear Power Plants.* D14.2 – RS 1a, New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS), Rome, Italie, 62 p. Disponible à l'adresse www.needs-project.org/RS1a/RS1a%20D14.2%20Final%20report%20on%20nuclear.pdf.

Lenzen, M., C. Dey, C. Hardy et M. Bilek (2006). *Life-cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia.* ISA, Université de Sydney, Sydney, Australie, 180 p.

Meridian Corporation (1989). *Energy System Emissions and Materiel Requirements.* Meridian Corporation, Alexandria, VA, États-Unis d'Amérique, 34 p.

Rashad, S.M. et F.H. Hammad (2000). *Nuclear power and the environment: Comparative assessment of environmental and health impacts of electricity-generating systems.* Applied Energy, 65(1-4), p. 211-229.

San Martin, R.L. (1989). *Environmental Emissions from Energy Technology Systems: The Total Fuel Cycle.* Département américain de l'énergie, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 21 p.

Saskatchewan Energy Conservation and Development Authority (1994). *Levelized Cost and Full Fuel Cycle Environmental Impacts of Saskatchewan's Electric Supply Options.* Publication SECDA N° T800-94-004, Saskatoon, SK, Canada, 205 p.

Tokimatsu, K., T. Asami, Y. Kaya, T. Kosugi et E. Williams (2006). *Evaluation of lifecycle CO_2 emissions from the Japanese electric power sector in the 21st century under various nuclear scenarios.* Energy Policy, 34(7), p. 833-852.

Uchiyama, Y. (1996). *Validity of FENCH-GHG study: Methodologies and databases.* comparison of energy sources in terms of their full-energy-chain emission factors of greenhouse gases. In: IAEA Advisory Group Meeting on Analysis of Net Energy Balance and Full-energy-chain Greenhouse Gas Emissions for Nuclear and Other Energy Systems, Beijing, Chine, 4-7 oct. 1994, Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), p. 85-94. Disponible à l'adresse www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/013/28013414.pdf.

Uchiyama, Y. (1996). *Life cycle analysis of electricity generation and supply systems: Net energy analysis and greenhouse gas emissions.* In: Electricity, Health and the Environment: Comparative Assessment in Support of Decision Making, Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), Vienne, Autriche, 16-19 octobre 1995, p. 279-291.

Vattenfall (2007). *Summary of Vattenfall AB Generation Nordic Certified Environmental Product Declaration, EPD® of Electricity from Ringhals Nuclear Power Plant.* S-P-00026 2007-11-01, Vattenfall, Stockholm, Suède, 4 p.

Vattenfall (2007). *Vattenfall AB Generation Nordic Certified Environmental Product Declaration, EPD, of Electricity from Forsmark Nuclear Power Plant.* Rapport N° S-P-00088, Vattenfall, Stockholm, Suède, 59 p.

Voorspools, K.R., E.A. Brouwers et W.D. D'Haeseleer (2000). *Energy content and indirect greenhouse gas emissions embedded in 'emission-free' power plants: Results for the low countries.* Applied Energy, 67(3), p. 307-330.

White, S.W. et G.L. Kulcinski (1999). *'Birth to Death' Analysis of the Energy Payback Ratio and CO_2 Gas Emission Rates from Coal, Fission, Wind, and DT Fusion Power Plants.* Université du Wisconsin, Madison, WI, États-Unis d'Amérique, 17 p.

Wibberley, L. (2001). *Coal in a Sustainable Society.* Australian Coal Association Research Program, Brisbane, Queensland, Australie.

Yasukawa, S., Y. Tadokoro et T. Kajiyama (1992). *Life cycle CO_2 emission from nuclear power reactor and fuel cycle system.* In: Expert Workshop on Life-cycle Analysis of Energy Systems, Methods and Experience. Paris, France, 21-22 mai 1992, p. 151-160.

Yasukawa, S., Y. Tadokoro, O. Sato et M. Yamaguchi (1996). *Integration of indirect CO_2 emissions from the full energy chain. In: IAEA Advisory Group Meeting on Analysis of Net Energy Balance and Full-energy-chain Greenhouse Gas Emissions for Nuclear and Other Energy Systems.* Beijing, Chine, p. 139-150. Disponible à l'adresse www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/013/28013414.pdf.

Énergie marine (5)

Parker, R.P.M., G.P. Harrison et J.P. Chick (2008). *Energy and carbon audit of an offshore wave energy converter.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 221(8), p. 1119-1130.

Rule, B.M., Z.J. Worth et C.A. Boyle (2009). *Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand.* Environmental Science & Technology, 43(16), p. 6406-6413.

Sorensen, H.C. et S. Naef (2008). *Report on Technical Specification of Reference Technologies (Wave and Tidal Power Plant).* New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS), Rome, Italie, et SPOK Consult, Copenhague, Danemark, 59 p.

Wibberley, L. (2001). *Coal in a Sustainable Society.* Australian Coal Association Research Program, Brisbane, Queensland, Australie.

Woollcombe-Adams, C., M. Watson et T. Shaw (2009). *Severn Barrage tidal power project: Implications for carbon emissions.* Water and Environment Journal, 23(1), p. 63-68.

Production d'énergie à partir de pétrole (10)

Bates, J.L. (1995). *Full Fuel Cycle Atmospheric Emissions and Global Warming Impacts from UK Electricity Generation.* ETSU, Londres, Royanme-Uni, 51 p.

Berry, J.E., M.R. Holland, P.R. Watkiss, R. Boyd et W. Stephenson (1998). *Power Generation and the Environment: a UK Perspective.* AEA Technology, Oxfordshire, Royaume-Uni, 275 p.

Commission européenne, 1995: *Oil & Gas. ExternE: Externalities of Energy.* Commission européenne, Direction générale XII, Luxembourg, 4, 470 p.

Dones, R., S. Hirschberg et I. Knoepfel (1996). *Greenhouse gas emission inventory based on full energy chain analysis.* In: IAEA Advisory Group Meeting on Analysis of Net Energy Balance and Full-energy-chain Greenhouse Gas Emissions for Nuclear and Other Energy Systems. Beijing, Chine, 4-7 octobre 1994, p. 95-114. Disponible à l'adresse www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/013/28013414.pdf.

Dones, R., U. Ganter et S. Hirschberg (1999). *Environmental inventories for future electricity supply systems for Switzerland.* International Journal of Global Energy Issues, 12(1-6), p. 271-282.

Dones, R., T. Heck, C. Bauer, S. Hirschberg, P. Bickel, P. Preiss, L.I. Panis et I. De Vlieger (2005). *Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications: New Energy Technologies.* ENG1-CT-2002-00609, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen, Suisse, 76 p.

Dones, R., C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, T. Heck, A. Roder, M.F. Emenegger, R. Frischknecht, N. Jungbluth et M. Tuchschmid (2007). *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries.* Rapport N° 5 d'Ecoinvent, Institut Paul Scherrer, Centre suisse pour les inventaires de cycle de vie écologiques, Villigen, Suisse, 185 p. Disponible à l'adresse www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf.

Gagnon, L., C. Belanger et Y. Uchiyama (2002). *Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001.* Energy Policy, 30, p. 1267-1279.

Hondo, H. (2005). Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. Energy, 30(11-12), p. 2042-2056.

Kannan, R., C.P. Tso, R. Osman et H.K. Ho (2004). *LCA-LCCA of oil fired steam turbine power plant in Singapore.* Energy Conversion and Management, 45, p. 3091-3107.

Solaire photovoltaïque (26)

Alsema, E.A. (2000). *Energy pay-back time and CO_2 emissions of PV systems.* Progress in Photovoltaics, 8(1), p. 17-25.

Alsema, E.A. et M.J. de Wild-Scholten (2006). *Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production*. In: 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Louvain, Belgique, 31 mai - 2 juin 2006. Disponible à l'adresse www.mech.kuleuven.be/lce2006/Registration_papers.htm.

Dones, R., T. Heck et S. Hirschberg (2004). *Greenhouse gas emissions from energy systems, comparison and overview.* Encyclopedia of Energy, 3, p. 77-95.

Frankl, P., E. Menichetti, M. Raugei, S. Lombardelli et G. Prennushi (2005). *Final Report on Technical Data, Costs and Life Cycle Inventories of PV Applications.* Ambiente Italia, Milan, Italie, 81 p.

Fthenakis, V.M. et E. Alsema (2006). *Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004 - early 2005 status.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 14(3), p. 275-280.

Fthenakis, V. et H.C. Kim (2006). *Energy use and greenhouse gas emissions in the life cycle of CdTe photovoltaics.* In: Life-Cycle Analysis Tools for "Green" Materials and Process Selection, Materials Research Society Symposium 2006. S. Sous la direction de S. Papasavva et V.M.P.O. Fthenakis, Materials Research Society, Boston, MA, 28-30 novembre 2005, 895, p. 83-88.

Fthenakis, V.M. et H.C. Kim (2007). *Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: A life-cycle study.* Energy Policy, 35(4), p. 2549-2557.

Garcia-Valverde, R., C. Miguel, R. Martinez-Bejar et A. Urbina (2009). *Life cycle assessment study of a 4.2 kW(p) stand-alone photovoltaic system.* Solar Energy, 83(9), p. 1434-1445.

Graebig, M., S. Bringezu et R. Fenner (2010). *Comparative analysis of environmental impacts of maize-biogas and photovoltaics on a land use basis.* Solar Energy, 84(7), p. 1255-1263.

Greijer, H., L. Karlson, S.E. Lindquist et A. Hagfeldt (2001). *Environmental aspects of electricity generation from a nanocrystalline dye sensitized solar cell system.* Renewable Energy, 23(1), p. 27-39.

Hayami, H., M. Nakamura et K. Yoshioka (2005). *The life cycle CO_2 emission performance of the DOE/NASA solar power satellite system: a comparison of alternative power generation systems in Japan.* IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 35(3), p. 391-400.

Hondo, H. (2005). *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case.* Energy, 30(11-12), p. 2042-2056.

Ito, M., K. Kato, K. Komoto, T. Kichimi, H. Sugihara et K. Kurokawa (2003). *An analysis of variation of very large-scale PV (VLS-PV) systems in the world deserts.* In: 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC). WCPEC, Osaka, Japon, 11-18 mai 2003, C, p. 2809-2814.

Kannan, R., K.C. Leong, R. Osman, H.K. Ho et C.P. Tso (2006). *Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7 kWp distributed solar PV System in Singapore.* Solar Energy, 80(5), p. 555-563.

Lenzen, M., C. Dey, C. Hardy et M. Bilek (2006). *Life-cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia.* ISA, Université de Sydney, Sydney, Australie, 180 p.

Muneer, T., S. Younes, P. Clarke et J. Kubie (2006). *Napier University's School of Engineering Life Cycle Assessment of a Medium Sized PV Facility in Edinburgh.* EuroSun. ES06-T10-0171, The Solar Energy Society, Glasgow, 157 p.

Pacca, S.A. (2003). *Global Warming Effect Applied to Electricity Generation Technologies.* Thèse de doctorat, Université de Californie, Berkeley, CA, États-Unis d'Amérique, 191 p.

Pehnt, M. (2006). *Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies.* Renewable Energy, 31(1), p. 55-71.

Pehnt, M., A. Bubenzer et A. Rauber (2002). *Life cycle assessment of photovoltaic systems – Trying to fight deep-seated prejudices.* In: Photovoltaics Guidebook for Decision Makers. Sous la direction de A. Bubenzer et de J. Luther, Springer, Berlin, Allemagne, p. 179-213.

Reich-Weiser, C. (2010). *Decision-Making to Reduce Manufacturing Greenhouse Gas Emissions.* Thèse de doctorat, Université de Californie, Berkeley, CA, États-Unis d'Amérique, 101 p.

Reich-Weiser, C., T. Fletcher, D.A. Dornfeld et S. Horne (2008). *Development of the Supply Chain Optimization and Planning for the Environment (SCOPE) tool – Applied to solar energy.* In: 2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. IEEE, San Francisco, CA, 19-21 mai 2008, 6 p.

Sengul, H. (2009). *Life Cycle Analysis of Quantum Dot Semiconductor Materials.* Thèse de doctorat, Université de l'Illinois, Chicago, IL, États-Unis d'Amérique, 255 p.

Stoppato, A. (2008). *Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation.* Energy, 33(2), p. 224-232.

Tripanagnostopoulos, Y., M. Souliotis, R. Battisti et A. Corrado (2006). *Performance, cost and life-cycle assessment study of hybrid PVT/AIR solar systems.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 14(1), p. 65-76.

Uchiyama, Y. (1997). *Life cycle analysis of photovoltaic cell and wind power plants.* In: IAEA Advisory Group Meeting on the Assessment of Greenhouse Gas Emissions from the Full Energy Chain of Solar and Wind Power, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche, 21-24 octobre 1996, p. 111-122.

Voorspools, K.R., E.A. Brouwers et W.D. D'Haeseleer (2000). *Energy content and indirect greenhouse gas emissions embedded in 'emission-free' power plants: Results for the low countries.* Applied Energy, 67(3), p. 307-330.

Énergie éolienne (49)

Ardente, F., M. Beccali, M. Cellura et V. Lo Brano (2008). *Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 12(1), p. 200-217.

Berry, J.E., M.R. Holland, P.R. Watkiss, R. Boyd et W. Stephenson (1998). *Power Generation and the Environment: a UK Perspective.* AEA Technology, Oxfordshire, Royaume-Uni, 275 p.

Chataignere, A. et D. Le Boulch (2003). *Wind Turbine (WT) Systems: Final Report.* Énergie de France (R&D EDF), Paris, France, 110 p.

Commission européenne (1995). *Wind & Hydro. ExternE: Externalities of Energy.* Commission européenne, Direction générale XII, Luxembourg, 6, 295 p.

Conseil mondial de l'énergie (2004). *Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment.* Conseil mondial de l'énergie, Londres, Royaume-Uni, 67 p.

Crawford, R.H. (2009). *Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9), p. 2653-2660.

Dolan, S.L. (2007). *Life Cycle Assessment and Emergy Synthesis of a Theoretical Offshore Wind Farm for Jacksonville, Florida.* Thèse de maîtrise, Université de Floride, 125 p. Disponible à l'adresse http://etd.fcla.edu/UF/UFE0021032/dolan_s.pdf.

Dones, R., T. Heck, C. Bauer, S. Hirschberg, P. Bickel, P. Preiss, L.I. Panis et I. De Vlieger (2005). *Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications: New Energy Technologies.* ENG1-CT-2002-00609, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen, Suisse, 76 p.

Dones, R., C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, T. Heck, A. Roder, M.F. Emenegger, R. Frischknecht, N. Jungbluth et M. Tuchschmid (2007). *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries.* Rapport N° 5 d'Ecoinvent, Institut Paul Scherrer, Centre suisse pour les inventaires de cycle de vie écologiques, Villigen, Suisse, 185 p. Disponible à l'adresse www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf.

DONG Energy (2008). *Life Cycle Approaches to Assess Emerging Energy Technologies: Final Report on Offshore Wind Technology.* DONG Energy, Fredericia, Danemark, 60 p.

Enel SpA (2004). *Certified Environmental Product Declaration of Electricity from Enel's Wind Plant in Sclafani Bagni (Palermo, Italy).* Enel SpA, Rome, Italie, 25 p.

Frischknecht, R. (1998). *Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making: Scope-Dependent Inventory System Models and Context-Specific Joint Product Allocation.* Dissertation, Institut fédéral Suisse de technologie, Zurich, Zurich, Suisse, 256 p.

Hartmann, D. (1997). *FENCH-analysis of electricity generation greenhouse gas emissions from solar and wind power in Germany.* In: IAEA Advisory Group Meeting on Assessment of Greenhouse Gas Emissions from the Full Energy Chain of Solar and Wind Power. IAEA, Vienne, Autriche, 21-24 octobre 1996, p. 77-87.

Hondo, H. (2005). *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case.* Energy, 30(11-12), p. 2042-2056.

Jacobson, M.Z. (2009). *Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security.* Energy & Environmental Science, 2, p. 148-173.

Jungbluth, N., C. Bauer, R. Dones et R. Frischknecht (2005). *Life cycle assessment for emerging technologies: Case studies for photovoltaic and wind power.* International Journal of Life Cycle Assessment, 10(1), p. 24-34.

Khan, F.I., K. Hawboldt et M.T. Iqbal (2005). *Life cycle analysis of wind-fuel cell integrated system.* Renewable Energy, 30(2), p. 157-177.

Krewitt, W., P. Mayerhofer, R. Friedrich, A. Truckenmüller, T. Heck, A. Gressmann, F. Raptis, F. Kaspar, J. Sachau, K. Rennings, J. Diekmann et B. Praetorius (1997). *ExternE National Implementation in Germany.* Université de Stuttgart, Stuttgart, Allemagne, 189 p.

Kuemmel, B. et B. Sørensen (1997). *Life-cycle Analysis of the Total Danish Energy System.* IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, Roskilde, Danemark, 219 p.

Lee, Y.-M. et Y.-E. Tzeng (2008). *Development and life-cycle inventory analysis of wind energy in Taiwan.* Journal of Energy Engineering, 134(2), p. 53-57.

Lenzen, M. et U. Wachsmann (2004). *Wind turbines in Brazil and Germany: An example of geographical variability in life-cycle assessment.* Applied Energy, 77(2), p. 119-130.

Liberman, E.J. (2003). *A Life Cycle Assessment and Economic Analysis of Wind Turbines Using Monte Carlo Simulation.* Thèse de maîtrise, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, OH, États-Unis d'Amérique, 162 p.

Martínez, E., F. Sanz, S. Pellegrini, E. Jiménez et J. Blanco (2009). *Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method.* The International Journal of Life Cycle Assessment, 14(1), p. 52-63.

McCulloch, M., M. Raynolds et M. Laurie (2000). *Life-Cycle Value Assessment of a Wind Turbine.* The Pembina Institute, Drayton Valley, Alberta, Canada, 14 p.

Nadal, G. (1995). *Life cycle direct and indirect pollution associated with PV and wind energy systems.* In: ISES 1995: Solar World Congress. Fundacion Bariloche, Harare, Zimbabwe, 11-15 septembre 1995, p. 39.

Pacca, S.A. (2003). *Global Warming Effect Applied to Electricity Generation Technologies.* Thèse de doctorat, Université de Californie, Berkeley, CA, États-Unis d'Amérique, 191 p.

Pacca, S.A. et A. Horvath (2002). *Greenhouse gas emissions from building and operating electric power plants in the upper Colorado River Basin.* Environmental Science & Technology, 36(14), p. 3194-3200.

Pehnt, M. (2006). *Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies.* Renewable Energy, 31(1), p. 55-71.

Pehnt, M., M. Oeser et D.J. Swider (2008). *Consequential environmental system analysis of expected offshore wind electricity production in Germany.* Energy, 33(5), p. 747-759.

Proops, J.L.R., P.W. Gay, S. Speck et T. Schröder, 1996: *The lifetime pollution implications of various types of electricity generation. An input-output analysis.* Energy Policy, 24(3), p. 229-237.

Rule, B.M., Z.J. Worth et C.A. Boyle (2009). *Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand.* Environmental Science & Technology, 43(16), p. 6406-6413.

Rydh, J., M. Jonsson et P. Lindahl (2004). *Replacement of Old Wind Turbines Assessed from Energy, Environmental and Economic Perspectives.* Université de Kalmar, Département de technologie, Kalmar, Suède, 33 p.

Saskatchewan Energy Conservation and Development Authority (1994). *Levelized Cost and Full Fuel Cycle Environmental Impacts of Saskatchewan's Electric Supply Options.* Publication SECDA N° T800-94-004, Saskatoon, SK, Canada, 205 p.

Schleisner, L. (2000). *Life cycle assessment of a wind farm and related externalities.* Renewable Energy, 20(3), p. 279-288.

Spitzley, D.V. et G.A. Keoleian (2005). *Life Cycle Environmental and Economic Assessment of Willow Biomass Electricity: A Comparison with Other Renewable and Non-renewable Sources.* Rapport N° CSS04-05R, Université du Michigan, Center for Sustainable Systems, Ann Arbor, MI, États-Unis d'Amérique, 69 p.

Tremeac, B. et F. Meunier (2009). *Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8), p. 2104-2110.

Uchiyama, Y. (1997). *Life cycle analysis of photovoltaic cell and wind power plants.* In: IAEA Advisory Group Meeting on the Assessment of Greenhouse Gas Emissions from

the Full Energy Chain of Solar and Wind Power, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche, 21-24 octobre 1996, p. 111-122.

van de Vate, J.F. (1996). *Comparison of the greenhouse gas emissions from the full energy chains of solar and wind power generation.* In: IAEA Advisory Group Meeting organized by the IAEA Headquarters. AIEA, Vienne, Autriche, 21-24 octobre 1996, p. 13.

Vattenfall AB (2003). *Certified Environmental Product Declaration of Electricity from Vattenfall AB's Swedish Windpower Plants.* Vattenfall, Stockholm, Suède, 31 p.

Vattenfall AB (2010). *Vattenfall Wind Power Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity from Vattenfall's Wind Farms.* Vattenfall Wind Power, Stockholm, Suède, 51 p.

Vestas Wind Systems A/S (2006). *Life Cycle Assessment of Electricity Produced from Onshore Sited Wind Power Plants Based on Vestas V82-1.65 MW turbines.* Vestas, Randers, Danemark, 77 p.

Vestas Wind Systems A/S (2006). *Life Cycle Assessment of Offshore and Onshore Sited Wind Power Plants Based on Vestas V90-3.0 MW Turbines.* Vestas, Randers, Danemark, 60 p.

Voorspools, K.R., E.A. Brouwers et W.D. D'Haeseleer (2000). *Energy content and indirect greenhouse gas emissions embedded in 'emission-free' power plants: Results for the low countries.* Applied Energy, 67(3), p. 307-330.

Waters, T.M., R. Forrest et D.C. McConnell (1997). *Life-cycle assessment of wind energy: A case study based on Baix Ebre Windfarm, Spain.* In: Wind Energy Conversion 1997: Proceedings of the Nineteenth BWEA Wind Energy Conference, sous la direction de R. Hunter, Mechanical Engineering Publications Limited, Université Heriot-Watt, Édimbourg, Royaume-Uni, 16-18 juillet 1997, p. 231-238.

Weinzettel, J., M. Reenaas, C. Solli et E.G. Hertwich (2009). *Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine.* Renewable Energy, 34(3), p. 742-747.

White, S. (2006). *Net energy payback and CO_2 emissions from three Midwestern wind farms: An update.* Natural Resources Research, 15(4), p. 271-281.

White, S.W. et G.L. Kulcinski (1998). *Net Energy Payback and CO_2 Emissions from Wind-Generated Electricity in the Midwest.* UWFDM-1092, Université du Wisconsin, Madison, WI, États-Unis d'Amérique, 72 p.

White, S.W. et G.L. Kulcinski (1999). *'Birth to Death' Analysis of the Energy Payback Ratio and CO_2 Gas Emission Rates from Coal, Fission, Wind, and DT Fusion Power Plants.* Université du Wisconsin, Madison, WI, États-Unis d'Amérique, 17 p.

Wibberley, L. (2001). *Coal in a Sustainable Society.* Australian Coal Association Research Program, Brisbane, Queensland, Australie.

A.II.5.3 Étude de l'utilisation opérationnelle d'eau pour les technologies de production d'électricité

Cet aperçu présente les méthodes employées pour procéder à une étude exhaustive des estimations publiées concernant l'intensité en exploitation des prélèvements et de la consommation d'eau de la part des technologies de production d'électricité. Les résultats, discutés à la section 9.3.4.4, sont présentés à la figure 9.14.

A.II.5.3.1 Méthodes employées pour l'étude

La documentation concernant la consommation et les prélèvements d'eau pendant le cycle de vie pour les technologies de production d'électricité a été examinée, mais, compte tenu du manque de qualité et d'ampleur des données, cet examen n'a porté que sur l'utilisation d'eau aux fins d'exploitation. La documentation sur le cycle de vie envisagée ici concerne les études qui ont subi avec succès le processus de tri utilisé pour l'étude, dans le rapport, des émissions de GES pendant le cycle de vie pour les technologies de production d'électricité (voir A.II.5.2). L'utilisation d'eau en amont pour des cultures énergétiques servant à produire des biocombustibles n'est pas abordée dans la présente section.

Dans cette étude, nous n'avons pas modifié (sauf pour convertir les unités) les estimations concernant l'utilisation d'eau publiés dans des études qui ont satisfait aux critères de tri ni vérifié leur exactitude. En outre, du fait que les valeurs estimées sont utilisées telles qu'elles sont publiées, une forte incohérence méthodologique est inévitable, qui limite la comparabilité des estimations. Nous avons tenté, dans quelques cas, d'analyser la documentation sur l'utilisation opérationnelle d'eau pour les technologies de production d'électricité, malgré le manque d'exhaustivité des technologies ou de la documentation primaire envisagées dans ces cas (Gleick, 1993; Inhaber, 2004; NETL, 2007a, b; WRA, 2008; Fthenakis et Kim, 2010). C'est pourquoi la présente étude alimente d'une manière unique le discours du présent rapport.

Collecte de la documentation

Le recensement de la documentation pertinente a commencé par le rassemblement d'un ensemble central de références dont disposaient auparavant les chercheurs, suivi de recherches dans de grandes bases de données bibliographiques au moyen d'algorithmes de recherche et de combinaisons de mots clés, et s'est poursuivi par l'étude des listes de référence de toutes les références obtenues. Toute la documentation recueillie a été ajoutée à une base de données bibliographique. Les méthodes de collecte de documentation présentées ici s'appliquent à toutes les catégories de technologies de production d'électricité étudiées dans le rapport.

Tri de la documentation

Les références recueillies ont été indépendamment soumises à un tri permettant de choisir celles qui répondaient aux critères de qualité et de pertinence définis. Les études sur l'utilisation opérationnelle d'eau devaient avoir été rédigées en anglais, s'appliquer à des installations situées en Amérique du Nord, fournir des informations suffisantes pour calculer un facteur d'intensité d'utilisation d'eau (en mètres cubes par mégawatt-heure produit), permettre d'obtenir des estimations de la consommation d'eau qui ne fassent pas double emploi avec d'autres estimations précédemment publiées et se présenter sous forme d'articles de revues, de comptes rendus de conférences ou de rapports (émanant de services gouvernementaux, d'organisations non gouvernementales, d'institutions internationales ou d'entreprises). Des estimations de l'intensité nationale moyenne de l'utilisation d'eau pour des technologies données et de l'utilisation opérationnelle d'eau dans les centrales actuelles ainsi que des estimations fondées sur des expériences en laboratoire ont également été prises en considération. Compte tenu de la rareté des estimations disponibles de la consommation d'eau pour des technologies de production d'électricité et vu que les estimations publiées sont déjà utilisées dans un contexte stratégique, aucun autre tri fondé sur la qualité ou l'exhaustivité des informations n'a été effectué.

Analyse des estimations

Les estimations ont été classées par technologie de combustibles et par système de refroidissement. On a réuni certains types de technologies de combustibles et de systèmes de refroidissement pour faciliter l'analyse. Le solaire thermodynamique inclut les systèmes à réflecteurs paraboliques et les centrales solaires à tour. Le nucléaire inclut les réacteurs à eau pressurisée et les réacteurs à eau bouillante. Le charbon inclut les technologies sous-critiques et supercritiques. Pour les technologies de refroidissement en circuit fermé, aucune distinction n'a été établie entre les tours de refroidissement à tirage naturel et celles à tirage mécanique. De même, tous les systèmes refroidis par des piscines sont traités de façon identique. Les estimations ont été converties dans une unité fonctionnelle commune, à savoir le nombre de

mètres cubes par MWh produit. Cette conversion a été effectuée sans recours à des hypothèses exogènes (les estimations nécessitant de telles hypothèses n'ont pas été analysées).

A.II.5.3.2 Liste des références

CEC (2008). *2007 Environmental Performance Report of California's Electrical Generation System.* California Energy Commission (CEC) Final Staff Report, CA, États-Unis d'Amérique.

Cohen, G., D.W. Kearney, C. Drive, D. Mar et G.J. Kolb (1999). *Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for Concentrating Solar Plants.* Sandia National Laboratories Technical Report-SAND99-1290, doi:10.2172/8378, Albuquerque, NM, États-Unis d'Amérique.

Département américain de l'énergie (2009). *Concentrating Solar Power Commercial Application Study: Reducing Water Consumption of Concentrating Solar Power Electricity Generation.* Rapport au Congrès. Département américain de l'énergie, Washington, DC, États-Unis d'Amérique.

Dziegielewski, B. et T. Bik (2006). *Water Use Benchmarks for Thermoelectric Power Generation.* Research Report of the Department of Geography and Environmental Resources, Southern Illinois University, Carbondale, IL, États-Unis d'Amérique.

EPRI (2002). *Water and sustainability (Volume 2): an assessment of water demand, supply, and quality in the U.S.-the next half century.* Rapport technique 1006785, Electric Power Research Institute (EPRI). Palo Alto, CA, États-Unis d'Amérique.

EPRI et Département américain de l'énergie (1997). *Renewable Energy Technology Characterizations.* EPRI Topical Report-109496, Electric Power Research Institute (EPRI) et Département américain de l'énergie, Palo Alto, CA et Washington, DC, États-Unis d'Amérique.

Feeley, T.J., L. Green, J.T. Murphy, J. Hoffmann et B.A. Carney (2005). *Department of Energy / Office of Fossil Energy's Power Plant Water Management R & D Program.* National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA, États-Unis d'Amérique, 18 p. Disponible à l'adresse www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/ewr/pubs/IEP_Power_Plant_Water_R%26D_Final_1.pdf

Feeley, T.J., T.J. Skone, G.J. Stiegel, A. Mcnemar, M. Nemeth, B. Schimmoller, J.T. Murphy et L. Manfredo (2008). *Water: A critical resource in the thermoelectric power industry.* Energy, 33, p. 1-11.

Fthenakis, V. et H.C. Kim (2010). *Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, p. 2039-2048.

Gleick, P. (1992). *Environmental consequences of hydroelectric development: The role of facility size and type.* Energy, 17(8), p. 735-747.

Gleick, P. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources.* Oxford University Press, New York, NY, États-Unis d'Amérique.

Hoffmann, J., S. Forbes et T. Feeley (2004). *Estimating Freshwater Needs to Meet 2025 Electricity Generating Capacity Forecasts.* National Energy Technology Laboratory Pittsburgh, PA, États-Unis d'Amérique, 12 p. Disponible à l'adresse www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/ewr/pubs/Estimating%20Freshwater%20Needs%20to%202025.pdf.

Inhaber, H. (2004). *Water use in renewable and conventional electricity production.* Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 26, p. 309-322, doi:10.1080/00908310490266698.

Kelly, B. (2006). *Nexant Parabolic Trough Solar Power Plant Systems Analysis-Task 2: Comparison of Wet and Dry Rankine Cycle Heat Rejection.* Subcontractor Report-NREL/SR-550-40163, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/40163.pdf.

Leitner, A. (2002). *Fuel from the Sky: Solar Power's Potential for Western Energy Supply.* Subcontractor Report-NREL/SR 550-32160, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.nrel.gov/csp/pdfs/32160.pdf.

Mann, M. et P. Spath (1997). *Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined-Cycle System.* Rapport technique TP-430-23076, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/23076.pdf.

Meridian (1989). *Energy System Emissions and Material Requirements.* Rapport de la Meridian Corporation au Département américain de l'énergie, Washington, DC, États-Unis d'Amérique.

NETL (2007). *Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants-Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity Final Report.* DOE/NETL-2007/1281, National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/BitBase_FinRep_2007.pdf.

NETL (2007). *Power Plant Water Usage and Loss Study.* 2007 Update. National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/pubs/pdf/WaterReport_Revised%20May2007.pdf.

NETL (2009). *Estimating Freshwater Needs to Meet Future Thermoelectric Generation Requirements.* DOE/NETL-400/2009/1339, National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/2009%20Water%20Needs%20Analysis%20-%20Final%20%289-30-2009%29.pdf.

NETL (2009). *Existing Plants, Emissions and Capture – Setting Water-Energy R&D Program Goals.* DOE/NETL-2009/1372, National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/ewr/water/pdfs/EPEC%20water-energy%20R%26D%20goal%20update%20v.1%20may09.pdf.

Sargent et Lundy (2003). *Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts.* NREL/SR-550-34440, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.nrel.gov/docs/fy04osti/34440.pdf.

Stoddard, L., J. Abiecunas et R.O. Connell (2006). *Economic, Energy, and Environmental Benefits of Concentrating Solar Power in California.* NREL/SR-550-39291, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.nrel.gov/docs/fy06osti/39291.pdf.

Torcellini, P., N. Long et R. Judkoff (2003). *Consumptive Water Use for U.S. Power Production.* Rapport technique TP-550-33905, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.nrel.gov/docs/fy04osti/33905.pdf.

Turchi, C., M. Wagner et C. Kutscher (2010). *Water Use in Parabolic Trough Power Plants: Summary Results from WorleyParsons' Analyses.* NREL/TP-5500-49468, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.nrel.gov/docs/fy11osti/49468.pdf.

Viebahn, P., S. Kronshage, F. Trieb et Y. Lechon (2008). *Final Report on Technical Data, Costs, and Life Cycle Inventories of Solar Thermal Power Plants.* Projet 502687, New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS), Bruxelles, Belgique, 95 p. Disponible à l'adresse www.needs-project.org/RS1a/RS1a%20D12.2%20Final%20report%20concentrating%20solar%20thermal%20power%20plants.pdf.

WorleyParsons (2009). *Analysis of Wet and Dry Condensing 125 MW Parabolic Trough Power Plants.* Rapport de WorleyParsons N° NREL-2-ME-REP-0002-R0, WorleyParsons Group, North Sydney, Australie.

WorleyParsons (2009). *Beacon Solar Energy Project Dry Cooling Evaluation.* Rapport de WorleyParsons N° FPLS-0-LI-450-0001, WorleyParsons Group, North Sydney, Australie.

WorleyParsons (2010). *Material Input for Life Cycle Assessment Task 5 Subtask 2: O&M Schedules.* Rapport de WorleyParsons N° NREL-0-LS-019-0005, WorleyParsons Group, North Sydney, Australie.

WorleyParsons (2010). *Parabolic Trough Reference Plant for Cost Modeling with the Solar Advisor Model.* Rapport de WorleyParsons, WorleyParsons Group, North Sydney, Australie.

WRA (2008). *A Sustainable Path: Meeting Nevada's Water and Energy Demands.* Western Resource Advocates (WRA), Boulder, CO, États-Unis d'Amérique, 43 p. Disponible à l'adresse www.westernresourceadvocates.org/water/NVenergy-waterreport.pdf.

Yang, X. et B. Dziegielewski (2007). *Water use by thermoelectric power plants in the United States.* Journal of the American Water Resources Association, 43, p. 160-169.

A.II.5.4 Analyse des risques

Nous présentons, dans la présente section, les méthodes employées pour l'évaluation des dangers et des risques liés aux technologies énergétiques décrits dans la section 9.3.4.7 et nous indiquons des références et des hypothèses centrales (tableau A.II.5).

Il existe des définitions très diverses du terme «risque», qui dépendent du domaine d'application et de l'objet d'étude (Haimes, 2009). Dans les domaines de l'ingénierie et des sciences naturelles, on définit souvent le risque de façon quantitative: risque (R) = probabilité (p) x conséquences (C). Cette définition n'inclut pas de facteurs subjectifs de perception des risques et d'aversion pour le risque, qui peuvent aussi influer sur le processus de décision; autrement dit, les intéressés peuvent établir des compromis entre facteurs de risque quantitatifs et qualitatifs (Gregory et Lichtenstein, 1994; Stirling, 1999). L'évaluation des risques se complique lorsque certains risques transcendent sensiblement les niveaux ordinaires, leur gestion posant des problèmes à la société (WBGU, 2000). Par exemple, Renn *et al.* (2001) ont classé les risques en trois catégories ou zones: 1) la zone normale, gérable par des moyens courants et par le biais des lois et règlements existants, 2) la zone intermédiaire, et 3) la zone intolérable (zone d'autorisation). Kristensen *et al.* (2006) ont proposé une méthode de classement modifiée pour améliorer la caractérisation des risques. Récemment, d'autres aspects tels que la protection des infrastructures essentielles, les systèmes complexes interdépendants et les «inconnues inconnues» ont pris une grande importance (Samson *et al.*, 2009; Aven et Zio, 2011; Elahi, 2011).

L'évaluation des dangers et risques propres aux diverses technologies énergétiques est présentée dans la section 9.3.4.7. Fondée sur une évaluation comparative des risques, elle a été établie par l'Institut Paul Scherrer (PSI) dans les années 1990[4]. En son cœur se trouve l'Energy-Related Severe Accident Database (ENSAD: base de données sur les accidents graves liés à l'énergie) (Hirschberg *et al.*, 1998, 2003a; Burgherr *et al.*, 2004, 2008; Burgherr et Hirschberg, 2005). La prise en compte des chaînes complètes de l'énergie est indispensable, du fait qu'un accident peut se produire en tout point de la chaîne: exploration, extraction, traitement, stockage, transport sur de longues distances, distribution régionale et locale, production d'électricité et/ou de chaleur, traitement des déchets et élimination. Toutefois, ces étapes ne s'appliquent pas toutes à l'ensemble des chaînes énergétiques. Pour les chaînes d'énergie fossile (charbon, pétrole et gaz naturel) et d'énergie hydroélectrique, l'ENSAD contient de nombreuses données d'archives pour la période 1970-2008. Dans le cas de l'énergie nucléaire, on fait appel à une évaluation probabiliste de la sécurité pour tenir compte d'accidents hypothétiques (Hirschberg *et al.*, 2004a). En revanche, l'étude des technologies ÉR autres que l'énergie hydroélectrique est fondée sur les statistiques disponibles concernant les accidents, sur l'analyse de la documentation et sur le jugement des experts, en raison du nombre limité ou de l'absence de données d'archives. Il est à noter que les analyses disponibles ont une portée limitée et n'incluent pas de modélisation probabiliste des accidents hypothétiques, ce qui peut avoir des incidences sur les résultats, en particulier dans le cas du solaire photovoltaïque.

Il n'existe pas de définition consensuelle de l'expression «accident grave» dans la documentation. Pour ce qui concerne la base de données ENSAD du PSI, on considère qu'un accident est grave s'il est caractérisé par l'une ou plusieurs des conséquences suivantes:

- Au moins 5 morts, ou
- Au moins 10 blessés, ou
- Au moins 200 personnes évacuées, ou
- Une vaste interdiction de la consommation de nourriture, ou
- Des émissions d'hydrocarbures supérieures à 10 000 tonnes métriques, ou
- Un nettoyage forcé du sol et de l'eau dans une zone d'au moins 25 km^2, ou
- Des pertes économiques d'au moins 5 millions de dollars É.-U.$_{2005}$.

Pour les grandes technologies énergétiques centralisées, les résultats sont indiqués pour trois grands ensembles de pays: les pays membres de l'OCDE, les pays non membres de l'OCDE et les 27 pays membres de l'Union européenne. Une telle distinction est significative du fait des différences importantes de gestion, de cadres réglementaires et de culture générale de la sécurité entre les pays hautement développés (les pays membres de l'OCDE et les 27 pays de l'Union européenne) et les pays non membres de l'OCDE, moins développés pour la plupart (Burgherr et Hirschberg, 2008). Dans le cas de la Chine, les données sur la chaîne du charbon n'ont été analysées que pour les années 1994 à 1999, pour lesquelles des données sur les accidents émanant du China Coal Industry Yearbook (CCIY: annuaire de l'industrie charbonnière chinoise) étaient disponibles, ce qui laisse supposer que, pour les années précédentes, les déclarations étaient insuffisantes (Hirschberg *et al.*, 2003a,b). Pour la période 2000-2009, l'annuaire ne présente que le total annuel des décès observés dans la chaîne du charbon, ce qui explique pourquoi ces données n'ont pas été associées à celles de la période précédente. Pour les technologies ÉR à l'exception de l'énergie hydroélectrique, les évaluations peuvent être considérées comme représentatives des pays développés (dont les pays membres de l'OCDE et les 27 pays de l'Union européenne).

Les comparaisons des diverses chaînes énergétiques sont fondées sur des données normalisées par rapport à l'unité de production d'électricité. Pour les chaînes d'énergie fossile, l'énergie thermique a été convertie en quantité de courant électrique au moyen d'un facteur de rendement générique de 0,35. Pour les technologies relatives à l'énergie nucléaire, à l'énergie hydroélectrique et aux nouvelles sources d'énergie renouvelable, la normalisation est simple, puisque le produit obtenu est de l'énergie électrique. On a choisi le gigawatt électrique par an ($GW_{él}$/an), du fait que les grandes centrales ont une capacité de l'ordre de 1 GW de puissance électrique ($GW_{él}$). De ce fait, le $GW_{él}$/an est l'unité qui s'impose lorsqu'on présente des indicateurs normalisés dans le cadre d'évaluations de technologies.

A.II.6 Définitions régionales et regroupements par pays

Dans le présent rapport, nous utilisons les définitions régionales et les regroupements par pays ci après, largement fondés sur les définitions des Perspectives énergétiques mondiales pour 2009 (AIE, 2009). Le nom et la définition des regroupements varient dans la documentation publiée et, dans le rapport, il peut y avoir, dans certains cas, de légers écarts par rapport à la norme ci-dessous. Les autres noms de regroupements qui apparaissent dans le rapport sont indiqués entre parenthèses.

4 Dans une étude récente, Felder (2009) a comparé la base de données ENSAD à une autre compilation des accidents liés à l'énergie (Sovacool, 2008a). Malgré des différences nombreuses et parfois importantes entre les deux jeux de données, on y fait plusieurs constatations intéressantes concernant les aspects méthodologiques et stratégiques de la question. Toutefois, cette étude est fondée sur la première version officielle de l'ENSAD (Hirschberg *et al.*, 1998) et ne tient donc pas compte des actualisations et des extensions ultérieures. Dans une autre étude réalisée par Colli *et al.* (2009), on a utilisé une approche légèrement différente faisant appel à un ensemble assez vaste d'«indicateurs de caractérisation des risques». Cependant, les essais réels illustrés par des exemples sont fondés sur les données de l'ENSAD.

Afrique
Afrique du Sud, Algérie, Angola, Bénin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Cameroun, Cap-Vert, Comores, Congo, Côte d'Ivoire, Djibouti, Égypte, Érythrée, Éthiopie, Gabon, Gambie, Ghana, Guinée, Guinée-Bissau, Guinée équatoriale, Kenya, Lesotho, Libéria, Libye, Madagascar, Malawi, Mali, Maroc, Maurice, Mauritanie, Mozambique, Namibie, Niger, Nigéria, Ouganda, République centrafricaine, République démocratique du Congo, République-Unie de Tanzanie, Réunion, Rwanda, Sao Tomé-et-Principe, Sénégal, Seychelles, Sierra Leone, Somalie, Soudan, Swaziland, Tchad, Togo, Tunisie, Zambie et Zimbabwe.

Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques visés à l'annexe I de la Convention
Allemagne, Australie, Autriche, Bélarus, Belgique, Bulgarie, Canada, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Japon, Lettonie, Liechtenstein, Lituanie, Luxembourg, Monaco, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovénie, Suède, Suisse, Turquie et Ukraine.

Europe de l'Est/Eurasie (parfois appelé «pays à économie en transition»)
Albanie, Arménie, Azerbaïdjan, Bélarus, Bosnie-Herzégovine, Bulgarie, Croatie, Estonie, ex-République yougoslave de Macédoine, Fédération de Russie, Géorgie, Kazakhstan, Kirghizistan, Lettonie, Lituanie, République de Moldova, Roumanie, Serbie, Slovénie, Tadjikistan, Turkménistan, Ukraine et Ouzbékistan. Pour des raisons statistiques, cette région inclut également Chypre, Gibraltar et Malte.

Union européenne
Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovénie et Suède.

G8
Allemagne, Canada, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, France, Italie, Japon et Royaume-Uni.

Amérique latine
Antigua-et-Barbuda, Antilles néerlandaises, Argentine, Aruba, Bahamas, Barbade, Belize, Bermudes, Bolivie, Brésil, Chili, Colombie, Costa Rica, Cuba, Dominique, El Salvador, Équateur, Guyane française, Grenade, Guadeloupe, Guatemala, Guyana, Haïti, Honduras, îles Caïmans, îles Malouines, îles Turks et Caicos, îles Vierges britanniques, Jamaïque, Martinique, Montserrat, Nicaragua, Panama, Paraguay, Pérou, République dominicaine, Sainte-Lucie, Saint-Kitts-et-Nevis, Saint-Pierre et Miquelon, Saint-Vincent-et-les-Grenadines, Suriname, Trinité-et-Tobago, Uruguay et Venezuela.

Moyen-Orient
Arabie saoudite, Bahreïn, Émirats arabes unis, Iraq, Israël, Jordanie, Koweït, Liban, Oman, Qatar, République arabe syrienne, République islamique d'Iran et Yemen. Inclut la zone neutre située entre l'Arabie saoudite et l'Iraq.

Pays d'Asie non membres de l'OCDE (parfois appelée «Asie en développement»)
Afghanistan, Bangladesh, Bhoutan, Brunéi Darussalam, Cambodge, Chine, Fidji, îles Cook, îles Salomon, Inde, Indonésie, Kiribati, Laos, Macao, Malaisie, Maldives, Mongolie, Myanmar, Népal, Nouvelle-Calédonie, Pakistan, Papouasie–Nouvelle-Guinée, Philippines, Polynésie française, République populaire démocratique de Corée, Samoa, Singapour, Sri Lanka, Taïwan,Thaïlande, Timor-Oriental, Tonga, Vanuatu et Viet Nam.

Afrique du Nord
Algérie, Égypte, Libye, Maroc et Tunisie.

Pays de l'OCDE
OCDE Amérique du Nord, OCDE Europe et OCDE Pacifique selon la liste ci-après. Les pays qui ont adhéré à l'OCDE en 2010 (Chili, Estonie, Israël et Slovénie) ne sont pas encore inclus dans les statistiques présentées dans ce rapport.

OCDE Amérique du Nord
Canada, États-Unis d'Amérique et Mexique.

OCDE Europe
Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse et Turquie.

OCDE Pacifique
Australie, Corée, Japon et Nouvelle-Zélande.

OPEP (Organisation des pays exportateurs de pétrole)
Algérie, Angola, Arabie saoudite, Émirats arabes unis, Équateur, Iraq, Koweït, Libye, Nigéria, Qatar, République islamique d'Iran et Venezuela.

Afrique subsaharienne
Groupements régionaux d'Afrique à l'exception du groupement régional d'Afrique du Nord et de l'Afrique du Sud.

Tableau A.II.5 | Aperçu des sources de données et des hypothèses pour le calcul des taux de mortalité et des conséquences maximales.

Charbon

- Base de données ENSAD du PSI; accidents graves (≥5 décès)[1].
- Pays de l'OCDE: 1970-2008; 86 accidents; 2 239 décès. 27 pays de l'Union européenne: 1970-2008; 45 accidents; 989 décès; Pays non membres de l'OCDE à part la Chine: 1970-2008; 163 accidents; 5 808 décès (Burgherr *et al.*, 2011).
- Études antérieures: Hirschberg *et al.* (1998); Burgherr *et al.* (2004, 2008).
- Chine (1994-1999): 818 accidents; 11 302 décès (Hirschberg *et al.*, 2003a; Burgherr et Hirschberg, 2007).
- Chine (2000-2009): À titre de comparaison, le taux de mortalité pendant la période 2000-2009 a été calculé selon les données publiées par l'Administration d'État chinoise de la sécurité au travail[2]. Les valeurs annuelles présentées par l'Administration correspondent au total des décès (accidents graves et mineurs). Ainsi, pour le calcul du taux de mortalité, on a supposé que les décès dus à des accidents graves représentaient 30 % des décès totaux, comme l'indique le Programme chinois relatif aux technologies énergétiques (Hirschberg *et al.*, 2003a; Burgherr et Hirschberg, 2007). Taux de mortalité en Chine (2000-2009): 3,14 décès/$GW_{él}$/an.

Pétrole

- Base de données ENSAD du PSI; accidents graves (≥5 décès)[1].
- Pays de l'OCDE: 1970-2008; 179 accidents; 3 383 décès. 27 pays de l'Union européenne: 1970-2008; 64 accidents; 1 236 décès. Pays non membres de l'OCDE: 1970-2008; 351 accidents; 19 376 décès (Burgherr *et al.*, 2011).
- Études antérieurees: Hirschberg *et al.* (1998); Burgherr *et al.* (2004, 2008).

Gaz naturel

- Base de données ENSAD du PSI; accidents graves (≥5 décès)[1]
- Pays de l'OCDE: 1970-2008; 109 accidents; 1 257 décès. 27 pays de l'Union européenne: 1970-2008; 37 accidents; 366 décès. Pays non membres de l'OCDE: 1970-2008; 77 accidents; 1 549 décès (Burgherr *et al.*, 2011).
- Études antérieures: Hirschberg *et al.* (1998); Burgherr *et al.* (2004, 2008); Burgherr et Hirschberg (2005).

Nucléaire

- Deuxième génération - Réacteur à eau pressurisée, Suisse; évaluation probabiliste simplifiée de la sécurité (Roth *et al.*, 2009).
- Troisième génération - Réacteur pressurisé européen (EPR) 2030, Suisse; évaluation probabiliste simplifiée de la sécurité (Roth *et al.*, 2009). Les résultats disponibles concernant l'EPR évoqué ci-dessus indiquent un taux de mortalité sensiblement plus faible (décès précoces : 3,83E-07 décès/$GW_{él}$/an; décès latents: 1,03E-05 décès/$GW_{él}$-an; décès totaux: 1,07E-05 décès/$GW_{él}$-an en raison d'un ensemble de caractéristiques avancées concernant en particulier les systèmes actifs et passifs de gestion des accidents graves. Toutefois, les conséquences maximales des accidents hypothétiques pourraient augmenter (env. 48 800 décès) en raison de la taille accrue des centrales (1 600 MW) et de l'inventaire plus important de la radioactivité associée.
- En cas d'accident grave dans la chaîne nucléaire, les décès immédiats ou précoces (aigus) ont une importance mineure et se produisent peu de temps après l'exposition, alors que les décès latents (chroniques) dus aux cancers sont dominants par rapport aux décès totaux (Hirschberg *et al.*, 1998). Ainsi, les chiffres ci-dessus concernant les deuxième et troisième générations incluent les décès immédiats et latents.
- Three Mile Island 2, TMI-2: L'accident de Three Mile Island s'est produit en raison d'une défectuosité du matériel associée à des erreurs humaines. Étant donné la faible quantité de radioactivité émise, la dose collective effective reçue par les populations a été évaluée à 40 personnes-sievert (Sv). La dose individuelle reçue par les populations a été très faible: < 1 mSv dans le cas le plus grave. On a compté un décès supplémentaire dû au cancer sur la base de la dose collective. Cependant, 144 000 personnes ont été évacuées hors de la zone entourant la centrale. On trouvera de plus amples informations dans Hirschberg *et al.* (1998).
- Tchernobyl: 31 décès immédiats. Selon une évaluation probabiliste de la sécurité, il y a eu de 9 000 à 33 000 décès latents Hirschberg *et al.* (1998).
- Les décès latents évalués par le PSI pour Tchernobyl vont de 9 000 environ pour l'Ukraine, la Russie et le Bélarus à 33 000 pour l'ensemble de l'hémisphère Nord pour les 70 années à venir (Hirschberg *et al.*, 1998). Selon une étude récente réalisée par de nombreuses institutions de l'ONU, jusqu'à 4 000 personnes risquent de mourir en raison d'une exposition aux radiations dans les zones les plus contaminées (Forum de Tchernobyl, 2005). Ce chiffre est nettement plus faible que la limite supérieure de l'intervalle défini par le PSI, qui, toutefois, n'a pas été limité aux zones les plus contaminées.

Hydroélectricité

- Base de données ENSAD du PSI; accidents graves (≥5 décès)[1].
- Pays de l'OCDE: 1970-2008; 1 accident; 14 décès. (rupture du barrage Teton, États-Unis d'Amérique, 1976). 27 pays de l'Union européenne: 1970-2008; 1 accident; 116 décès (surverse du barrage de Belci, Roumanie, 1991) (Burgherr *et al.*, 2011).
- Selon un modèle théorique, les conséquences maximales de la rupture totale d'un grand barrage suisse vont de 7 125 à 11 050 décès sans alerte préalable, mais peuvent passer de 2 à 27 décès en cas d'alerte deux heures avant (Burgherr et Hirschberg, 2005, et références dans le rapport).
- Pays non membres de l'OCDE: 1970-2008; 12 accidents; 30 007 décès. Pays non membres de l'OCDE à l'exception de Banqiao/Shimantan: 1970-2008; 11 accidents; 4 007 décès; accident le plus important en Chine (rupture du barrage de Banqiao/Shimantan, Chine, 1975) exclus (Burgherr *et al.*, 2011).
- Études antérieures: Hirschberg *et al.* (1998); Burgherr *et al.* (2004, 2008).

Photovoltaïque

- Les chiffres actuels ne s'appliquent qu'aux techniques faisant appel au silicium (Si), pondérées selon leur part du marché en 2008: 86 % pour le c-Si et 5,1 % pour le a-Si/u-Si.
- L'analyse porte sur les risques posés par des substances dangereuses choisies (chlore, acide chlorhydrique, silane et trichlorosilane) ayant un rapport avec le cycle de vie du photovoltaïque à base de silicium.
- Les données sur les accidents ont été recueillies pour les États-Unis (pour lesquels elles sont nombreuses) et pour les années 2000 à 2008, afin que les chiffres soient représentatifs des technologies actuellement exploitées.
- Sources de la base de données: système de notification des interventions en cas d'urgence, plan de gestion des risques, service de données sur les risques graves, système de déclaration des accidents graves, analyse, recherche et informations sur les accidents, sécurité du travail et mise à jour sur la santé
- Comme les accidents signalés ne concernent pas uniquement le secteur du photovoltaïque, on a évalué la part effective des décès dus au phtovoltaïque en se fondant sur la quantité des substances indiquées ci-dessus dans le secteur du photovoltaïque en tant que part de la production totale américaine ainsi que sur des données émanant de la base de données d'Ecoinvent.
- On a ensuite normalisé les décès cumulés pour les quatre substances indiquées ci-dessus par rapport à l'unité de production d'énergie en employant un taux d'utilisation générique de 10 % (Burgherr *et al.*, 2008).
- On a supposé qu'un accident sur 100 était grave[3].
- Évaluation actuelle du taux de mortalité: Burgherr *et al.* (2011).
- Les conséquences maximales sont déterminées selon le jugement d'experts en raison du nombre limité de données d'archives (Burgherr *et al.*, 2008).
- Études précédentes: Hirschberg *et al.* (2004b); Burgherr *et al.* (2008); Roth *et al.* (2009).
- Autres études: Ungers *et al.* (1982); Fthenakis *et al.* (2006); Fthenakis et Kim (2010).

Suite à la page suivante →

Éolien terrestre

- Sources de données: base de données sur les décès dus à l'énergie éolienne (Gipe, 2010) et compilation d'accidents dus aux éoliennes (Caithness Windfarm Information Forum, 2010).
- Accidents mortels en Allemagne de 1975 à 2010; 10 accidents; 10 décès: 3 accidents de voiture où l'on a invoqué la distraction des conducteurs à cause des éoliennes ont été exclus de l'analyse.
- On a supposé qu'un accident sur 100 était grave[3].
- Évaluation actuelle du taux de mortalité: Burgherr *et al.* (2011).
- Les conséquences maximales sont déterminées selon le jugement d'experts en raison du nombre limité de données d'archives (Roth *et al.*, 2008).
- Étude précédente: Hirschberg *et al.* (2004b).

Éolien au large des côtes

- Sources de données: voir "Éolien terrestre" ci-dessus.
- À ce jour, il y a eu deux accidents mortels en phase de construction au Royaume-Uni (2009 et 2010), avec 2 décès, et deux accidents mortels en phase de recherche aux États-Unis (2008), avec 2 décès.
- Pour les chiffres actuels, on n'a compté que les accidents survenus au Royaume-Uni en supposant un taux d'utilisation générique de 0,43 (Roth *et al.*, 2009) pour une capacité installée de 1 340 MW (Renewable UK, 2010).
- On a supposé qu'un accident sur 100 était grave[3].
- Évaluation actuelle du taux de mortalité: Burgherr *et al.* (2011).
- Conséquences maximales: voir Sur terre ci-dessus.

Biomasse: biogaz de cogénération

- Base de données ENSAD du PSI; accidents graves (≥5 décès)[1]. En raison du nombre limité de données d'archives, on a déterminé approximativement le taux de mortalité pour le biogaz de cogénération en utilisant des données sur les accidents dus au gaz naturel émanant de la chaîne de distribution locale.
- OCDE: 1970-2008; 24 accidents; 260 décès (Burgherr *et al.*, 2011).
- Les conséquences maximales sont déterminées selon le jugement d'experts en raison du nombre limité de données d'archives (Burgherr *et al.*, 2011).
- Étude précédente: (Roth *et al.*, 2009).

Système géothermique amélioré

- Pour calculer le taux de mortalité, nous n'avons pris en compte que les accidents de forage de puits. En raison du nombre limité de données d'archives, nous n'avons tenu compte que des accidents d'exploration dans la chaîne du pétrole, de façon très approximative, en raison de la similarité du matériel de forage.
- Base de données ENSAD du PSI; accidents graves (≥5 décès)[1].
- OCDE: 1970-2008; exploration pétrolière; 7 accidents; 63 décès (Burgherr *et al.* 2011).
- Pour déterminer les conséquences maximales, nous avons considéré qu'un phénomène sismique induit risquait d'être le plus grave. En raison du nombre limité de données d'archives, nous avons pris comme approximation la limite supérieure de la mortalité déduite de l'évaluation des risques sismiques que présente le système géothermique amélioré de Bâle (Suisse) (Dannwolf et Ulmer, 2009).
- Étude précédente: (Roth *et al.*, 2009).

Notes: 1. Les taux de mortalité sont normalisés en fonction de l'unité de production d'énergie utilisée pour le total correspondant du pays considéré. Les conséquences maximales correspondent à l'accident qui a fait le plus de victimes pendant la période d'observation. 2. Les données produites par l'Administration d'État chinoise de la sécurité au travail pour les années 2000 à 2005 ont été publiées dans le China Labour News Flash N° 60 (6 janvier 2006) et sont disponibles à l'adresse www.china-labour.org.hk/en/node/19312 (consultée en décembre 2010). Les données de l'Administration pour les années 2006 à 2009, publiées par Reuters, sont disponibles aux adresses www.reuters.com/article/idUSPEK206148 (pour 2006), uk.reuters.com/article/idUKPEK32921920080112 (pour 2007) et uk.reuters.com/article/idUKTOE61D00V20100214 (pour 2008 et 2009) (toutes consultées en décembre 2010). 3. Par exemple, le taux est d'environ 1 sur 10 pour le gaz naturel en Allemagne (Burgherr et Hirschberg, 2005) et d'environ 1 sur 3 pour le charbon en Chine (Hirschberg *et al.*, 2003b).

A.II.7 Facteurs généraux de conversion de l'énergie

Le tableau A.II.6 présente des facteurs de conversion de diverses unités relatives à l'énergie.

Tableau A.II.6 | Facteurs de conversion d'unités d'énergie (AIE, 2010b).

Vers:	TJ	Gcal	Mtép	MBtu	GWh
De:	**Multiplier par:**				
TJ	1	238,8	$2{,}388 \times 10^{-5}$	947,8	0,2778
Gcal	$4{,}1868 \times 10^{-3}$	1	10^{-7}	3,968	$1{,}163 \times 10^{-3}$
Mtép	$4{,}1868 \times 10^{4}$	10^{7}	1	$3{,}968 \times 10^{7}$	11 630
MBtu	$1{,}0551 \times 10^{-3}$	0,252	$2{,}52 \times 10^{-8}$	1	$2{,}931 \times 10^{-4}$
GWh	3,6	860	$8{,}6 \times 10^{-5}$	3 412	1

Notes: MBtu: million de Btu (British thermal units); GWh: gigawattheure; Gcal: gigacalorie; TJ: térajoule; Mtép: mégatonne d'équivalent pétrole

Références

Aven, T. et E. Zio (2011). *Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making.* Reliability Engineering and System Safety, 96, p. 64-74.

Beerten, J., E. Laes, G. Meskens et W. D'haeseleer (2009). *Greenhouse gas emissions in the nuclear life cycle: A balanced appraisal.* Energy Policy, 37(12), p. 5056-5058.

BP (2009). *BP Statistical Review of World Energy.* BP, Londres, Royaume-Uni.

Burgherr, P. et S. Hirschberg (2005). *Comparative assessment of natural gas accident risks.* Rapport N° 05-01 du PSI, Institut Paul Scherrer, Villigen, Suisse.

Burgherr, P. et S. Hirschberg (2007). *Assessment of severe accident risks in the Chinese coal chain.* International Journal of Risk Assessment and Management, 7(8), p. 1157-1175.

Burgherr, P. et S. Hirschberg (2008). *A comparative analysis of accident risks in fossil, hydro and nuclear energy chains.* Human and Ecological Risk Assessment, 14(5), p. 947-973.

Burgherr, P., S. Hirschberg et E. Cazzoli (2008). *Final report on quantification of risk indicators for sustainability assessment of future electricity supply options.* NEEDS Deliverable no D7.1 – Research Stream 2b. NEEDS project. New Energy Externalities Developments for Sustainability, Bruxelles, Belgique.

Burgherr, P., S. Hirschberg, A. Hunt et R.A. Ortiz (2004). *Severe accidents in the energy sector.* Final Report to the European Commission of the EU 5th Framework Programme «New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies» (NewExt). Direction générale de la recherche, Développement technologique et démonstration (RDT), Bruxelles, Belgique.

Burgherr, P., P. Eckle, S. Hirschberg et E. Cazzoli (2011). *Final Report on Severe Accident Risks including Key Indicators.* SECURE Deliverable No. D5.7.2a. Security of Energy Considering its Uncertainty, Risk and Economic implications (SECURE), Bruxelles, Belgique. Disponible à l'adresse gabe.web.psi.ch/pdfs/secure/SECURE%20-%20Deliverable_D5-7-2%20-%20Severe%20Accident%20Risks.pdf.

Caithness Windfarm Information Forum (2010). *Summary of Wind Turbine Accident data to 30th September 2010.* Caithness Windfarm Information Forum, Royaume-Uni. Disponible à l'adresse www.caithnesswindfarms.co.uk/fullaccidents.pdf.

Chernobyl Forum (2005). *Chernobyl's legacy: health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine.* The Chernobyl Forum: 2003–2005. Deuxième version révisée. Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), Vienne, Autriche.

CMÉ (1993). *Energy for Tomorrow's World.* WEC Commission global report. Conseil mondial de l'énergie, Londres, Royaume-Uni.

Colli, A., D. Serbanescu et B.J.M. Ale (2009). *Indicators to compare risk expressions, grouping, and relative ranking of risk for energy systems: Application with some accidental events from fossil fuels.* Safety Science, 47(5), p. 591-607.

Dannwolf, U.S. et F. Ulmer (2009). *AP6000 Report - Technology risk comparison of the geothermal DHM project in Basel, Switzerland - Risk appraisal including social aspects.* SERIANEX Group - Trinational Seismis Risk Analysis Expert Group, RiskCom, Pforzheim, Allemagne.

Elahi, S. (2011). *Here be dragons…exploring the 'unknown unknowns'.* Futures, 43(2), p. 196-201.

Felder, F.A. (2009). *A critical assessment of energy accident studies.* Energy Policy, 37(12), p. 5744-5751.

Fisher, B.S., N. Nakicenovic, K. Alfsen, J. Corfee Morlot, F. de la Chesnaye, J.-C. Hourcade, K. Jiang, M. Kainuma, E. La Rovere, A. Matysek, A. Rana, K. Riahi, R. Richels, S. Rose, D. van Vuuren et R. Warren (2007). *Issues related to mitigation in the long term context.* In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Sous la direction de B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave et L.A. Meyer, Cambridge University Press, p. 169-250.

Frankl, P., E. Menichetti et M. Raugei (2005). *Final Report on Technical Data, Costs and Life Cycle Inventories of PV Applications.* NEEDS: New Energy Externalities Developments for Sustainability. Ambiente Italia, Milan, Italie, 81 p.

Fthenakis, V.M. et H.C. Kim (2007). *Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: A life-cycle study.* Energy Policy, 35(4), p. 2549-2557.

Fthenakis, V.M. et H.C. Kim (2010). *Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(7), p. 2039-2048.

Fthenakis, V.M., H.C. Kim, A. Colli et C. Kirchsteiger (2006). *Evaluation of risks in the life cycle of photovoltaics in a comparative context.* In: 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Allemagne, 4-8 septembre 2006.

Gagnon, L. (2008). *Civilisation and energy payback.* Energy Policy, 36, p. 3317-3322.

GIEC (1996). *Climate Change 1995: Impacts, Adaptation, and Mitigation of Climate Change - Scientific-Technical Analysis.* Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Sous la direction de R.T. Watson, M.C. Zinyowera et R.H. Moss, Cambridge University Press, 879 p.

GIEC (2000). *Special Report on Emissions Scenarios.* Sous la direction de N. Nakicenovic et R. Swart, Cambridge University Press, 570 p.

Gipe, P. (2010). *Wind Energy Deaths Database - Summary of Deaths in Wind Energy.* Éditeur non indiqué. Disponible à l'adresse www.wind-works.org/articles/BreathLife.html.

Gleick, P. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources.* Oxford University Press, New York, NY, États-Unis d'Amérique.

Gregory, R. et S. Lichtenstein (1994). *A hint of risk: tradeoffs between quantitative and qualitative risk factors.* Risk Analysis, 14(2), p. 199-206.

Haimes, Y.Y. (2009). *On the complex definition of risk: A systems-based approach.* Risk Analysis, 29(12), p. 1647-1654.

Herendeen, R.A. (1988). *Net energy considerations. In: Economic Analysis of Solar Thermal Energy Systems.* Sous la direction de R.E. West et F. Kreith, The MIT Press, Cambridge, MA, États-Unis d'Amérique, p. 255-273.

Hirschberg, S., G. Spiekerman et R. Dones (1998). *Severe Accidents in the Energy Sector - First Edition.* Rapport N° 98-16 du PSI. Institut Paul Scherrer, Villigen, Suisse.

Hirschberg, S., P. Burgherr, G. Spiekerman et R. Dones (2004a). *Severe accidents in the energy sector: Comparative perspective.* Journal of Hazardous Materials, 111(1-3), p. 57-65.

Hirschberg, S., P. Burgherr, G. Spiekerman, E. Cazzoli, J. Vitazek et L. Cheng (2003a). *Assessment of severe accident risks. In: Integrated Assessment of Sustainable Energy Systems in China.* The China Energy Technology Program - A framework for decision support in the electric sector of Shandong province. Alliance for Global Sustainability Series Vol. 4. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, Pays-Bas, p. 587-660.

Hirschberg, S., P. Burgherr, G. Spiekerman, E. Cazzoli, J. Vitazek et L. Cheng (2003b). *Comparative Assessment of Severe Accidents in the Chinese Energy Sector.* Rapport N°03-04 du PSI. Institut Paul Scherrer, Villigen, Suisse.

Hirschberg, S., R. Dones, T. Heck, P. Burgherr, W. Schenler et C. Bauer (2004b). *Sustainability of Electricity Supply Technologies under German Conditions: A Comparative Evaluation.* Rapport N° 04-15 du PSI. Institut Paul Scherrer, Villigen, Suisse.

Huettner, D.A. (1976). *Net energy analysis: an economic assessment.* Science, 192(4235), p. 101-104.

IEA (2009). *Perspectives énérgétiques mondiales 2009.* Agence internationale de l'énergie, Paris, France, p.670-673

IEA (2010a). *Energy Balances of Non-OECD Countries; 2010 Edition.* Agence internationale de l'énergie, Paris, France.

IEA (2010b). *Key World Energy Statistics.* Agence internationale de l'énergie, Paris, France.

IEA/OCDE/Eurostat (2005). *Energy Statistics Manual.* Organisation de coopération et de développement économiques et Agence internationale de l'énergie, Paris, France.

Inhaber, H. (2004). *Water use in renewable and conventional electricity production.* Energy Sources, 26(3), p. 309-322.

Jacobson, M.Z. (2009). *Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security.* Energy and Environmental Science, 2(2), p. 148-173.

Jelen, F.C. et J.H. Black (1983). *Cost and Optimitization Engineering.* McGraw-Hill, New York, NY, États-Unis d'Amérique, 538 p.

Jungbluth, N., C. Bauer, R. Dones et R. Frischknecht (2005). *Life cycle assessment for emerging technologies: Case studies for photovoltaic and wind power.* International Journal of Life Cycle Assessment, 10(1), p. 24-34.

Kristensen, V., T. Aven et D. Ford (2006). *A new perspective on Renn and Klinke's approach to risk evaluation and management.* Reliability Engineering and System Safety, 91, p. 421-432.

Kubiszewski, I., C.J. Cleveland et P.K. Endres (2010). *Meta-analysis of net energy return for wind power systems.* Renewable Energy, 35(1), p. 218-225.

Leach, G. (1975). *Net energy analysis - is it any use?* Energy Policy, 3(4), p. 332-344.

Lenzen, M. (1999). *Greenhouse gas analysis of solar-thermal electricity generation.* Solar Energy, 65(6), p. 353-368.

Lenzen, M. (2008). *Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review.* Energy Conversion and Management, 49(8), p. 2178-2199.

Lenzen, M. et J. Munksgaard (2002). *Energy and CO_2 analyses of wind turbines – review and applications.* Renewable Energy, 26(3), p. 339-362.

Lenzen, M., C. Dey, C. Hardy et M. Bilek (2006). *Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia.* Report to the Prime Minister's Uranium Mining, Processing and Nuclear Energy Review (UMPNER), ISA, Université de Sydney, Sydney, Australie. Disponible à l'adresse http://www.isa.org.usyd.edu.au/publications/documents/ISA_Nuclear_Report.pdf.

Lightfoot, H.D. (2007). *Understand the three different scales for measuring primary energy and avoid errors.* Energy, 32(8), p. 1478-1483.

Loulou, R., M. Labriet et A. Kanudia (2009). *Deterministic and stochastic analysis of alternative climate targets under differentiated cooperation regimes.* Energy Economics, 31(Supplément 2), p. S131-S143.

Macknick, J. (2009). *Energy and Carbon Dioxide Emission Data Uncertainties.* International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) Rapport intérimaire, IR-09-032, IIASA, Laxenburg, Autriche.

Martinot, E., C. Dienst, L. Weiliang et C. Qimin (2007). *Renewable energy futures: Targets, scenarios, and pathways.* Annual Review of Environment and Resources, 32(1), p. 205-239.

Morita, T., J. Robinson, A. Adegbulugbe, J. Alcamo, D. Herbert, E. Lebre la Rovere, N. Nakicenivic, H. Pitcher, P. Raskin, K. Riahi, A. Sankovski, V. Solkolov, B.d. Vries et D. Zhou (2001). *Greenhouse gas emission mitigation scenarios and implications.* In: Climate Change 2001: Mitigation; Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the IPCC. Sous la direction de Metz, B., Davidson, O., Swart, R. et Pan, J. Cambridge University Press, p. 115-166.

Nakicenovic, N., A. Grubler et A. McDonald (sous la direction de) (1998). *Global Energy Perspectives.* Cambridge University Press.

Neely, J.G., A.E. Magit, J.T. Rich, C.C.J. Voelker, E.W. Wang, R.C. Paniello, B. Nussenbaum et J.P. Bradley (2010). *A practical guide to understanding systematic reviews and meta-analyses.* Otolaryngology-Head and Neck Surgery, 142, p. 6-14.

NETL (2007a). *Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants-Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity Final Report.* DOE/NETL-2007/1281, National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA, États-Unis d'Amérique.

NETL (2007b). *Power Plant Water Usage and Loss Study.* 2007 Update. National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/pubs/pdf/WaterReport_Revised%20May2007.pdf

Perry, A.M., W.D. Devine et D.B. Reister (1977). *The Energy Cost of Energy - Guidelines for Net Energy Analysis of Energy Supply Systems.* ORAU/IEA(R)-77-14, Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities, Oak Ridge, TN, États-Unis d'Amérique, 106 p.

Renewable UK (2010). *Offshore Windfarms Operational.* Renewable UK. Disponible à l'adresse www.renewable-manifesto.com/ukwed/offshore.asp.

Renn, O., A. Klinke, G. Busch, F. Beese et G. Lammel (2001). *A new tool for characterizing and managing risks.* In: Global Biogeochemical Cycles in the Climate System. Sous la direction de E.D. Schulze, M. Heimann, S. Harrison, E. Holland, J. Lloyd, I. Prentice et D. Schimel, Academic Press, San Diego, CA, États-Unis d'Amérique, p. 303-316.

Roth, S., S. Hirschberg, C. Bauer, P. Burgherr, R. Dones, T. Heck et W. Schenler (2009). *Sustainability of electricity supply technology portfolio.* Annals of Nuclear Energy, 36, p. 409–416.

Rotty, R.M., A.M. Perry et D.B. Reister (1975). *Net Energy from Nuclear Power.* Rapport de l'AIE, Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities, Oak Ridge, TN, États-Unis d'Amérique.

Samson, S., J. Reneke et M.M. Wiecek (2009). *A review of different perspectives on uncertainty and risk and analternative modeling paradigm.* Reliability Engineering and System Safety, 94, p. 558-567.

Sovacool, B.K. (2008a). *The cost of failure: a preliminary assessment of major energy accidents, 1907–2007.* Energy Policy, 36, p. 1802-1820.

Sovacool, B.K. (2008b). *Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey.* Energy Policy, 36(8), p. 2950-2963.

Statistiques de l'ONU (2010). *Energy Balances and Electricity Profiles – Concepts and definitions.* Statistiques de l'ONU, New York, NY, États-Unis d'Amérique. Disponible à l'adresse unstats.un.org/unsd/energy/balance/concepts.htm.

Stirling, A. (1999). *Risk at a turning point?* Journal of Environmental Medicine, 1, p. 119-126.

Ungers, L.J., P.D. Moskowitz, T.W. Owens, A.D. Harmon et T.M. Briggs (1982). *Methodology for an occupational risk assessment: an evaluation of four processes for the fabrication of photovoltaic cells.* American Industrial Hygiene Association Journal, 43(2), p. 73-79.

Voorspools, K.R., E.A. Brouwers et W.D. D'haeseleer (2000). *Energy content and indirect greenhouse gas emissions embedded in 'emission-free' plants: results from the Low Countries.* Applied Energy, 67, p. 307-330.

WBGU (2000). *World in Transition: Strategies for Managing Global Environmental Risks.* Flagship Report 1998. Conseil consultatif allemand sur le changement à l'échelle du globe (WBGU). Springer, Berlin, Allemagne.

WRA (2008). *A Sustainable Path: Meeting Nevada's Water and Energy Demands.* Western Resource Advocates (WRA), Boulder, CO, États-Unis d'Amérique, 43 p. Disponible à l'adresse www.westernresourceadvocates.org/water/NVenergy-waterreport.pdf.

ANNEXE III

Coûts et performances actualisés de l'exploitation des énergies renouvelables

Auteurs principaux:
Thomas Bruckner (Allemagne), Helena Chum (États-Unis d'Amérique et Brésil), Arnulf Jäger-Waldau (Italie et Allemagne), Ånund Killingtveit (Norvège), Luis Gutiérrez-Negrín (Mexique), John Nyboer (Canada), Walter Musial (États-Unis d'Amérique), Aviel Verbruggen (Belgique), Ryan Wiser (États-Unis d'Amérique)

Auteurs collaborateurs:
Daniel Arvizu (États-Unis d'Amérique), Richard Bain (États-Unis d'Amérique), Jean-Michel Devernay (France), Don Gwinner (États-Unis d'Amérique), Gerardo Hiriart (Mexique), John Huckerby (Nouvelle-Zélande), Arun Kumar (Inde), José Moreira (Brésil), Steffen Schlömer (Allemagne)

Référence de la présente annexe:
Bruckner, T., H. Chum, A. Jäger-Waldau, Å. Killingtveit, L. Gutiérrez-Negrín, J. Nyboer, W. Musial, A. Verbruggen et R. Wiser, 2011. Annexe III: Tableau des coûts. In Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation des changements climatiques, établi par le GIEC [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (dir. publ.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, New York, États-Unis d'Amérique.

Annexe III Coûts et performances actualisés de l'exploitation des énergies renouvelables

Afin qu'elle puisse servir à établir le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, la présente annexe est conçue comme un document évolutif qu'il y aura lieu d'actualiser en fonction de la parution d'éléments d'information nouveaux. Les scientifiques qui souhaiteraient apporter leur soutien au processus sont invités à communiquer avec l'unité d'appui technique du Groupe de travail III du GIEC (srren_cost@ipcc-wg3.de), auprès duquel ils pourront recueillir davantage de renseignements sur les modalités fixées pour proposer des éléments d'information nouveaux[1]. La prise en compte des commentaires et de nouvelles données dans le volume 3 du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC sera soumise au processus d'examen adopté par le GIEC.

La présente annexe contient les informations les plus actuelles sur les coûts et performances des technologies déjà commercialisées de production d'électricité (tableau A.III.1), de chaleur (tableau A.III.2) et de biocarburants (tableau A.III.3) à partir de sources d'énergie renouvelable. Elle résume, sous forme de tableaux, les éléments d'information qui permettent d'établir le coût moyen actualisé de l'énergie ou des vecteurs énergétiques fournis par les différentes technologies employées. Les données de départ figurent dans la partie verte des tableaux, sous forme d'intervalles, tandis que les résultats figurent dans la partie violette des tableaux et indiquent le coût moyen actualisé.

Les données de départ sont obtenues à partir de l'évaluation de diverses études réalisée par les auteurs du chapitre correspondant (chapitres 2 à 7) dans le présent ouvrage. Sauf indication contraire, les intervalles de valeurs présentés ici correspondent à des données mondiales, en général pour 2008, mais parfois aussi pour 2009. Ils représentent environ la fourchette 10-90 % des valeurs recueillies dans la littérature, ce qui exclut donc les valeurs aberrantes. Pour diverses raisons, la disponibilité et la qualité des sources de données présentent de nettes variations suivant les différentes technologies étudiées[2]. Il est par conséquent nécessaire de disposer d'avis d'experts pour déterminer des intervalles de données représentatifs dans chaque catégorie de technologies, pour des périodes précises et à l'échelle mondiale.

Des renvois sont utilisés pour indiquer à quelle information il est fait précisément référence. Si l'ensemble d'un jeu de données est tiré d'une référence en particulier, alors celle-ci est indiquée dans la colonne intitulée «Références» de la partie verte du tableau. Les renvois fournissent aussi un supplément d'information sur les données figurant dans le tableau, à l'instar des chapitres 2 à 7 du rapport (cf. sections 2.7, 3.8, 4.7, 5.8, 6.7 et 7.8).

Les coûts moyens actualisés de l'électricité ($CMA_{él}$), de l'énergie thermique (ou de la chaleur) (CMA_{th}) et des carburants destinés aux transports (CMA_{ca})[3] sont calculés à partir des données rassemblées ici, suivant la méthode décrite dans l'annexe II et pour trois taux d'actualisation réels différents (3, 7 et 10 %). Les fourchettes fournies représentent l'ensemble des valeurs possibles des coûts moyens actualisés, compte tenu des limites inférieure et supérieure des intervalles de données de départ figurant dans le tableau. Plus précisément, le calcul de la limite basse des fourchettes de coûts moyens actualisés tient compte des valeurs basses du coût d'investissement, des coûts d'exploitation et de maintenance et (le cas échéant) du prix des matières premières, ainsi que des valeurs hautes du coefficient d'utilisation, de la durée de vie et (le cas échéant) du rendement de conversion et des recettes tirées des sous-produits, toutes indiquées dans le tableau. Inversement, le calcul de la limite haute des fourchettes de coûts moyens actualisés tient compte des valeurs hautes du coût d'investissement, des coûts d'exploitation et de maintenance et (le cas échéant) du prix des matières premières, ainsi que des valeurs basses du coefficient d'utilisation, de la durée de vie et (le cas échéant) du rendement de conversion et des recettes tirées des sous-produits[4].

Les chiffres fournis pour les coûts moyens actualisés (parties violettes des tableaux) sont examinés dans les sections 1.3.2 et 10.5.1 du rapport. La plupart des chapitres portant sur les diverses sources d'énergie renouvelable (chapitres 2 à 7) fournissent davantage de détails sur la sensibilité des coûts moyens actualisés aux différents paramètres pris en compte, autres que les taux d'actualisation (cf. sections 2.7, 3.8, 4.7, 5.8, 6.7 et 7.8). Ces analyses de sensibilité donnent des éléments d'information supplémentaires sur l'effet relatif du grand nombre de paramètres qui déterminent les coûts moyens actualisés dans des conditions spécifiques.

Outre les analyses de sensibilité propres à chaque technologie présentées dans les chapitres 2 à 7 et les exposés des sections 1.3.2 et 10.5.1, les figures A.III.2 à A.III.4 (a, b) proposent une illustration complémentaire de la sensibilité du coût moyen actualisé, à l'aide de diagrammes en tornade (figures A.III.2a à A.III.4a) et de leurs «négatifs» (figures A.III.2b à A.III.4b).

Les figures A.III.1a et A.III.1b fournissent l'exemple d'un diagramme en tornade et de son «négatif», en expliquant comment il convient de les lire.

1 Il ne peut être garanti que tous les courriels recevront une réponse, mais tous seront archivés avec leurs pièces jointes et, sous une forme appropriée, mis à la disposition des auteurs qui prendront part au processus de rédaction du cinquième Rapport d'évaluation.

2 Dans le présent rapport, aucune notation standard n'a été retenue pour décrire l'incertitude. Les auteurs de l'annexe ont cependant évalué avec soin les données disponibles et souligné les limites des données et les incertitudes à l'aide de renvois. La bibliographie de l'annexe permet de se faire une idée assez juste de l'ampleur de la base de référence.

3 Le coût moyen actualisé représente le coût d'un système de production d'énergie sur sa durée de vie. Il est calculé comme le prix unitaire auquel il faut produire l'énergie à partir de la source considérée sur sa durée de vie pour atteindre le seuil de rentabilité. Les coûts moyens actualisés englobent généralement tous les coûts privés imputés en amont de la chaîne de valeur, sans toutefois inclure, en aval de cette chaîne, le coût de la livraison au client, le coût de l'intégration ou les coûts externes pour l'environnement, voire d'autres coûts encore. Les subventions à la production en faveur des énergies renouvelables et les crédits d'impôt et de taxes ne sont pas pris en compte. Toutefois, il est impossible d'exclure entièrement les subventions et les taxes indirectes, qui sont associées aux moyens de production ou aux produits et qui influent sur les prix des moyens de production, et d'exclure par conséquent les coûts privés.

4 Cette méthode admet par hypothèse que les paramètres de départ qui entrent dans le calcul des $CMA_{él}$, CMA_{th} et CMA_{ca} ne présentent aucun lien entre eux. Il s'agit d'une hypothèse simplificatrice selon laquelle les valeurs basses des $CMA_{él}$, CMA_{th} et CMA_{ca} (en tant que combinaison de valeurs de départ les plus favorables) peuvent parfois être inférieures à ce qu'elles sont en général, tandis que les valeurs hautes des $CMA_{él}$, CMA_{th} et CMA_{ca} (en tant que combinaison de valeurs de départ les moins favorables) peuvent parfois être supérieures à ce que les investisseurs privés considèrent en général comme économiquement avantageux. La mesure dans laquelle cette méthode introduit une erreur systématique d'ordre structurel dans la détermination des fourchettes des $CMA_{él}$, CMA_{th} et CMA_{ca} est atténuée toutefois par une attitude relativement prudente adoptée dans le choix des intervalles de valeurs de départ (notamment la prise en compte d'avis d'experts), à savoir le fait de ne retenir à peu près que la fourchette 10-90 % des valeurs, lorsque cela est possible.

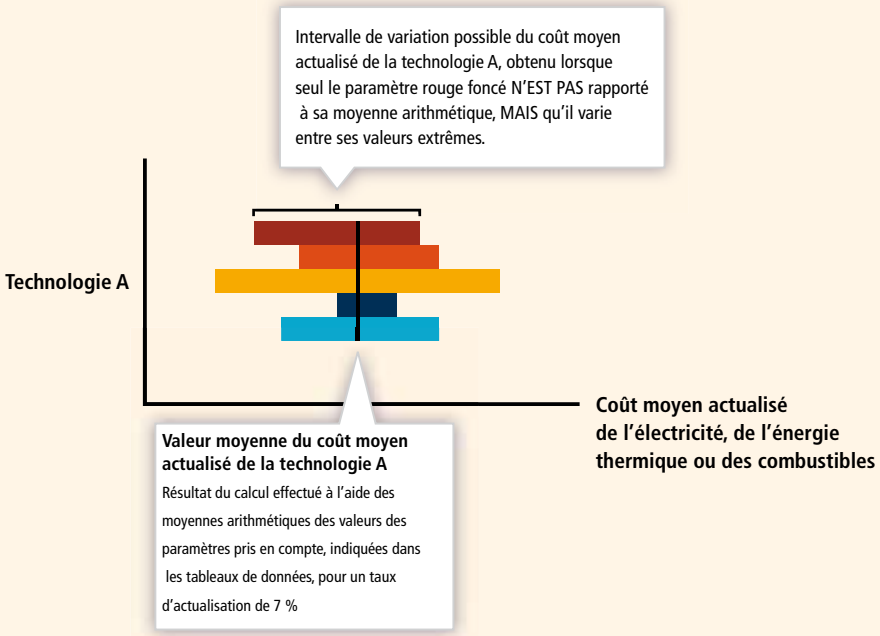


Figure A.III.1a | Diagramme en tornade. En partant de la valeur moyenne du coût moyen actualisé établie pour un taux d'actualisation de 7 %, il est possible d'obtenir un large éventail de valeurs quand on examine toute l'étendue de la variation, suivant les situations, des paramètres pris en compte. Quand le $CMA_{él}$, CMA_{th} ou CMA_{ca} d'une technologie donnée est très sensible à la variation d'un paramètre en particulier, la barre correspondante est relativement longue. En variant, ce paramètre peut ainsi conduire à des valeurs du $CMA_{él}$, CMA_{th} ou CMA_{ca} qui s'écartent fortement de la valeur moyenne. Quand le $CMA_{él}$, CMA_{th} ou CMA_{ca} d'une technologie donnée résiste bien aux variations des différents paramètres, les barres correspondantes sont relativement courtes et on ne note, quand un paramètre varie, que des écarts faibles des valeurs du $CMA_{él}$, CMA_{th} ou CMA_{ca} par rapport à la valeur moyenne. Il est bon de noter cependant qu'une barre courte ou inexistante peut aussi découler d'une variation faible ou nulle du paramètre correspondant.

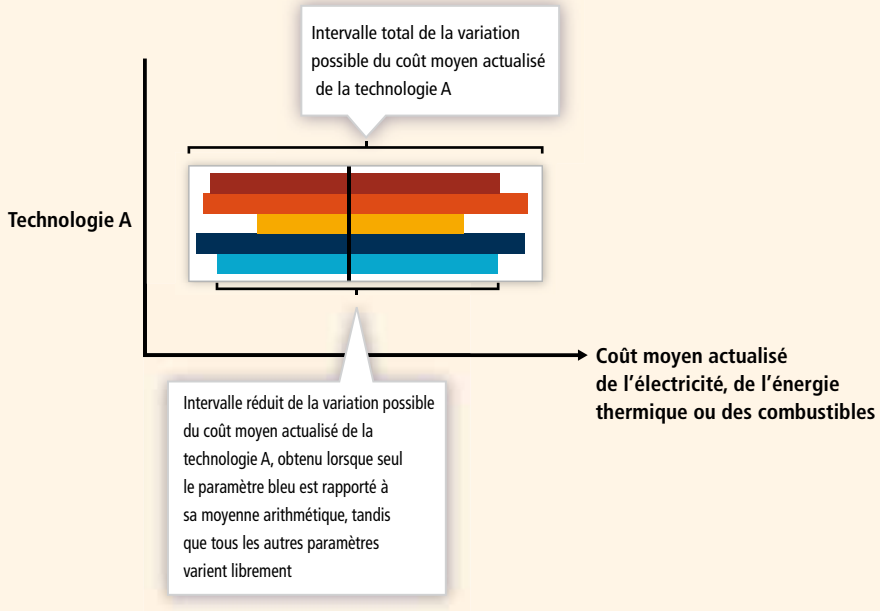


Figure A.III.1b | «Négatif» du diagramme en tornade. En partant des valeurs basse et haute de tout l'intervalle de variation du coût moyen actualisé, pour un taux d'actualisation respectif de 3 % et de 10 %, il est encore possible d'obtenir un intervalle de valeurs plus étroit si, pour chacun des paramètres, on ne prend qu'une seule valeur fixe moyenne. Quand le $CMA_{él}$, CMA_{th} ou CMA_{ca} d'une technologie donnée est très sensible à la variation d'un paramètre en particulier, la barre correspondante sera, dans ce cas, nettement raccourcie. Ce type de paramètre importe quand il s'agit de déterminer le $CMA_{él}$, CMA_{th} ou CMA_{ca} dans des conditions bien précises. Quand le $CMA_{él}$, CMA_{th} ou CMA_{ca} d'une technologie donnée résiste bien aux variations des différents paramètres, l'intervalle obtenu ainsi reste proche de l'intervalle total de la variation possible du $CMA_{él}$, CMA_{th} ou CMA_{ca}. De tels paramètres sont de moindre importance pour déterminer le $CMA_{él}$, CMA_{th} ou CMA_{ca} avec précision. Il est bon de noter cependant q300
u'un écart faible ou inexistant par rapport à l'intervalle total de la variation possible peut aussi découler d'une variation faible ou inexistante du paramètre pris en compte.

Tableau A.III.1 | Coûts et performances des technologies de production d'électricité à partir de sources renouvelables[i].

		Données de départ									Résultats		
Ressource	Technologie	Capacité de production type (MW)[ii]	Coût d'investissement (dollars É.-U./kW)	Exploitation et maintenance, coûts fixes annuels (dollars É.-U./kW) et/ou variables (hors matière première) (cents É.-U./kWh)	Recettes sous-produits (cents É.-U./kWh)[iii]	Prix matière première (dollars É.-U./$GJ_{mp, PCS}$[iv])	Rendement de conversion$_{él}$ (%)	Coefficient d'utilisation (%)	Durée de vie économique (années)	Références	$CMA_{él}$[v] (cents É.-U./kWh)		
											Taux d'actualisation		
											3 %	7 %	10 %
Bioénergie	Bioélectricité LFC[vi] spécifique	25–100	2 700–4 100[vii]	87 dollars É.-U./kW et 0,40 cent É.-U./kWh	s. o.[viii]	1,25–5,0[ix]	28	70–80	20	McGowin (2008)	6,1–13	6,9–15	7,9–16
	Bioélectricité Foyer mécanique[x] spécifique	voir ci-dessus	2 600–4 000[vii]	84 dollars É.-U./kW et 0,34 cent É.-U./kWh	s. o.[viii]	voir ci-dessus	27	voir ci-dessus	voir ci-dessus		5,6–13	6,7–15	7,7–16
	Bioélectricité Unité spécifique (Cogénération[xi] à foyer mécanique)	voir ci-dessus	2 800–4 200[vii]	86 dollars É.-U./kW et 0,35 cent É.-U./kWh	1,0[xii]	voir ci-dessus	24	voir ci-dessus	voir ci-dessus		5,1–13	6,3–15	7,3–17
	Cocombustion: Co-alimentation	20–100	430–500[xiii]	12 dollars É.-U./kW et 0,18 cent É.-U./kWh	s. o.[viii]	voir ci-dessus	36	voir ci-dessus	voir ci-dessus	McGowin (2008)	2,0–5,9	2,2–6.2	2,3–6,4
	Cocombustion: Alimentations séparées	voir ci-dessus	760–900[xiii]	18 dollars É.-U./kW	s. o.[viii]	voir ci-dessus	36	voir ci-dessus	voir ci-dessus	Bain (2011)	2,3–6,3	2,6–6,7	2,9–7,1
	Cogénération (CRO[xiv])	0,65–1,6	6 500–9 800	59–80 dollars É.-U./kW et 4,3–5,1 cent É.-U./kWh	7,7[xv, xvi]	voir ci-dessus	14	55–68	voir ci-dessus	Obernberger *et al.* (2008)	8,6–26	12–32	15–37
	Cogénération (Turbine à vapeur)	2,5–10	4 100–6 200[xvii]	54 dollars É.-U./kW et 3,5 cent É.-U./kWh	5,4[xv, xviii]	voir ci-dessus	18	voir ci-dessus	voir ci-dessus		6,2–18	8,3–22	10–26
	Cogénération (Gazéification + MCI)[xix]	2,2–13	1 800–2 100	65–71 dollars É.-U./kW et 1,1-1,9 cent É.-U./kWh	1,0–4,5[xv, xx]	voir ci-dessus	28–30	voir ci-dessus	voir ci-dessus		2,1–11	3,0–13	3,8–14
Énergie solaire directe	PV (toiture d'habitation)	0,004–0,01	3 700–6 800[xxi]	19–110 dollars É.-U./kW[xxii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	12–20[xxiii]	20–30	cf. section 3,8 et renvois	12–53	18–71	23–86
	PV (toiture de structure commerciale)	0,02–0,5	3 500–6 600[xxi]	18–100 dollars É.-U./kW[xxii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	voir ci-dessus	voir ci-dessus		11–52	17–69	22–83
	PV (production industrielle, système fixe)	0,5–100[xxiv]	2 700–5 200[xxi]	14–69 dollars É.-U./kW[xxii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	15–21[xxiii]	voir ci-dessus		8,4–33	13–43	16–52
	PV (production industrielle, système mobile sur un axe)	0,5–100[xxiv]	3 100–6 200[xxi]	16–75 dollars É.-U./kW[xxii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	15–27[xxiii]	voir ci-dessus		7,4–39	11–52	15–62
	Concentrateurs	50–250[xxv]	6 000–7 300[xxvi]	60–82 dollars É.-U./kW[xxvii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	35–42[xxviii]	voir ci-dessus		11–19	16–25	20–31
Géothermie	Géothermie (centrales de type flash)	10–100	1 800–3 600[xxix]	150–190 dollars É.-U./kW[xxx]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	60–90[xxxi]	25–30[xxxii]	cf. section 4,7 et renvois	3,1–8,4	3,8–11	4,5–13
	Géothermie (centrales à cycle binaire)	2–20	2 100–5 200[xxix]	voir ci-dessus	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	voir ci-dessus	voir ci-dessus		3,3–11	4,1–14	4,9–17
Énergie hydraulique	Toutes	<0,1 – >20,000[xxxiii]	1 000–3 000[xxx-iv]	25–75 dollars É.-U./kW[xxxv]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	30–60[xxxvi]	40–80[xxxvii]	cf. chapitre 5 et renvois	1,1–7,8	1,8–11	2,4–15
Énergie marine	Usines marémotrices[xxxviii]	<1 – >250[xxxix]	4 500–5 000[xxx-viii]	100 dollars É.-U./kW[xxxviii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	22,5–28,5[xl]	40[xli, xxxviii]	cf. section 6,7 et renvois	12–16	18–24	23–32

Suite à la page suivante →

		Données de départ									Résultats		
Ressource	Technologie	Capacité de production type (MW)[ii]	Coût d'investissement (dollars É.-U./kW)	Exploitation et maintenance, coûts fixes annuels (dollars É.-U./kW) et/ou variables (hors matière première) (cents É.-U./kWh)	Recettes sous-produits (cents É.-U./kWh)[iii]	Prix matière première (dollars É.-U./$GJ_{mp, PCS}$[iv])	Rendement de conversion$_{él}$ (%)	Coefficient d'utilisation (%)	Durée de vie économique (années)	Références	$CMA_{él}$[v] (cents É.-U./kWh)		
											Taux d'actualisation		
											3 %	7 %	10 %
Énergie éolienne	Énergie éolienne (grandes turbines terrestres)	5–300[xlii]	1 200–2 100[xliii]	1,2–2,3 cents É.-U./kWh	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	20–40[xliv]	20[xlv]	cf. chapitre 7	3,5–10	4,4–14	5,2–17
	Énergie éolienne (grandes turbines au large des côtes)	20–120[xlii]	3 200–5 000[xlvi]	2,0–4,0 cents É.-U./kWh	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	35–45[xlii]	voir ci-dessus		7,5–15	9,7–19	12–23

Remarques et notes générales:

i Toutes les valeurs sont arrondies à deux chiffres significatifs. La plupart des chapitres portant sur les diverses sources d'énergie renouvelable (chapitres 2 à 7) fournissent davantage de détails sur les coûts et les performances, notamment dans leur partie consacrée à l'évolution des coûts. Pour comparer des estimations de coûts moyens actualisés extraites directement de la littérature, il convient de bien prendre en compte les hypothèses sous-jacentes.

ii Les capacités de production indiquées correspondent à des données actuelles ou récentes. Quand il est prévu que cette capacité évoluera à l'avenir, cela est indiqué dans les renvois correspondant à la technologie en question.

iii Pour les unités de cogénération, la production de chaleur est considérée comme un sous-produit dans le calcul du coût moyen actualisé de l'électricité, les dépenses totales d'équipement étant prises en compte comme s'il s'agissait d'une centrale électrique uniquement.

iv PCS: pouvoir calorifique supérieur. PCI: pouvoir calorifique inférieur. (*NDT* – Le terme *matière première* est pris au sens large incluant *énergie primaire* et *combustible* (indice *mp*)).

v $CMA_{él}$: coût moyen actualisé de l'électricité. Le coût moyen actualisé englobe généralement tous les coûts privés imputés en amont de la chaîne de valeur, sans toutefois inclure, en aval de cette chaîne, le coût du transport et de la distribution aux clients. Les subventions et les crédits d'impôt et de taxes en faveur de la production à partir de sources renouvelables ne sont pas pris en compte. Toutefois, il est impossible d'exclure entièrement les subventions et les taxes indirectes, qui sont associées aux moyens de production ou aux produits et qui influent sur les prix des moyens de production, et d'exclure par conséquent les coûts privés.

Bioénergie:

vi Un lit fluidisé circulant (LFC) est un lit fluidisé turbulent (flux élevé de gaz) comprenant la recirculation des particules solides, un lit fluidisé étant une couche de petites particules solides mises en suspension dans un écoulement fluide ascendant (généralement un gaz).

vii Étant donné que les données de référence correspondent à une unité d'une capacité de production de 50 MW, le montant pour des centrales de puissance supérieure ou inférieure est ajusté comme suit: coût d'investissement$_{capacité\ 2}$ = coût d'investissement$_{capacité\ 1}$ x (capacité 2/capacité 1)$^{n-1}$, où le facteur d'échelle n = 0,7. Les estimations des dépenses d'équipement englobent les éléments suivants: installations de conditionnement du combustible, brûleur, contrôle de qualité de l'air, turbine à vapeur et systèmes auxiliaires, partie classique de la centrale, installations générales et ingénierie, solutions de secours applicables aux projets et aux processus, provisions pour les fonds utilisés durant la construction, coûts incombant à l'exploitant et taxes et redevances.

viii L'abréviation «s.o.» signifie «sans objet».

ix La matière première est le bois avec un PCS de 20,0 GJ/t et un PCI de 18,6 GJ/t.

x Un foyer mécanique est un dispositif qui alimente le brûleur en combustible.

xi Cogénération ou production combinée de chaleur et d'électricité.

xii Pour le calcul des recettes tirées de sous-produits par des centrales électrocalogènes, on admet que la production de chaleur servant à des applications industrielles est de 5,38 GJ de quantité de chaleur par MWh d'électricité, que le prix de la vapeur est de 4,85 dollars E.-U.$_{2005}$/GJ (soit 75 % du prix d'achat de la vapeur destinée à l'industrie des pâtes et papiers aux États-Unis d'Amérique) (EIA, 2009, tableau 7.2) et que 75 % de la quantité de chaleur produite est vendue.

xiii Étant donné que les données de référence correspondent à une unité d'une capacité de production de 50 MW, le montant pour des centrales de puissance supérieure ou inférieure est ajusté comme suit: coût d'investissement$_{capacité\ 2}$ = coût d'investissement$_{capacité\ 1}$ x (capacité 2/capacité 1)$^{n-1}$, où le facteur d'échelle n = 0,9 (Peters *et al.*, 2003). Les estimations des coûts d'investissement pour la cocombustion, qui ont été établies dans le cadre d'un plan de modernisation des centrales au charbon aux États-Unis d'Amérique, englobent les éléments suivants: installations de conditionnement du combustible, dépenses supplémentaires découlant des modifications à apporter au brûleur, partie classique de la centrale, installations générales et ingénierie, solutions de secours applicables aux projets et aux processus, provisions pour les fonds utilisés durant la construction, coûts incombant à l'exploitant et taxes et redevances. Aux États-Unis d'Amérique, les estimations des coûts de la cocombustion ne prennent pas en compte l'amortissement du brûleur.

xiv CRO: Cycle de Rankine à caloporteur organique.

Suite à la page suivante →

xv Pour le calcul des recettes tirées de sous-produits pour des centrales électrocalogènes de petite capacité, on admet que le prix de l'eau chaude est de 12,51 dollars É.-U.$_{2005}$/GJ (prix moyen entre Rauch (2010) et Skjoldborg (2010)) et on ne retient que 33 % de cette valeur brute, car l'exploitant ne peut récupérer qu'une partie de ce prix et que l'utilisation de l'eau chaude est de nature saisonnière.

xvi La production de chaleur servant à la production d'eau chaude est de 18,51 GJ de quantité de chaleur par MWh d'électricité.

xvii Étant donné que les données de référence correspondent à une unité de cogénération d'une capacité de production de 5 MW, le montant pour des centrales de capacité supérieure ou inférieure est ajusté comme suit: coût d'investissement$_{\text{capacité 2}}$ = coût d'investissement$_{\text{capacité 1}}$ x (capacité 2/capacité 1)$^{n-1}$, où le facteur d'échelle n = 0,7 (Peters *et al.*, 2003).

xviii La production de chaleur servant à la production d'eau chaude est de 12,95 GJ de quantité de chaleur par MWh d'électricité.

xix MCI: Moteur à combustion interne.

xx La production de chaleur servant à la production d'eau chaude se situe entre 2,373 et 10,86 GJ/MWh.

Énergie solaire directe – systèmes photovoltaïques (PV):

xxi En 2009, les prix de vente en gros des systèmes photovoltaïques indiqués par les fabricants ont baissé de plus de 50 %. Ainsi, les prix des systèmes photovoltaïques installés vendus sur le marché allemand, qui est le plus compétitif, ont baissé de plus de 30 % en 2009, alors qu'ils n'avaient baissé que de 10 % environ en 2008 (cf. section 3.8.3). Ce sont donc les données sur la valeur marchande relevées en Allemagne en 2009 qui servent de valeur basse correspondant aux systèmes destinés aux toitures d'habitations (Bundesverband Solarwirtschaft e.V., 2010) et aux panneaux fixes destinés à la production commerciale (Bloomberg, 2010). Selon les données recueillies sur le marché américain pour 2008 et 2009, on admet que, par rapport aux systèmes destinés aux toitures d'habitations, le coût d'investissement correspondant aux systèmes plus grands destinés aux toitures de structures commerciales est inférieur de 5 % (NREL, 2011b; cf. section 3.8.3). On prend également pour hypothèse que les systèmes pivotants qui suivent la trajectoire du soleil nécessitent un coût d'investissement supérieur de 15 à 20 % à celui des systèmes pivotant uniquement sur un axe dont il est tenu compte ici (NREL, 2011a; cf. section 3.8.3). Les moyennes pondérées des coûts d'investissement en fonction de la capacité, relevées aux États-Unis d'Amérique en 2009 (NREL, 2011b), servent de valeur haute, ce qui correspond à peu près à 80 % des installations réalisées dans le monde en 2009 (cf. sections 3.4.1 et 3.8.3).

xxii Les coûts annuels d'exploitation et de maintenance des systèmes photovoltaïques étant faibles, l'intervalle donné se situe entre 0,5 et 1,5 % du coût d'investissement initial (Breyer *et al.*, 2009; IEA, 2010c).

xxiii Le coefficient d'utilisation d'un système photovoltaïque est principalement fonction de l'ensoleillement du lieu considéré (éclairement énergétique solaire annuel en kWh/m²/an) et du type de système installé. On trouvera dans Sharma (2011) des données sur les coefficients d'utilisation d'installations récentes.

xxiv La limite supérieure de l'intervalle de valeurs pour des systèmes photovoltaïques destinés à la production commerciale est représentative de la situation actuelle. Des projets de mise au point de systèmes d'une capacité bien plus élevée (jusqu'à 1 GW) sont en cours et pourraient voir le jour au cours de la prochaine décennie.

Énergie solaire directe – Concentrateurs:

xxv La capacité de production des centrales solaires à concentration pourrait se réduire à celle d'un seul concentrateur hélioélectrique (soit par exemple 25 kW pour une parabole de type Stirling). L'intervalle de valeurs indiqué est cependant représentatif de projets proposés ou en construction de nos jours. Des installations de type industriel (champs de concentrateurs) regroupant une multitude de concentrateurs en un même lieu sont en projet, pour des capacités de production égales voire supérieures à 1 GW (4 x 250 MW).

xxvi Valeurs correspondant à des centrales à collecteurs cylindro-paraboliques de 2009 dotées de six heures de stockage d'énergie thermique. Le coût d'investissement comprend les coûts directs et indirects, ces derniers englobant les majorations de coûts concernant l'ingénierie, les achats et la construction, les coûts incombant à l'exploitant, le foncier et les taxes. Ce coût d'investissement est moindre pour les centrales sans stockage et augmente en fonction de la capacité de stockage. Selon les estimations de l'AIE (IEA, 2010a), les coûts d'investissement se situent entre 3 800 dollars É.-U.$_{2005}$/kW pour les centrales sans stockage et 7 600 dollars É.-U.$_{2005}$/kW pour les centrales disposant d'une forte capacité de stockage (2009 étant prise comme année de base pour ces valeurs). Les coefficients d'utilisation varient aussi en fonction de l'existence d'un stockage thermique (cf. renvoi xxviii).

xxvii Selon l'AIE (IEA, 2010a), les coûts d'exploitation et de maintenance par rapport à la production d'énergie varient de 1,2 à 2,7 cents É.-U./kWh (2009 étant prise comme année de base pour ces valeurs). En fonction de la production réelle, les coûts annuels d'exploitation et de maintenance peuvent donc varier dans un sens ou dans l'autre au-delà de l'intervalle de valeurs indiqué.

xxviii Valeurs correspondant à des centrales à collecteurs cylindro-paraboliques dotées de six heures de stockage d'énergie thermique, situées dans une zone comparable, pour l'ensoleillement, au sud-ouest des États-Unis d'Amérique. Tout comme les coûts d'investissement, le coefficient d'utilisation varie sensiblement en fonction de la capacité de stockage thermique. Si ce n'est pour les centrales hélioélectriques (SEGS) installées en Californie, la mise en service de centrales à concentration ne remonte qu'à 2007, si bien qu'on ne dispose que de peu de données sur leurs performances et que la plupart des ouvrages ne présentent que des estimations ou des prévisions s'agissant des coefficients d'utilisation. Sharma (2011) indique une moyenne sur plusieurs années (1998-2002) de 12,4 à 27,7 % pour des centrales sans stockage thermique, mais disposant d'un système d'appoint au gaz naturel. L'AIE (IEA, 2010a) signale une production pouvant atteindre 6 600 heures par an dans les centrales en service en Espagne disposant de 15 heures de stockage. Cela équivaut à un coefficient d'utilisation de 75 % si le plein rendement est atteint durant les 6 600 heures. Les systèmes de stockage de grande capacité nécessitent un investissement relativement important (cf. renvoi xxvi).

Géothermie:

xxix Le coût d'investissement englobe les éléments suivants: exploration et confirmation; forage des puits d'extraction et d'injection; installations de surface et infrastructure; centrale électrique. Pour des projets d'extension (nouvelles centrales sur un même gisement géothermique), le coût d'investissement peut être relativement moins élevé, de 10 à 15 % (cf. section 4.7.1). Les intervalles de valeurs sont tirés de Bromley *et al.* (2010) (figure 4.7).

xxx Les coûts d'exploitation et de maintenance sont tirés de Hance (2005). En Nouvelle-Zélande, ils varient entre 1 et 1,4 cent É.-U./kWh pour des capacités de production de 20 à 50 MW$_{\text{él}}$ (Barnett et Quinlivan, 2009), ce qui équivaut à 83 à 117 dollars É.-U./kW/an, c'est-à-dire des valeurs bien inférieures à celles proposées par Hance (2005). Pour obtenir davantage de détails, cf. section 4.7.2.

xxxi À l'échelle mondiale, le coefficient d'utilisation actuel (données de 2008-2009) pour les centrales de type flash et les centrales à cycle binaire en service s'élève à 74,5 %. En excluant quelques valeurs aberrantes, on obtient un intervalle estimé de 60 à 90 %. Les nouvelles centrales électriques géothermiques se caractérisent par un coefficient d'utilisation supérieur à 90 % (Hance, 2005; DiPippo, 2008; Bertani, 2010). On prévoit que la moyenne mondiale pour 2020 sera de 80 % et qu'elle pourrait passer à 85 % en 2030 et atteindre 90 % en 2050 (cf. sections 4.7.3 et 4.7.5).

xxxii À l'échelle mondiale, les centrales électriques géothermiques ont le plus souvent une durée de vie de 25 à 30 ans. Cette période d'amortissement, bien que d'une durée inférieure à la durée d'exploitation économique du gisement géothermique, habituellement bien plus longue, rend possible la réhabilitation ou le remplacement d'une centrale vieillissante en surface (exemples de Larderello, Wairakei ou The Geysers – cf. sections 4.7.3). Pour certains gisements, la dégradation possible de la ressource au fil du temps fait partie des facteurs économiques entrant en ligne de compte dans la décision de poursuivre l'exploitation de la centrale.

Suite à la page suivante →

Énergie hydraulique:

xxxiii La documentation est peu abondante pour établir la fourchette 10-90 % des valeurs de la capacité de production des centrales hydroélectriques. L'intervalle fourni ici représente toute l'étendue des capacités de production. Les projets hydroélectriques sont conçus en fonction du débit et de la charge, et leur capacité de production est donc propre au site. Certaines centrales peuvent être relativement peu puissantes et ne produire que quelques kilowatts dans le cas d'un petit cours d'eau ou alors atteindre plusieurs milliers de mégawatts, tel le barrage des Trois-Gorges en Chine avec ses 18 000 MW (qui seront portés à 22 400 MW une fois le projet achevé) (cf. section 5.1.2). Les centrales hydroélectriques d'une puissance supérieure à 10 MW représentent aujourd'hui 90 % de la capacité hydroélectrique installée et 94 % de la production d'énergie hydroélectrique (IJHD, 2010).

xxxiv La valeur basse du coût d'investissement pour les centrales hydroélectriques peut descendre jusqu'à 400 ou 500 dollars É.-U./kW, mais l'intervalle donné est représentatif de la réalité actuelle (cf. section 5.8.1).

xxxv Pour les centrales hydroélectriques, les coûts d'exploitation et de maintenance sont généralement indiqués en pourcentage relativement au coût d'investissement. L'intervalle représentatif s'établit entre 1 et 4 %, et l'intervalle indiqué dans le tableau correspond à la valeur moyenne de 2,5 % appliquée à l'intervalle donné pour les coûts d'investissement. D'une manière générale, de telles sommes suffiront à couvrir la rénovation du matériel mécanique et électrique, notamment la remise en état des turbines, le remplacement du bobinage des génératrices et les réinvestissements dans les systèmes de communication et de commande (cf. section 5.8.1).

xxxvi Le coefficient d'utilisation est déterminé par les conditions hydrologiques, la puissance installée et la conception de la centrale ainsi que par la façon dont fonctionne la centrale (à savoir le degré de régulation de la production). En ce qui concerne les centrales conçues pour une production maximale (répondant aux besoins de base) soumises à une régulation relativement faible, le coefficient d'utilisation se situe souvent entre 30 et 60 %. La figure 5.20 présente les coefficients d'utilisation moyens pour différentes régions du monde. En ce qui concerne les centrales conçues pour répondre aux pics de consommation, le coefficient d'utilisation est beaucoup plus bas, puisqu'il peut descendre jusqu'à 20 %. De telles installations sont dotées en effet d'une puissance bien plus grande afin de répondre à la demande en cas de pics. Le coefficient d'utilisation des centrales au fil de l'eau présente un grand intervalle de variation (entre 20 et 95 %), en fonction des caractéristiques géographiques et climatiques du site et des caractéristiques techniques et opérationnelles de la centrale (cf. section 5.8.3).

xxxvii En général, les centrales hydroélectriques ont une durée de vie très longue. Il existe de nombreux exemples de centrales en service depuis plus de 100 ans, dont les installations électriques et mécaniques ont certes été modernisées, mais dont l'ouvrage d'art (barrages, tunnels, etc.), à savoir la partie la plus onéreuse, n'a pas subi de grands travaux de rénovation. Selon l'AIE (IEA, 2010d), de nombreuses centrales construites il y a 50 à 100 ans sont encore en service de nos jours. Pour les grandes centrales, on ne prend donc pas de risque en indiquant une durée de vie minimale de 40 ans et maximale de 80 ans. Pour les centrales de moindre puissance, la durée de vie caractéristique est de 40 ans, parfois moins. La durée de vie économique peut varier par rapport à la durée de vie physique réelle et dépend grandement de la façon dont les centrales sont exploitées et financées (cf. section 5.8.1).

Énergie marine:

xxxviii Les données recueillies au sujet des usines marémotrices représentent un très petit nombre d'installations (cf. renvois qui suivent). Il convient donc de les examiner avec prudence.

xxxix La seule installation destinée à la production industrielle dans le monde est l'usine marémotrice de la Rance, d'une puissance de 240 MW, en service depuis 1966. D'autres installations plus petites ont été mises en service depuis lors en Chine, au Canada et en Fédération de Russie, avec des puissances respectives de 3,9, 20 et 0,4 MW. Le barrage de Sihwa en Corée du Sud doit entrer en service en 2011; avec une capacité de production de 254 MW, ce qui en fera l'usine marémotrice la plus puissante du monde. Beaucoup d'autres projets sont à l'étude, avec pour certains de très grandes capacités de production, notamment au Royaume-Uni (dans l'estuaire de la Severn, 9,3 GW), en Inde (1,8 GW), en Corée du Sud (740 MW) et en Fédération de Russie (mer Blanche et mer d'Okhotsk, 28 GW). Aucun pour le moment n'a été considéré comme rentable, et nombre d'entre eux soulèvent des objections écologistes (Kerr, 2007). À la suite d'une étude d'évaluation conduite par les pouvoirs publics, le projet de la Severn au Royaume-Uni a été reporté.

xl Une étude antérieure propose des coefficients d'utilisation de l'ordre de 25 à 35 % (Charlier, 2003).

xli Les usines marémotrices fonctionnent sur le même principe que les centrales hydrauliques, qui possèdent en général une durée de vie très longue. Il existe de nombreux exemples de centrales en service depuis plus de cent ans, dont les installations électriques et mécaniques ont certes été modernisées, mais dont l'ouvrage d'art (barrages, tunnels, etc.), à savoir la partie la plus onéreuse, n'a pas subi de grands travaux de rénovation. On prend donc pour hypothèse que les usines marémotrices ont une durée de vie économique comparable à celle des grandes centrales hydroélectriques, que l'on peut sans risque d'erreur établir à au moins 40 ans (cf. chapitre 5).

Énergie éolienne:

xlii La capacité de production indiquée est celle d'une centrale éolienne, et non pas celle d'une turbine. Dans l'éolien terrestre, les centrales installées entre 2007 et 2009 ont le plus souvent une capacité de production se situant entre 5 et 300 MW, bien que des centrales de moindre puissance ou de puissance supérieure soient également relativement répandues. S'agissant de l'éolien au large des côtes, les parcs installés entre 2007 et 2009 peuvent produire en général entre 20 et 120 MW, mais des centrales de plus grande puissance sont prévues pour l'avenir. Compte tenu du caractère modulaire de cette technologie, les centrales présentent de grandes variations de capacité de production suivant les conditions du marché et les conditions géographiques.

xliii Les installations les moins onéreuses se situent en Chine, les coûts d'investissement étant bien supérieurs aux États-Unis d'Amérique et en Europe. L'intervalle de valeurs est représentatif de la majorité des centrales éoliennes au large des côtes installées dans le monde en 2009 (soit l'année la plus récente pour laquelle on disposait de données fiables au moment de la rédaction du rapport), mais des centrales installées en Chine ont un coût moyen pouvant être inférieur à la valeur basse de cet intervalle (il est fréquent que les coûts varient de 1 000 à 1 350 dollars É.-U./kW en Chine). Dans la plupart des cas, le coût d'investissement englobe les éléments suivants: turbines (y compris le transport jusqu'au site et l'installation), raccordement au réseau (câblage, poste de livraison, interconnexion, sans inclure des coûts plus généraux d'extension du réseau électrique), travaux de génie civil (fondations, routes, bâtiments) et coûts divers (études techniques, permis, autorisations, évaluations environnementales et équipement de contrôle).

xliv Le coefficient d'utilisation varie en partie en fonction de la force du vent (caractéristiques propres au site et à la région), mais aussi en fonction du type de turbine.

xlv Les turbines éoliennes modernes qui se conforment aux normes de la Commission électrotechnique internationale sont conçues pour durer 20 ans, une durée de vie pouvant s'allonger si les coûts d'exploitation et de maintenance demeurent acceptables. Le financement des centrales éoliennes porte en général sur 20 ans.

xlvi En ce qui concerne l'éolien au large des côtes, le coût d'investissement indiqué englobe la majorité des centrales éoliennes installées au large des côtes au cours de ces dernières années (y compris en 2009) ainsi que les centrales dont la mise en service était prévue pour le début des années 2010. Compte tenu de la hausse récente des coûts, le fait de prendre en compte les coûts de projets récents et prévus permet de fournir un intervalle de valeurs raisonnablement représentatif de l'investissement correspondant aux centrales éoliennes au large des côtes actuelles. Dans la plupart des cas, le coût d'investissement englobe les éléments suivants: turbines (y compris le transport jusqu'au site et l'installation), raccordement au réseau (câblage, poste de livraison, interconnexion, sans inclure des coûts plus généraux d'extension du réseau électrique), travaux de génie civil (fondations, routes, bâtiments) et coûts divers (études techniques, permis, autorisations, évaluations environnementales et équipement de contrôle).

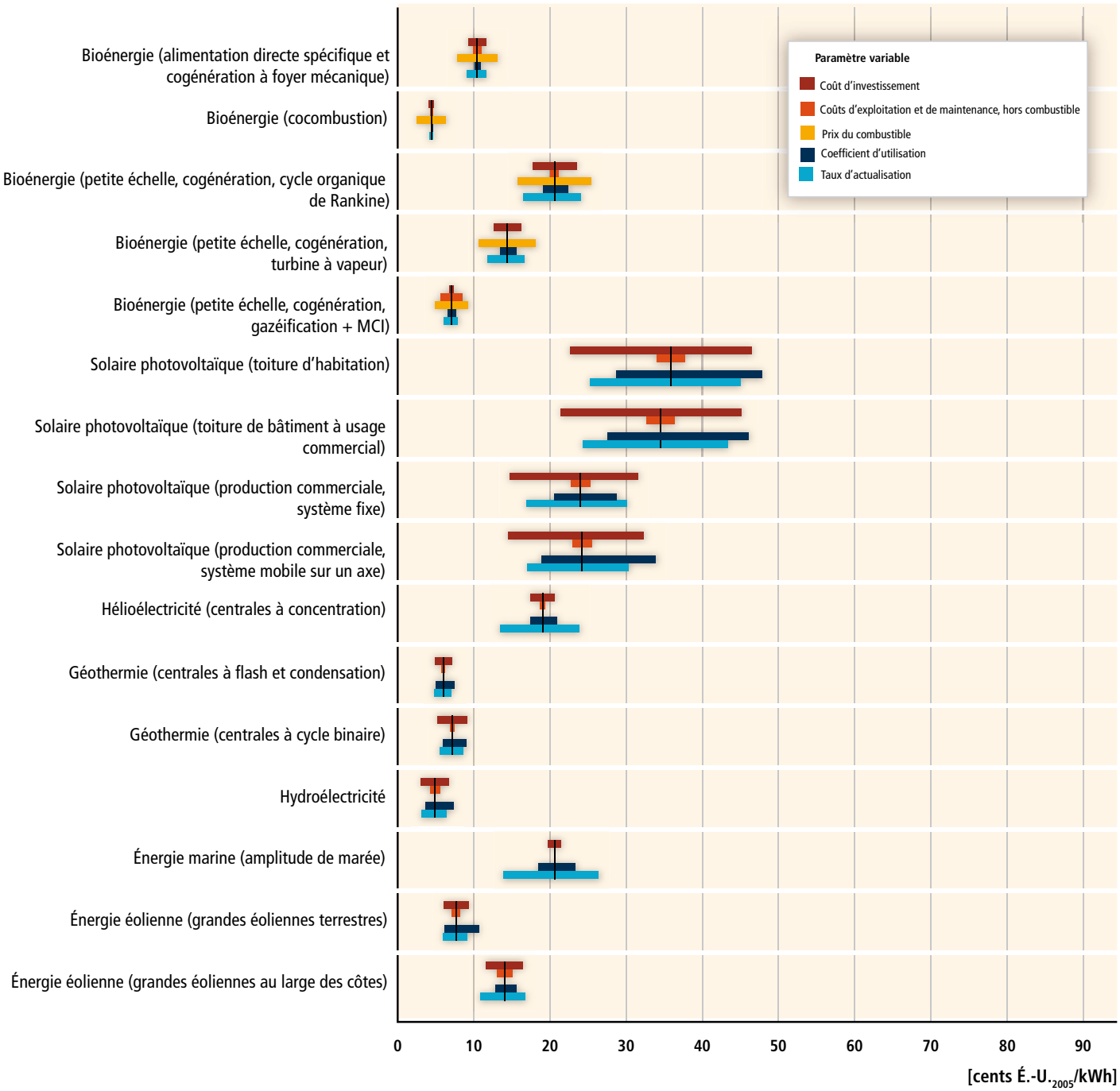


Figure A.III.2a | Diagramme en tornade des technologies de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable. Voir la figure A.III.1a pour plus d'explications.

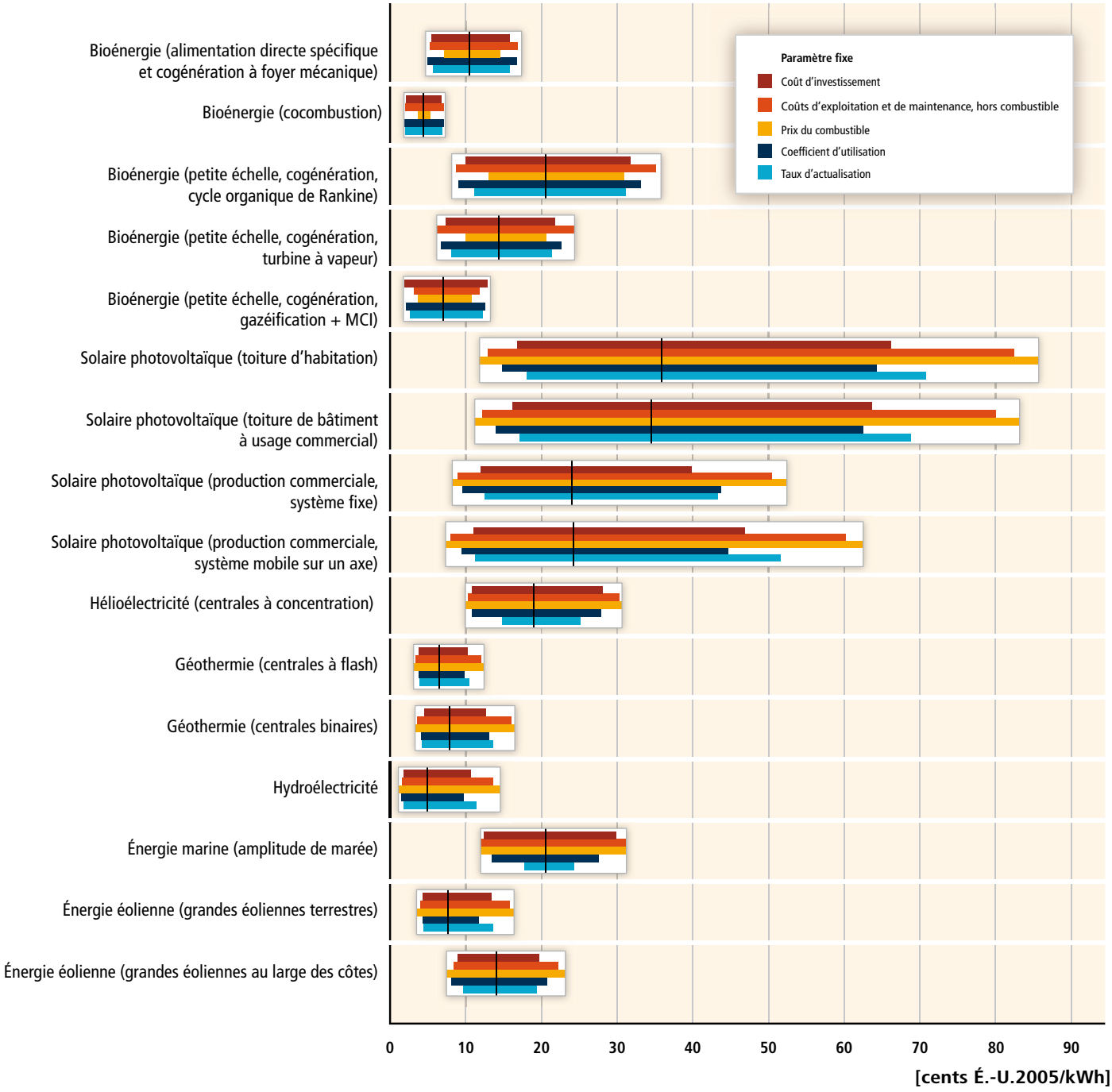


Figure A.III.2b | «Négatif» du diagramme en tornade des technologies de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable. Voir la figure A.III.1b pour plus d'explications.

Remarque: Les limites supérieures des deux technologies géothermiques sont calculées en se fondant sur l'hypothèse que la construction d'une centrale nécessite quatre ans. Dans l'analyse de sensibilité simplifiée appliquée ici, cette hypothèse n'est pas prise en compte, si bien que les limites supérieures ont une valeur inférieure à celle obtenue en application d'une méthode plus précise. L'échelle des intervalles de valeurs a été cependant ajustée pour retrouver les mêmes résultats que ceux obtenus grâce à cette méthode.

Tableau A.III.2 | Coûts et performances des technologies de production de chaleur à partir de sources renouvelables.[i]

		Données de départ									Résultats		
Ressource	Technologie	Capacité de production type (MW_{th})	Coût d'investissement (dollars É.-U./kW_{th})	Exploitation et maintenance coûts fixes annuels (dollars É.-U./kW) et/ou variables (dollars É.-U./GJ)	Recettes sous-produits (dollars É.-U./GJ_{mp})	Prix matière première (dollars É.-U./GJ_{mp})	Rendement de conversion (%)	Coefficient d'utilisation (%)	Durée de vie économique (années)	Références	CMA_{th}[iii] (dollars É.-U./GJ)		
											Taux d'actualisation		
											3 %	7 %	10 %
Bioénergie	Biomasse (CHG[iv])	0,005–0,1[v]	310–1 200[vi]	13–43 dollars É.-U./kW[vii]	s. o.[viii]	10–20	86–95	13–29	10–20	IEA (2007b)	14–70	15–77	16–84
	Biomasse (DUS[ix], cogénération[x])	1–10[xi]	370–3 000[xii, xiii]	15–130 dollars É.-U./kW[vii]	s. o.[viii]	0–3	20–40[xiv]	80–91	10–20		1,4–34	1,8–38	2,1–41
	Biomasse (turbine à vapeur, cogénération)[xv]	12–14	370–1 000[xii]	1,2–2,5 dollars É.-U./kW[vii]	s. o.[viii]	3,7–6,2	10–40	63–74	10–20		10–69	11–70	11–72
	Biomasse (digestion anaérobie, cogénération)	0,5–5[xi]	170–1 000[xii,xvi]	37–140 dollars É.-U./kW[vii]	s. o.[viii]	2,5–3,7[xvii]	20–30[xviii]	68–91	15–25		10–29	10–30	10–32
Énergie solaire	Héliothermie (ECS[xix], Chine)	0,0017–0,01[xx]	120–540[xxi]	1,5–10 dollars É.-U./kW[xxii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	20–80[xxiii]	4,1–13[xxiv]	10–15[xxv]	cf. section 3.8.2 et renvois	2,8–56	3,6–67	4,2–75
	Héliothermie (ECS, thermosiphon, systèmes mixtes)	0,0017–0,07[xx]	530–1 800	5,6–22 dollars É.-U./kW[xxii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	20–80[xxiii]	4,1–13[xxiv]	15–25	IEA (2007b)	8,8–134	12–170	16–200
Géothermie	Géothermie (chauffage d'immeuble)	0,1–1	1 600–3 900[xxvi]	8,3–11 dollars É.-U./GJ[xxvii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	25–30	20	cf. section 4.7.6	20–50	24–65	28–77
	Géothermie (chauffage urbain)	3,8–35	600–1 600[xxvi]	8,3–11 dollars É.-U./GJ[xxvii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	25–30	25		12–24	14–31	15–38
	Géothermie (serres)	2–5,5	500–1 000[xxvi]	5,6–8,3 dollars É.-U./GJ[xxvii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	50	20		7,7–13	8,6–14	9,3–16
	Géothermie (bassins d'aquaculture non couverts)	5–14	50–100[xxvi]	8,3–11 dollars É.-U./GJ[xxvii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	60	20		8,5–11	8,6–12	8,6–12
	Pompes à chaleur géothermiques	0,01–0,35	900–3 800[xxvi]	7,8–8,9 dollars É.-U./GJ[xxvii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	s. o.[viii]	25–30	20		14–42	17–56	19–68

Remarques et notes générales:

i Toutes les valeurs sont arrondies à deux chiffres significatifs. La plupart des chapitres portant sur les diverses sources d'énergie renouvelable (chapitres 2 à 4) fournissent davantage de détails sur les coûts et les performances, notamment dans leur partie consacrée à l'évolution des coûts. Les hypothèses qui sous-tendent certaines des estimations de coûts de production extraites directement de la littérature risquent cependant de ne pas être aussi transparentes que les jeux de données présentés ici. Il convient donc d'examiner ces estimations avec prudence.

ii Les centrales électrocalogènes produisent à la fois de la chaleur et de l'électricité. Le calcul du coût moyen actualisé de l'une ou l'autre de ces énergies peut être réalisé de plusieurs façons. L'une des méthodes consiste à attribuer à l'énergie considérée comme sous-produit la valeur (actualisée) du marché et de soustraire des dépenses correspondantes le supplément de recettes ainsi estimé. C'est cette méthode qui est appliquée pour calculer le coût moyen actualisé de l'électricité produite par les centrales de cogénération à bioénergie. Le calcul du coût moyen actualisé de l'énergie thermique est effectué différemment, suivant la méthode employée par l'AIE (IEA, 2007), source principale des données de départ. Au lieu de considérer l'électricité comme un sous-produit et de soustraire sa valeur des dépenses correspondant à la production de chaleur, le total des dépenses engagées sur la durée de vie du projet d'investissement est réparti suivant le rapport moyen de production chaleur/électricité, et seule la part du coût d'investissement et des coûts d'exploitation et de maintenance correspondant à la production de chaleur est prise en compte. C'est pourquoi aucune recette provenant d'un sous-produit n'est indiquée dans ce tableau. Les deux méthodes possèdent leurs propres avantages et inconvénients.

iii CMA_{th}: coût moyen actualisé de l'énergie thermique (ou de la chaleur). Le coût moyen actualisé ne comprend pas le coût du transport et de la distribution dans le cas des systèmes de chauffage urbain. Les subventions et les crédits d'impôt et de taxes en faveur de la production à partir de sources renouvelables sont également exclus. Toutefois, il est impossible d'exclure entièrement les subventions et les taxes indirectes, qui sont associées aux moyens de production ou aux produits et qui influent sur les prix des moyens de production, et d'exclure par conséquent les coûts privés.

Suite à la page suivante →

Bioénergie:

iv CHG: Chauffage d'habitations par granulés.

v Cet intervalle est représentatif d'un chauffage basse consommation pour une maison individuelle (5 kW) ou un immeuble d'habitation (100 kW).

vi Pour un système de chauffage d'habitations par granulés, le coût d'investissement correspondant aux installations de combustion (y compris l'appareillage de commande) varie entre 100 et 640 dollars É.-U.$_{2005}$/kW. Cet intervalle plus élevé englobe les travaux de génie civil ainsi que le stockage du combustible et de la chaleur (IEA, 2007).

vii Les coûts fixes annuels d'exploitation et de maintenance englobent le coût de l'énergie d'appoint dont les besoins se situent entre 10 et 20 kWh/kW$_{th}$/an, étant admis que le prix de l'électricité varie dans une fourchette de 0,1 à 0,3 dollar É.-U.$_{2005}$/kWh. Pour la cogénération, les coûts d'exploitation et de maintenance sont ceux qui correspondent uniquement à la production de chaleur.

viii L'abréviation «s.o.» signifie «sans objet».

ix DUS: Déchets urbains solides.

x Cogénération ou production combinée de chaleur et d'électricité.

xi Intervalle de valeurs fondé sur l'avis d'experts et les données de l'AIE (IEA, 2007).

xii Pour la cogénération, le coût d'investissement est celui qui correspond uniquement à la production de chaleur. Les données sur l'électricité figurant dans le tableau A.III.1 fournissent des exemples de coûts d'investissement pour l'ensemble d'une centrale de cogénération (cf. section 2.4.4).

xiii Pour les installations utilisant les DUS, le coût d'investissement est établi principalement en fonction du coût de l'épuration des gaz de combustion, qui peut être imputé sur le traitement des déchets plutôt que sur la production de chaleur (IEA, 2007).

xiv Les incinérateurs de DUS produisant uniquement de la chaleur (comme c'est le cas au Danemark et en Suède), dont le rendement thermique peut atteindre entre 70 et 80 %, ne sont pas pris en compte (IEA, 2007).

xv Les intervalles de valeurs indiqués ici sont principalement établis à partir des données provenant de deux installations, l'une au Danemark et l'autre en Autriche (IEA, 2007).

xvi Le coût d'investissement indiqué est établi à partir des valeurs fournies dans la littérature concernant la capacité de production d'électricité, ce qui a été converti en capacité de production de chaleur, suivant une valeur du rendement électrique de 37 % et une valeur du rendement thermique de 55 % (IEA, 2007).

xvii Pour la digestion anaérobie, les prix du combustible sont fondés sur ceux d'un mélange de maïs fourrage et de fumier. D'autres biogaz peuvent être utilisés comme ceux obtenus à partir de déchets triés à la source ou les gaz d'enfouissement, mais ceux-ci ne sont pas pris en compte ici (IEA, 2007).

xviii Les valeurs du rendement de conversion tiennent compte de l'apport en chaleur d'appoint (entre 8 et 20 % pour la production industrielle) ainsi que de l'ajout de tout substrat pouvant améliorer le rendement. Dans le cas des déchets triés à la source, le rendement est inférieur (IEA, 2007).

Énergie solaire:

xix ECS: Eau chaude sanitaire.

xx La capacité installée d'un capteur est fixée à 0,7 kW$_{th}$/m² (cf. section 3.4.1).

xxi Sur les 13,5 millions de mètres carrés vendus en 2004, 70 % l'ont été à un prix inférieur à 1 500 yuans/m² (~190 dollars É.-U.$_{2005}$/kW) (Zhang *et al*., 2010). La valeur basse est fondée sur les données recueillies au cours d'entrevues normalisées réalisées dans la province du Zhejiang, en 2008 (Han *et al*., 2010). La valeur haute est tirée de Chang *et al*. (2011).

xxii On estime que les coûts fixes annuels d'exploitation représentent entre 1 et 3 % du coût d'investissement (IEA, 2007), ce à quoi il faut ajouter le coût annuel de l'énergie d'appoint dont les besoins se situent entre 2 et 10 kWh/kW/an, étant admis que le prix de l'électricité varie dans une fourchette de 0,1 à 0,3 dollar É.-U.$_{2005}$/kWh.

xxiii Le rendement de conversion des systèmes héliothermiques tend à être meilleur dans les régions où l'éclairement énergétique solaire est plus faible. Cela équilibre en partie l'effet négatif d'un éclairement énergétique solaire relativement faible sur le coût, étant donné que la production d'énergie par mètre carré de capteur ne faiblit pas (Harvey, 2006, p. 461). Quand il influe sur le coefficient d'utilisation, le rendement de conversion n'entre pas directement en ligne de compte dans le calcul du coût moyen actualisé de l'énergie thermique.

xxiv Le coefficient d'utilisation est basé sur une production annuelle d'énergie se situant par hypothèse entre 250 et 800 kWh/m² (IEA, 2007).

xxv La durée de vie prévue pour les chauffe-eau solaires chinois se situe entre 10 et 15 ans (Han *et al*., 2010).

Géothermie:

xxvi Au sujet des pompes à chaleur géothermiques, la fourchette de valeurs indiquée correspond au coût d'investissement pour des installations résidentielles, commerciales ou institutionnelles. Dans le cas des installations commerciales et institutionnelles, le coût d'investissement comprend le coût du forage, ce qui n'est pas vrai dans le cas des installations résidentielles.

xxvii Les coûts moyens d'exploitation et de maintenance exprimés en dollars É.-U.$_{2005}$/kWh$_{th}$ se situent entre 0,03 et 0,04 pour le chauffage d'immeuble, le chauffage urbain et celui des bassins d'aquaculture non couverts, entre 0,02 et 0,03 pour celui des serres, et entre 0,028 et 0,032 pour les pompes à chaleur géothermiques.

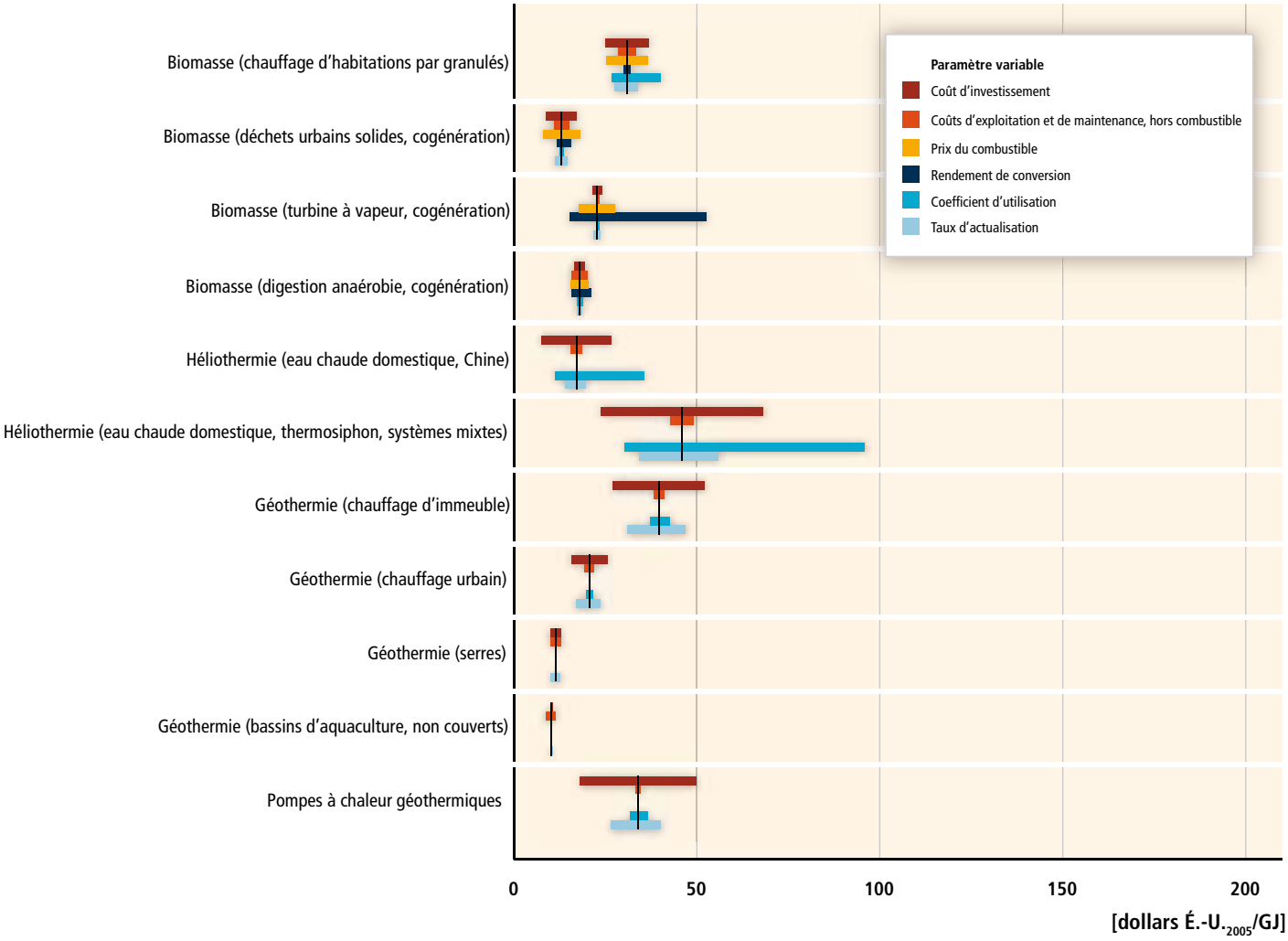


Figure A.III.3a | Diagramme en tornade des technologies de production de chaleur à partir de sources d'énergie renouvelable. Voir la figure A.III.1a pour plus d'explications.

Remarque: Le fait que l'héliothermie et la géothermie ne montrent aucune sensibilité aux variations du rendement de conversion peut prêter à confusion. L'apport en énergie est en effet gratuit dans ces deux cas, et ce n'est que par une augmentation de la production annuelle que peut se traduire l'effet d'un accroissement du rendement de conversion de l'énergie primaire sur le coût moyen actualisé de l'énergie thermique. Quant aux variations de la production annuelle, les variations du coefficient d'utilisation en rendent entièrement compte.

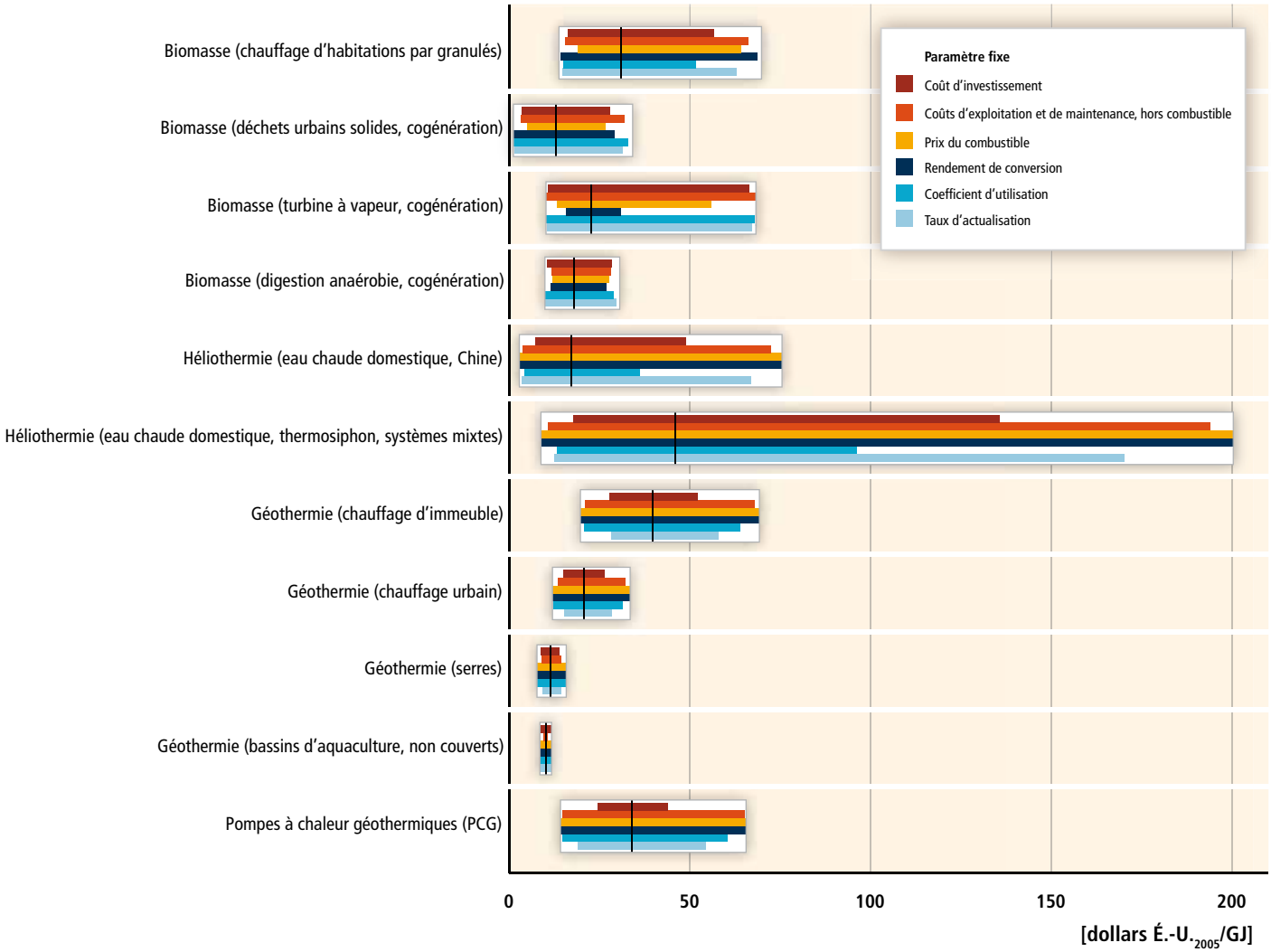


Figure A.III.3b | «Négatif» du diagramme en tornade des technologies de production de chaleur à partir de sources d'énergie renouvelable. Voir la figure A.III.1b pour plus d'explications.

Table A.III.3 | Coûts et performances des technologies de production de biocarburants.[i]

		Données de départ									Résultats		
Matière première	Carburant, Région	Capacité de production type (MW_{th})	Coût d'investissement (dollars É.-U./kW_{th})[ii]	Exploitation et maintenance coûts fixes annuels (dollars É.-U./kW_{th}) et variables hors matière première (dollars É.-U./GJ_{mp})	Recettes sous-produits (dollars É.-U./GJ_{mp})	Prix matière première (dollars É.-U./GJ_{mp})	Rendement de conversion[iii] (%) Produit seul (produit + sous-produit)	Coefficient d'utilisation (%)	Durée de vie économique (années)	Références	CMA_{ca}[iv] (dollars É.-U./GJ_{PCS})[v] Taux d'actualisation		
											3 %	7 %	10 %
Canne à sucre	Éthanol				sous-produit: sucre[vi]								
	Données globales	***170–1 000***	***83–360***	***16–35 dollars É.-U./kW_{th} et 0,87 dollar É.-U./GJ_{mp}***	***4,3***	***2,1–7,1***	***17 (39)***	***50 %***	***20***	***Alfstad (2008), Bain (2007), Kline et al. (2007)***	***2,4–39***	***3,5–42***	***4,5–46***
	Brésil, cas A[vii]	voir ci-dessus	100–330	20–32 dollars É.-U./kW_{th} et 0,87 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	2,1–6,5[viii]	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	Bohlmann et Cesar (2006), Oliverio (2006), van den Wall Bake *et al.* (2009)	2,4–38	3,5–41	4,5–44
	Argentine	voir ci-dessus	110–340	21–34 dollars É.-U./kW_{th} et 0,87 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	6,5[ix]	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	Oliverio et Riberio (2006), voir aussi la ligne *Données globales*	28–39	30–42	31–46
	Bassin des Caraïbes[x, xi]	voir ci-dessus	110–360	22–35 dollars É.-U./kW_{th} et 0,87 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	2,6–6,2	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	Rosillo-Calle *et al.* (2000) voir aussi la ligne *Données globales*	6,4–38	7,7–42	8,8–46
	Colombie	voir ci-dessus	100–320	20–31 dollars É.-U./kW_{th} et 0,87 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	5,6	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	McDonald et Schrattenholzer (2001), Goldemberg (1996), voir aussi la ligne *Données globales*	23–32	24–36	25–39
	Inde	voir ci-dessus	110–340	21–33 dollars É.-U./kW_{th} et 0,87 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	2,6–6,2	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	5,9–37	7,1–41	8,2–44
	Mexique	voir ci-dessus	83–260	16–25 dollars É.-U./kW_{th} et 0,87 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	5,2–7,1	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	19–37	19–40	20–42
	États-Unis d'Amérique	voir ci-dessus	100–320	20–31 dollars É.-U./kW_{th} et 0,87 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	6,2	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	27–36	28–40	29–43

Suite à la page suivante →

		Données de départ									Résultats		
Matière première	Carburant, Région	Capacité de production type (MW_{th})	Coût d'investissement (dollars É.-U./kW_{th})[ii]	Exploitation et maintenance coûts fixes annuels (dollars É.-U./kW_{th}) et variables hors matière première (dollars É.-U./GJ_{mp})	Recettes sous-produits (dollars É.-U./GJ_{mp})	Prix matière première (dollars É.-U./GJ_{mp})	Rendement de conversion[iii] (%) Produit seul (produit + sous-produit)	Coefficient d'utilisation (%)	Durée de vie économique (années)	Références	CMA_{ca}[iv] (dollars É.-U./GJ_{PCS})[v] Taux d'actualisation		
											3 %	7 %	10 %
Maïs	Éthanol				sous-produit: DDSS[xii]								
	Données globales	***s. o.***	***160–310***	***9–27 dollars É.-U./kW_{th} et 1,98 dollar É.-U./GJ_{mp}***	***1,56***	***4,2–10***[xiii]	***54 (91)***	***95 %***	***20***	***Alfstad (2008), Bain (2007), Kline et al. (2007)***	***9,3–22***	***9,5–22***	***10–23***
	États-Unis d'Amérique	140–550[xiv]	160–240	9–18 dollars É.-U./kW_{th} et 1,98 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	4,2–10[xv]	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	Delta-T Corporation (1997), Ibsen *et al.* (2005), Jechura (2005), voir aussi la ligne *Données globales*	9,3–22	9,5–22	10–23
	Argentine	voir ci-dessus	170–260	9–17 dollars É.-U./kW_{th} et 1,98 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	7,5	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	McAloon *et al.* (2000). RFA (2011), Université de l'Illinois (2011), voir aussi la ligne *Données globales*	16–17	16–17	17–18
	Canada	voir ci-dessus	200–310	13–27 dollars É.-U./kW_{th} et 1,98 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	4,8–5,7	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	11–15	12–15	12–16
Blé	Éthanol				sous-produit: DDSS[xii]								
	Données globales	***150–610***	***140–280***[xvi]	***8–25 dollars É.-U./kW_{th} et 1,41 dollar É.-U./GJ_{mp}***	***1,74***	***5,1–13***	***49 (91)***	***95 %***	***20***	***Alfstad (2008), Bain (2007), Kline et al. (2007)***	***12–28***	***12–28***	***12-28***
	États-Unis d'Amérique	voir ci-dessus	140–220	8–17 dollars É.-U./kW_{th} et 1,41 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	6,3–13	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	OCDE (2002), Shapouri et Salassi (2006), USDA (2007), voir aussi la ligne *Données globales*	13–28	14–28	14–28
	Argentine	voir ci-dessus	150–230	8–16 dollars É.-U./kW_{th} et 1,41 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	6,5–7	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	14–16	14–16	14–17
	Canada	voir ci-dessus	190–280	12–25 dollars É.-U./kW_{th} et 1,41 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	5,1–6,9	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	12–16	12–17	12–17

Suite à la page suivante →

		Données de départ									Résultats		
Matière première	Carburant, Région	Capacité de production type (MW_{th})	Coût d'investissement (dollars É.-U./kW_{th})[ii]	Exploitation et maintenance coûts fixes annuels (dollars É.-U./kW_{th}) et variables hors matière première (dollars É.-U./GJ_{mp})	Recettes sous-produits (dollars É.-U./GJ_{mp})	Prix matière première (dollars É.-U./GJ_{mp})	Rendement de conversion[iii] (%) Produit seul (produit + sous-produit)	Coefficient d'utilisation (%)	Durée de vie économique (années)	Références	CMA_{ca}[iv] (dollars É.-U./GJ_{PCS})[v] Taux d'actualisation 3 %	7 %	10 %
Huile de soja	Biogazole[xvii]				By-product: Glycerin[xviii]								
	Données globales	***44–440***	***160–320***	***9–46 dollars É.-U./kW_{th} et 2,58 dollars É.-U./GJ_{mp}***	***0,58***	***7,0–24***	***103 (107)19***	***95 %***	***20***	***Alfstad (2008), Bain (2007), Kline et al. (2007),Haas et al. (2006), Sheehan et al. (2006)***	***9,4–28***	***10–28***	***10–28***
	Argentine	voir ci-dessus	170–320	12–42 dollars É.-U./kW_{th} et 2,58 dollars É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	14–16[xx]	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	Chicago Board of Trade (2006), voir aussi la ligne *Données globales*	16–19	16–19	17–20
	Brésil	voir ci-dessus	160–310	9–27 dollars É.-U./kW_{th} et 2,58 dollars É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	7,0–18[xx]	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	Chicago Board of Trade (2006), voir aussi la ligne *Données globales*	9,4–21	10–21	10–21
	États-Unis d'Amérique	voir ci-dessus	160–300	12–46 dollars É.-U./kW_{th} et 2,58 dollars É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	9,7–24	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	USDA (2006), voir aussi la ligne *Données globales*	12–28	12–28	12–28
Huile de palme	Biogazole				By-product: Glycerin[xviii]								
	Données globales	***44–440***	***160–340***	***10–46 dollars É.-U./kW_{th} et 2,58 dollars É.-U./GJ_{mp}***	***0,58***	***6,1–45***	***103 (107)***	***95 %***	***20***	***Alfstad (2008), Bain (2007), Kline et al. (2007), Haas et al. (2006), Sheehan et al. (1998)***	***8,7–48***	***8,9–48***	***9,0–49***
	Colombie	voir ci-dessus	160–300	10–34 dollars É.-U./kW_{th} et 2,58 dollars É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	6,1–45	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	8,7–48	8,8–48	9,0–49
	Bassin des Caraïbes[ix]	voir ci-dessus	180- 340	13–46 dollars É.-U./kW_{th} et 2,58 dollars É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	11–45	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	14–48	14–48	14–48
Bois, bagasse, divers	Huile de pyrolyse				By-product: Electricity[xxi]								
	Données globales	***110–440***	***160–240***	***12–44 dollars É.-U./kW_{th} et 0,42 dollar É.-U./GJ_{mp}***	***0,07***	***0,44–5,5[xxii]***	***67 (69)***	***95 %***	***20***	***Ringer et al. (2006)***	***2,3–12***	***2,6–12***	***2,8–12***
	États-Unis d'Amérique	voir ci-dessus	160–230	19–44 dollars É.-U./kW_{th} et 0,42 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	1,4–5,5	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	4,0–12	4,3–12	4,5–12
	Brésil	voir ci-dessus	160–240	12–24 dollars É.-U./kW_{th} et 0,42 dollar É.-U./GJ_{mp}	voir ci-dessus	0,44–5,5	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir ci-dessus	voir la ligne *Données globales*	2,3–11	2,5–11	2,8–11

Suite à la page suivante →

Remarques et notes générales:

i Toutes les valeurs sont arrondies à deux chiffres significatifs. Le chapitre 2 fournit davantage d'information sur les coûts et les performances, notamment dans sa partie consacrée à l'évolution des coûts. Les hypothèses qui sous-tendent certaines des estimations du coût de production extraites directement de la littérature risquent cependant de ne pas être aussi transparentes que les jeux de données présentés ici. Il convient donc d'examiner ces estimations avec prudence.

ii Le coût d'investissement est fonction du coefficient d'utilisation de l'usine de production à une capacité différente de 100 %, soit la méthode employée normalement par convention.

iii Le rendement de conversion de la matière première, correspondant au rapport entre l'apport énergétique et l'énergie produite, n'est indiqué que pour la biomasse. Les rendements de conversion pour un intrant mixte biomasse-combustible fossile sont généralement plus faibles.

iv CMA_{ca}: coût moyen actualisé des carburants destinés aux transports. Le coût moyen actualisé englobe tous les coûts privés imputés en amont dans le système, sans toutefois inclure les coûts du transport et de la distribution aux clients. Les subventions et les crédits d'impôt et de taxes en faveur de la production à partir de sources renouvelables sont également exclus. Toutefois, il est impossible d'exclure entièrement les subventions et les taxes indirectes, qui sont associées aux moyens de production ou aux produits et qui influent sur les prix des moyens de production, et d'exclure par conséquent les coûts privés.

v PCS: pouvoir calorifique supérieur. PCI : pouvoir calorifique inférieur.

vi Le prix du sucre ou les recettes tirées du sucre sont estimés à 22 dollars $É.-U._{2005}/GJ_{sucre}$ sur la base du prix moyen mondial du sucre raffiné entre 2005 et 2008.

vii Dans les calculs relatifs au cas A, il est admis que la canne à sucre contient 14 % de saccharose; on prend aussi pour hypothèse qu'une moitié (50 %) du saccharose sert à la fabrication du sucre (efficacité d'extraction de 97 %) et l'autre moitié (50 %) sert à la production d'éthanol (rendement de conversion de 90 %). On admet que la canne à sucre contient 16 % de bagasse. Les PCS utilisés sont: pour la bagasse, 18,6 GJ/t; pour le saccharose, 17,0 GJ/t; et pour la canne dans son état initial à réception: 5,3 GJ/t.

viii Entre 1975 et 2005, le prix de la matière première a baissé de 60 % (Hettinga *et al*., 2009). On trouvera des renseignements plus précis sur l'évolution historique et future des coûts dans les sections 2.7.2, 2.7.3 et 2.7.4.

ix La bagasse représente 55,2 % de la matière première utilisée. Il est possible d'obtenir davantage de détails sur les caractéristiques de la matière première en se reportant à la section 2.3.1, par exemple.

x Citons, parmi les pays participant au projet d'initiative concernant le bassin des Caraïbes, le Guatemala, le Honduras, le Nicaragua, la République dominicaine, le Costa Rica, El Salvador ou encore le Guyana.

xi Fabrique combinée d'éthanol et de sucre (50/50). On trouvera des renseignements plus précis sur les sucreries dans la section 2.3.4.

xii DDSS: Drêche de distillerie séchée avec solubles.

xiii Le prix de la matière première à l'échelle internationale est établi à partir des courbes de l'offre proposées par Kline *et al*. (2007). On trouvera, dans la section 2.2.3, des renseignements plus précis sur les courbes d'offre de matières premières et d'autres facteurs économiques entrant dans les évaluations des ressources en biomasse.

xiv L'intervalle proposé pour la capacité de production (entre 140 et 550 MW, soit l'équivalent de 25 à 100 millions de gallons par an d'éthanol anhydre) est représentatif de l'industrie de l'éthanol de maïs aux États-Unis d'Amérique (RFA, 2011).

xv Entre 1975 et 2005, le prix du maïs a baissé de 63 % (Hettinga *et al*., 2009). On trouvera des renseignements plus précis sur l'évolution historique et future des coûts dans les sections 2.7.2, 2.7.3 et 2.7.4.

xvi Sur la base des coûts d'usinage du maïs, corrigés pour le PCS, et sur celle de la production de drêche de distillerie séchée pour le blé. On trouvera des renseignements plus précis sur la transformation des céréales dans la section 2.3.4.

xvii On prend pour base l'huile de soja et non pas la graine de soja. La marge de transformation permet d'obtenir le prix de l'huile de soja à partir de celui de la graine de soja. Le PCS de l'huile de soja est égal à 39,6 GJ/t.

xviii La glycérine ou glycérol est un simple composé polyol (1,2,3-propanétriol); c'est l'élément principal de tous les lipides qui font partie des triglycérides. Il s'agit d'un sous-produit de la production du biogazole.

xix Le rendement est supérieur à 100 %, car du méthanol (ou un autre alcool) est incorporé dans le produit.

xx Le prix de l'huile de soja est estimé à partir du prix de la graine de soja (Kline *et al*., 2007) en fonction de la marge de transformation (Chicago Board of Trade, 2006).

xxi Les gaz et les résidus solides (charbonneux) découlant du processus sont utilisés comme sources de chaleur et d'électricité dans le processus. L'excédent d'électricité est exporté comme sous-produit.

xxii Cet intervalle est obtenu à partir des prix de la bagasse et des résidus de bois (Kline *et al*., 2007). Les valeurs hautes correspondent à la pyrolyse du bois, tandis que les valeurs basses, à celle de la bagasse. On trouvera des renseignements plus précis sur la pyrolyse dans la section 2.3.3.2, et sur l'évolution historique et future des coûts dans les sections 2.7.2, 2.7.3 et 2.7.4.

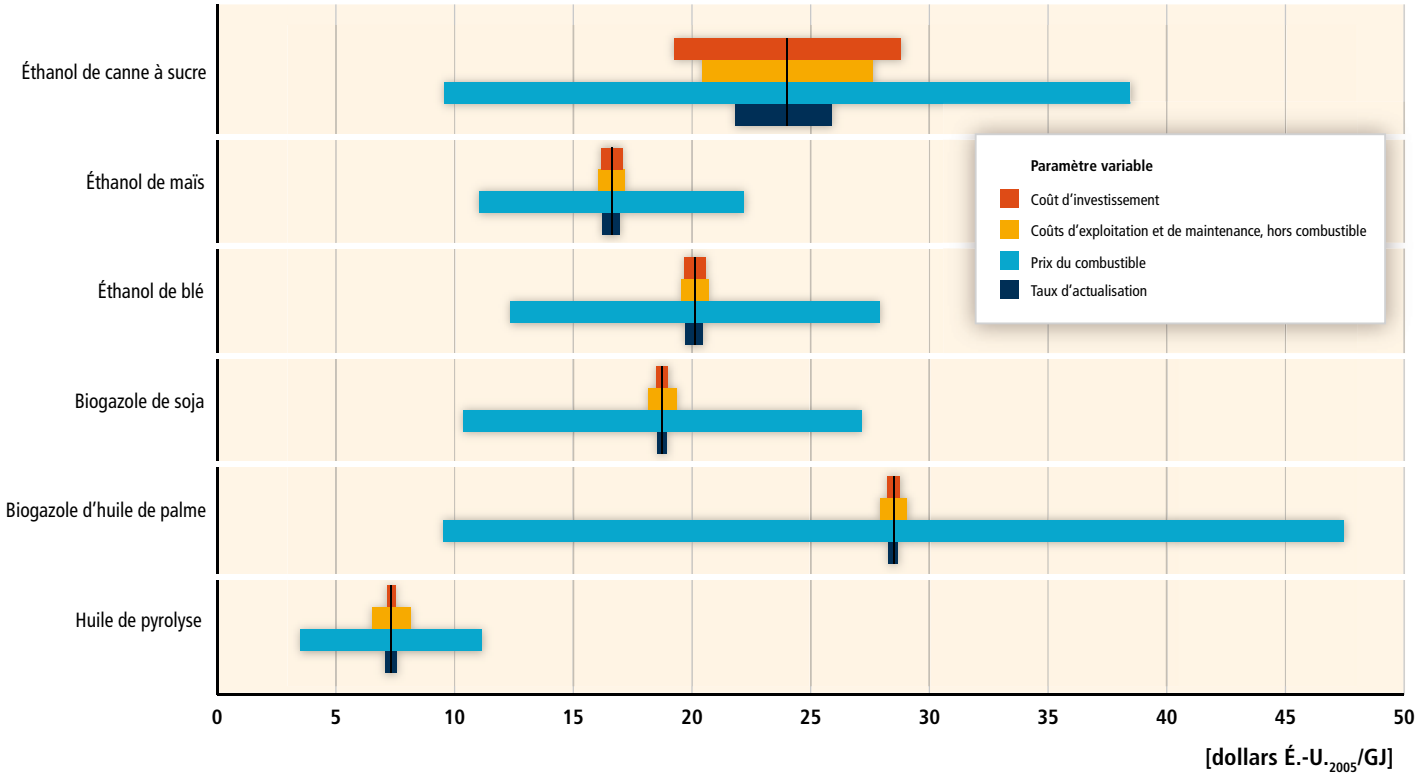


Figure A.III.4a | Diagramme en tornade des biocarburants. Voir la figure A.III.1a pour plus d'explications.

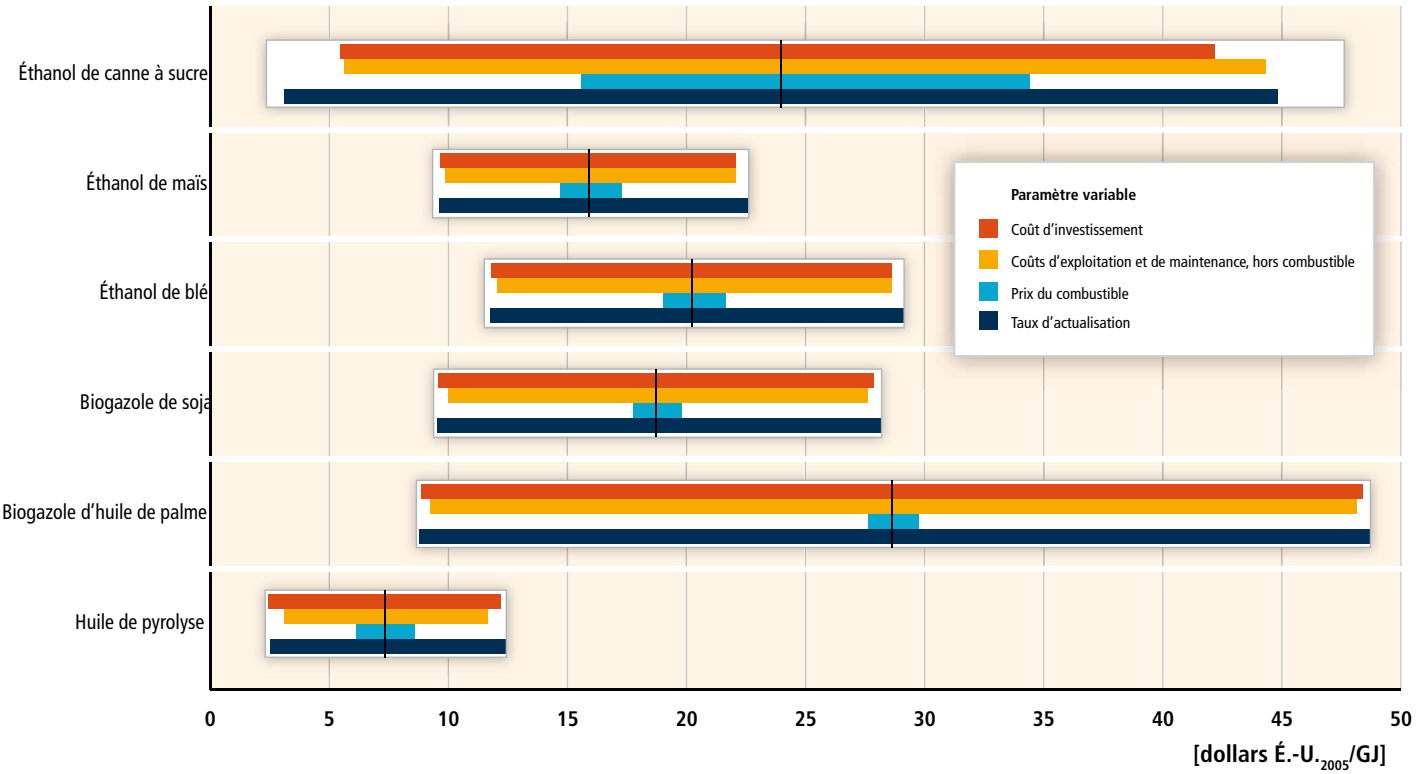


Figure A.III.4b | «Négatif» du diagramme en tornade des biocarburants. Voir la figure A.III.1b pour plus d'explications.

Remarque: L'intervalle de valeurs correspondant au coût moyen actualisé des combustibles est légèrement plus grand lorsqu'on calcule ce coût après avoir fait la somme des données initiales pour les différentes régions que lorsqu'on calcule d'abord ce coût pour les différentes régions avant d'effectuer la somme des valeurs ainsi obtenues. Afin que le champ d'application de l'analyse de sensibilité soit le plus large possible, c'est la première méthode de calcul qui a été employée. Les valeurs obtenues ont cependant été ajustées pour correspondre aux valeurs déterminées grâce à la deuxième méthode, qui est plus précise et qu'on utilise dans le reste du rapport.

Bibliographie

On s'est inspiré des références qui constituent la liste qui suit pour évaluer les données sur les coûts et les performances des différentes technologies reprises dans les tableaux. Seules quelques-unes de ces références sont citées dans le corps de l'annexe afin de préciser l'information fournie dans les explications. La liste qui suit est classée par types ou vecteurs d'énergie et par technologies.

Énergie électrique

Bioénergie

***Remarque**: Dans le corps du chapitre 2, d'autres études référencées portant sur les coûts sont évaluées. Elles ont servi à vérifier la fiabilité des résultats découlant de la méta-analyse fondée sur les sources de données dont la liste figure ci-dessous.*

Bain, R.L. (2007). *World Biofuels Assessment, Worldwide Biomass Potential: Technology Characterizations.* NREL/MP-510-42467, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique, 140 p.

Bain, R.L. (2011). *Biopower Techniques in Renewable Electricity Alternative Futures.* National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique, sous presse.

Bain, R.L., W.P. Amos, M. Downing et R.L. Perlack (2003). *Biopower Technical Assessment: State of the Industry and the Technology.* TP-510-33123, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique, 277 p.

DeMeo, E.A. et J.F. Galdo (1997). *Renewable Energy Technology Characterizations.* TR-109496, U.S. Department of Energy and Electric Power Research Institute, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 283 p.

EIA (2009). *2006 Energy Consumption by Manufacturers—Data Tables.* Table 7.2. Energy Information Administration, US Department of Energy, Washington, DC, États-Unis d'Amérique. URL: eia.doe.gov/emeu/mecs/mecs2006/2006tables.html.

McGowin, C. (2008). *Renewable Energy Technical Assessment Guide.* TAG-RE: 2007, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, Californie, États-Unis d'Amérique.

Neij, L. (2008). Cost development of future techniques for power generation – A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments. Energy Policy, 36(6), p. 2200-2211.

OANDA (2011). *Historique des taux de change.*

Obernberger, I. et G. Thek (2004). *Techno-economic evaluation of selected decentralised CHP applications based on biomass combustion in IEA partner countries.* BIOS Bioenergiesysteme GmbH, Graz, Autriche, 87 p.

Obernberger, I., G. Thek et D. Reiter (2008). *Economic Evaluation of Decentralised CHP Applications Based on Biomass Combustion and Biomass Gasification.* BIOS Bioenergiesysteme GmbH, Graz, Autriche, 19 p.

Peters, M, K. Timmerhaus et R. West (2003). *Plant Design and Economics for Chemical engineers, cinquième édition*, McGraw –Hill Companies, New York, États-Unis d'Amérique, 242 p. (ISBN 0-07-239266-5).

Rauch, R. (2010). Indirect Gasification. *In: IEA Joint Task 32 &33 Workshop,* Copenhague, Danemark, 7 octobre 2010. URL: www.ieabcc.nl/meetings/task32_Copenhagen/09%20TU%20Vienna.pdf.

Skjoldborg, B. (2010). Optimization of I/S Skive District Heating Plant. *In: IEA Joint Task 32 & 33 Workshop*, Copenhague, Danemark, 7 octobre 2010. URL: www.ieabcc.nl/meetings/task32_Copenhagen/11%20Skive.pdf.

Énergie solaire directe

Bloomberg (2010). *Bloomberg New Energy Finance – Renewable Energy Data*. URL: bnef.com/.

Breyer, C., A. Gerlach, J. Mueller, H. Behacker et A. Milner (2009). Grid-parity analysis for EU and US regions and market segments - Dynamics of grid-parity and dependence on solar irradiance, local electricity prices and PV progress ratio. *In: Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference,* 21-25 septembre 2009, Hambourg, Allemagne, p. 4492-4500.

Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2010). *Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (photovoltaik).* Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW Solar), Berlin, Allemagne, 4 p.

IEA (2010a). *Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050.* Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 710 p.

IEA (2010b). *Technology Roadmap, Concentrating Solar Power*. Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 48 p.

IEA (2010c). *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*. Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 48 p.

NEEDS (2009). *New Energy Externalities Development for Sustainability (NEEDS). Rapport et base de données.* New Energy Externalities Development for Sustainability, Rome, Italie.

NREL (2011a). Solar PV Manufacturing Cost Model Group: Installed Solar PV System Prices. Présentation lors du *SEGIS_ADEPT Power Electronic in Photovoltaic Systems Workshop*, Arlington, Virginie, États-Unis d'Amérique, 8 février 2011. NREL/PR-6A20-50955.

NREL (2011b). *The Open PV Project*. Base de données en ligne. URL: openpv.nrel.org.

Sharma, A. (2011). A comprehensive study of solar power in India and world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), p. 1767-1776.

Trieb, F., C. Schillings, M. O'Sullivan, T. Pregger et C. Hoyer-Klick (2009). Global potential of concentrating solar power. *In: SolarPACES Conference*, Berlin, Allemagne, 15-18 septembre 2009.

Viebahn, P., Y. Lechon et F. Trieb (2010). The potential role of concentrated solar power (CSP) in Africa and Europe: A dynamic assessment of technology development, cost development and life cycle inventories until 2050. *Energy Policy,* doi: 10.1016/j.enpol.2010.09.026.

Géothermie

Barnett, P. et P. Quinlivan (2009). *Assessment of Current Costs of Geothermal Power Generation in New Zealand (2007 basis).* Report by SKM for New Zealand Geothermal Association, Wellington, Nouvelle-Zélande. URL: www.nzgeothermal.org.nz\industry_papers.html.

Bertani, R., 2010: Geothermal electric power generation in the world: 2005-2010 update report. *In: Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonésie, 25-30 avril 2010. URL: www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0008.pdf.

Bromley, C.J., M.A. Mongillo, B. Goldstein, G. Hiriart, R. Bertani, E. Huenges, H. Muraoka, A. Ragnarsson, J. Tester et V. Zui (2010). Contribution of geothermal energy to climate change mitigation: the IPCC renewable energy report. *In: Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonésie, 25-30 avril 2010. URL: www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0225.pdf.

Cross, J. et J. Freeman (2009). *2008 Geothermal Techniques Market Report.* Geothermal Techniques Program of the US Department of Energy, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 46 p. URL: www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/2008_market_report.pdf.

Darma, S., S. Harsoprayitno, B. Setiawan, Hadyanto, R. Sukhyar, A.W. Soedibjo, N. Ganefianto et J. Stimac (2010). Geothermal energy update: Geothermal energy development and utilization in Indonesia. *In: Actes du Congrès mondial de géothermie, 2010*, Bali, Indonésie, 25-29 avril, 2010. URL: www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0128.pdf.

DiPippo, R. (2008). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Elsevier, Londres, Royaume-Uni, 493 p.

GTP (2008). *Geothermal Tomorrow 2008*. DOE-GO-102008-2633, Geothermal Techniques Program of the US Department of Energy, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 36 p.

Gutiérrez-Negrín, L.C.A., R. Maya-González et J.L. Quijano-León (2010). Current status of geothermics in Mexico. *In: Actes du Congrès mondial de géothermie, 2010*, Bali, Indonésie, 25-29 avril 2010. URL: www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0101.pdf.

Hance, C.N. (2005). *Factors Affecting Costs of Geothermal Power Development.* Geothermal Energy Association, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 64 p. URL: www.geo-energy.org/reports/Factors%20Affecting%20Cost%20of%20Geothermal%20Power%20Development%20-%20August%202005.pdf.

Hjastarson, A. et J.G. Einarsson (2010). *Geothermal resources and properties of HS Orka, Reyjanes Peninsula, Iceland*. Rapport technique indépendant établi par Mannvit Engineering pour Magma Energy Corporation, 151 p. Disponible sur demande à: www.mannvit.com.

Kutscher, C. (2000). *The Status and Future of Geothermal Electric Power*. Publication NREL/CP-550-28204, National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 9 p. URL: www.nrel.gov/docs/fy00osti/28204.pdf.

Lovekin, J. (2000). The economics of sustainable geothermal development. *In: Actes du Congrès mondial de géothermie, 2000*, Kyushu-Tohoku, Japon, 28 mai – 10 juin 2000 (ISBN: 0473068117). URL: www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0123.PDF.

Lund, J.W., K. Gawell, T.L. Boyd et D. Jennejohn (2010). The United States of America country update 2010. *In: Actes du Congrès mondial de géothermie, 2010*, Bali, Indonésie, 25-30 avril 2010. URL: www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0102.pdf.

Owens, B. (2002). *An Economic Valuation of a Geothermal Production Tax Credit.* Publication NREL/TP-620-31969, National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 24 p. URL: www.nrel.gov/docs/fy02osti/31969.pdf.

Stefansson, V. (2002). Investment cost for geothermal power plants. *Geothermics*, 31, p. 263-272.

Énergie hydraulique

Avarado-Anchieta et C. Adolfo (2009). Estimating E&M powerhouse costs. *International Water Power and Dam Construction*, 61(2), p. 21-25.

BMU (2008). *Further development of the 'Strategy to increase the use of renewable energies' within the context of the current climate protection goals of Germany and Europe*. German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), Bonn, Allemagne, 118 p.

Hall, D.G., G.R. Carroll, S.J. Cherry, R.D. Lee et G.L. Sommers (2003). *Low Head/Low Power Hydropower Resource Assessment of the North Atlantic and Middle Atlantic Hydrologic Regions*. DOE/ID-11077, U.S. Department of Energy Idaho Operations Office, Idaho Falls, Idaho, États-Unis d'Amérique.

IEA (2008a). *World Energy Outlook 2008*. Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 578 p.

IEA (2008b). *Energy Technology Perspectives 2008. Scenarios and Strategies to 2050.* Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 646 p.

IEA (2010d). *Renewable Energy Essentials: Hydropower.* Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France. 4 p.

IEA (2010e). *Projected Costs of Generating Electricity*. Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 218 p.

IJHD (2010). *World Atlas & Industry Guide*. International Journal on Hydropower and Dams (IJHD), Wallington, Surrey, Royaume-Uni, 405 p.

Krewitt, W., K. Nienhaus, C. Klebmann, C. Capone, E. Stricker, W. Grauss, M. Hoogwijk, N. Supersberger, U.V. Winterfeld et S. Samadi (2009). *Role and Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply.* Climate Change 18/2009, ISSN 1862-4359, Federal Environment Agency, Dessau-Roßlau, Allemagne, 336 p.

Lako, P., H. Eder, M. de Noord et H. Reisinger (2003). *Hydropower Development with a Focus on Asia and Western Europe: Overview in the Framework of VLEEM 2*. Verbundplan ECN-C-03-027. Energy Research Centre of the Netherlands, Petten, Pays-Bas.

REN21 (2010). *Renewables 2010 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), Paris, France, 80 p.

Teske, S., T. Pregger, S. Simon, T. Naegler, W. Graus et C. Lins (2010). Energy [R]evolution 2010—a sustainable world energy outlook. *Energy Efficiency*, doi:10.1007/s12053-010-9098-y.

UNDP/UNDESA/WEC (2004). *World Energy Assessment: Overview 2004 Update.* Bureau des politiques de développement, Programme des Nations Unies pour le développement, New York, New York, États-Unis d'Amérique, 85 p.

Énergie marine

Charlier, R.H. (2003). Sustainable co-generation from the tides: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(3), p. 187-213.

ETSAP (2010b). *Marine Energy Technology Brief E13 - November, 2010*. Energy Technology Systems Analysis Programme, Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France. URL: www.etsap.org/E-techDS/PDF/E08-Ocean%20Energy_GSgct_Ana_LCPL_rev30Nov2010.pdf.

Kerr, D. (2007). Marine energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences)*, 365(1853), p. 971-92.

Énergie éolienne

Blanco, M.I. (2009). The economics of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, p. 1372-1382.

Boccard, N. (2009). Capacity factor of wind power realized values vs. estimates. *Energy Policy*, 37, p. 2679-2688.

BTM Consult ApS (2010). *International Wind Energy Development. World Market Update 2009*. BTM Consult ApS, Ringkøbing, Danemark, 124 p.

BWEA et Garrad Hassan (2009). *UK Offshore Wind: Charting the Right Course.* British Wind Energy Association, Londres, Royaume-Uni, 42 p.

China Renewable Energy Association (2009). *Annual Report of New Energy and Renewable Energy in China, 2009*. China Renewable Energy Association, Beijing, Chine.

EWEA (2009). *Wind Energy, the Facts*. European Wind Energy Association, Bruxelles, Belgique, 488 p.

Goyal, M. (2010). Repowering – Next big thing in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, p. 1400-1409.

IEA (2009). *Technology Roadmap – Wind Energy*. Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 52 p.

IEA (2010a). *Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050*. Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 710p.

IEA Wind (2010). *IEA Wind Energy Annual Report 2009*. International Energy Agency Wind, Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 172 p.

Lemming, J.K., P.E. Morthorst, N.E. Clausen et J.P. Hjuler, (2009). *Contribution to the Chapter on Wind Power in Energy Technology Perspectives 2008, IEA*. Risø National Laboratory, Roskilde, Danemark, 64 p.

Li, J. (2010). Decarbonising power generation in China – Is the answer blowing in the wind? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, p. 1154-1171.

Li, J. et L. Ma (2009). *Background Paper: Chinese Renewables Status Report.* Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France, 95 p.

Milborrow, D. (2010). Annual power costs comparison: What a difference a year can make. *Windpower Monthly*, 26, p. 41-47.

Musial, W. et B. Ram (2010). *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States: Assessment of Opportunities and Barriers*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique, 240 p.

Nielson, P., J.K. Lemming, P.E. Morthorst, H. Lawetz, E.A. James-Smith, N.E. Clausen, S. Strøm, J. Larsen, N.C. Bang et H.H. Lindboe (2010). *The Economics of Wind Turbines*. EMD International, Aalborg, Danemark, 86 p.

Snyder, B. et M.J. Kaiser (2009). A comparison of offshore wind power development in Europe and the US: Patterns and drivers of development. *Applied Energy*, 86, p. 1845-1856.

UKERC (2010). *Great Expectations: The Cost of Offshore Wind in UK Waters – Understanding the Past and Projecting the Future*. United Kingdom Energy Research Centre, Londres, Royaume-Uni, 112 p.

Wiser, R. et M. Bolinger (2010). *2009 Wind Techniques Market Report.* US Department of Energy, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 88 p.

Énergie thermique

Bioénergie

Remarque: Dans le corps du chapitre 2, d'autres études référencées portant sur les coûts sont évaluées. Elles ont servi à vérifier la fiabilité des résultats découlant de la méta-analyse fondée sur les sources de données dont la liste figure ci-dessous.

IEA (2007). *Renewables for Heating and Cooling – Untapped Potential.* Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 209 p.

Obernberger, I. et G. Thek (2004). Techno-economic evaluation of selected decentralised CHP applications based on biomass combustion in IEA partner countries. BIOS Bioenergiesysteme GmbH, Graz, Autriche, 87 p.

Énergie solaire directe

Chang, K.-C., W.-M. Lin, T.-S. Lee et K.-M. Chung (2011). Subsidy programs on diffusion of solar water heaters: Taiwan's experience. *Energy Policy*, 39, p. 563-567.

Han, J., A.P.J. Mol et Y. Lu (2010). Solar water heaters in China: A new day dawning. *Energy Policy*, 38(1), p. 383-391.

Harvey, L.D.D. (2006). *A Handbook on Low-Energy Buildings and District-Energy Systems: Fundamentals, Techniques and Examples*. Earthscan, Sterling, Virginie, États-Unis d'Amérique, 701 p.

IEA (2007). *Renewables for Heating and Cooling – Untapped Potential*, Agence internationale de l'énergie (AIE), Paris, France, 209 p.

Zhang, X., W. Ruoshui, H. Molin et E. Martinot (2010). A study of the role played by renewable energies in China's sustainable energy supply. Energy, 35(11), p. 4392-4399.

Géothermie

Balcer, M. (2000). Infrastruktura techniczna zakladu geotermalnego w Mszczonowie (en polonais). *In: Rola energii geotermalnej w zrównowazonym rozwoju regionów Mazowieckiego i Lodzkiego (Colloque sur la place de la géothermie dans le développement durable des régions de Mazovie et de Lodz),* Institut de recherche sur les aspects économiques de l'exploitation minière et de l'énergie, Académie polonaise des sciences, Cracovie, Pologne, 4-6 octobre 2000, p. 107-114 (ISBN 83-87854-62-X).

Lund, J.W. (1995). Onion dehydration. *Transactions of the Geothermal Resources Council,* 19, p. 69-74.

Lund, J.W. et T.L. Boyd (2009). Geothermal utilization on the Oregon Institute of Technology campus, Klamath Falls, Oregon. *Proceedings of the 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Université de Stanford, Californie, États-Unis d'Amérique (ISBN: 9781615673186).

Radeckas, B. et V. Lukosevicius (2000). Klaipeda Geothermal demonstration project. *In: Actes du Congrès mondial de géothermie, 2000*, Kyushu-Tohoku, Japon, 28 mai – 10 juin 2000, p. 3547-3550 (ISBN: 0473068117). URL: www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0237.PDF.

Reif, T. (2008). Profitability analysis and risk management of geothermal projects. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 28(4), p. 1-4. URL: geoheat.oit.edu/bulletin/bull28-4/bull28-4-all.pdf.

Biocarburants

***Remarque**: Dans le corps du chapitre 2, d'autres références sont évaluées. Elles ont servi à vérifier la fiabilité des résultats découlant de la méta-analyse fondée sur les sources de données dont la liste figure ci-dessous.*

Généralités

Alfstad, T. (2008). *World Biofuels Study: Scenario Analysis of Global Biofuels Markets.* BNL-80238-2008, Brookhaven National Laboratory, New York, New York, États-Unis d'Amérique, 67 p.

Bain, R.L. (2007). *World Biofuels Assessment, Worldwide Biomass Potential: Technology Characterizations*. NREL/MP-510-42467, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique, 140 p.

Goldemberg, J. (1996). The evolution of ethanol costs in Brazil. *Energy Policy,* 24(12), p. 1127-1128.

Hettinga, W.G., H.M. Junginger, S.C. Dekker, M. Hoogwijk, A.J. McAloon et K.B. Hicks (2009). Understanding the reductions in US corn ethanol production costs: An experience curve approach. *Energy Policy*, 37(1), p. 190-203.

Kline, K.L., G. Oladosu, A. Wolfe, R.D. Perlack et M. McMahon (2007). *Biofuel Feedstock Assessment for Selected Countries*. ORNL/TM-2007/224, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, États-Unis d'Amérique, 243 p.

Éthanol de maïs

Delta-T Corporation (1997). *Proprietary information*. Williamsburg, Virginie, États-Unis d'Amérique.

Ibsen, K., R. Wallace, S. Jones et T. Werpy (2005). *Evaluating Progressive Technology Scenarios in the Development of the Advanced Dry Mill Biorefinery.* FY05-630, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique.

Jechura, J. (2005). *Dry Mill Cost-By-Area: ASPEN Case Summary*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique, 2 p.

McAloon, A., F. Taylor, W. Lee, K. Ibsen et R. Wooley (2000). *Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks*. NREL/TP-580-28893, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique, 43 p.

RFA (2011). *Biorefinery Plant Locations*. Renewable Fuels Association (RFA), Washington, DC, États-Unis d'Amérique. URL: www.ethanolrfa.org/bio-refinery-locations/.

Université de l'Illinois (2011). *farmdoc: Historical Corn Prices*. Université de l'Illinois, Urbana, Illinois, États-Unis d'Amérique. URL: www.farmdoc.illinois.edu/manage/pricehistory/price_history.html.

Éthanol de blé

Kline, K., G. Oladosu, A. Wolfe, R. Perlack, V. Dale and M. McMahon (2007). *Biofuel feedstock assessment for selected countries*, ORNL/TM-2007/224, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, États-Unis d'Amérique, 243 p.

Shapouri, H. et M. Salassi (2006). *The Economic Feasibility of Ethanol Production in the United States*. US Department of Agriculture, Washington, DC, États-Unis d'Amérique, 69 p.

USDA (2007). *Wheat Data: Yearbook Tables*. Economic Research Service, US Department of Agriculture (USDA), Washington, DC, États-Unis d'Amérique.

Canne à sucre

Bohlmann, G.M. et M.A. Cesar (2006). The Brazilian opportunity for biorefineries. *Industrial Biotechnology*, 2(2), p. 127-132.

Oliverio, J.L. (2006). Technological evolution of the Brazilian sugar and alcohol sector: Dedini's contribution. *International Sugar Journal,* 108(1287), p. 120-129.

Oliverio, J.L. et J.E. Riberio (2006). Cogeneration in Brazilian sugar and bioethanol mills: Past, present and challenges. *International Sugar Journal*, 108(191), p. 391-401.

Rosillo-Calle, F., S.V. Bajay et H. Rothman (2000). *Industrial Uses of Biomass Energy: The Example of Brazil*. Taylor & Francis, Londres, Royaume-Uni.

van den Wall Bake (2006). *Cane as Key in Brazilian Ethanol Industry*. Master's Thesis, NWS-1-2006-14, Université d'Utrecht, Utrecht, Pays-Bas.

van den Wall Bake, J.D., M. Junginger, A. Faaij, T. Poot et A. Walter (2009). Explaining the experience curve: Cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane. *Biomass and Bioenergy*, 33(4), p. 644-658.

Biogazole

Chicago Board of Trade (2006). *CBOT® Soybean Crush Reference Guide*. Board of Trade of the City of Chicago, Chicago, Illinois, États-Unis d'Amérique.

Haas, M.J., A.J. McAloon, W.C. Yee et T.A. Foglia (2006). A process model to estimate biodiesel production costs. *Bioresource Technology,* 97(4), p. 671-678.

Sheehan, J., V. Camobreco, J. Duffield, M. Graboski et H. Shapouri (1998). *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus*. NREL/SR-580-24089. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique.

Huile de pyrolyse

Ringer, M., V. Putsche et J. Scahill (2006). *Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis*. TP-510-37779, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis d'Amérique, 93 p.

«La lutte contre le changement climatique est un défi majeur du XXIe siècle, et le passage à un système énergétique mondial qui ferait la part belle aux énergies renouvelables pourrait être l'une des solutions apportées par notre civilisation. Le présent rapport s'attache à montrer la voie dans ce domaine.»

– Hartmut Graßl, ancien directeur du Programme mondial de recherche sur le climat
Institut Max Planck de météorologie

«Ce rapport, un des plus complets et fiables qui soient, vient alimenter le débat sur la question de savoir si les énergies renouvelables apportent une solution économiquement viable à la problématique du climat. Il trace la voie à suivre pour développer ce secteur, dont la contribution à l'atténuation du changement climatique est clairement mise en évidence.»

– Geoffrey Heal, Columbia Business School, Université Columbia

«Les sources d'énergie renouvelable et les techniques utilisées pour les mettre à profit représentent la clef des multiples problèmes qu'il nous faut résoudre pour parvenir à un développement durable pour tous à l'échelle nationale et mondiale. Ce rapport revêt une extrême importance pour notre siècle.»

– Thomas B. Johansson, Université de Lund (Suède) et Global Energy Assessment, IIASA

«Le GIEC nous présente une évaluation – solidement documentée et soigneusement présentée – des coûts, risques et opportunités afférents aux sources d'énergie renouvelable. Il fait le point, avec une grande rigueur, sur l'état des connaissances concernant une des solutions les plus prometteuses qui s'offrent à nous de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'atténuer le changement climatique.»

– Nicholas Stern, professeur d'économie et de gestion publique,
London School of Economics and Political Science

«L'énergie renouvelable peut être le moteur du développement durable. Le rapport spécial du GIEC vient à point nommé et fournit des points de repère et des orientations qui devraient permettre à nos industries de s'engager résolument sur la voie du changement.»

– Klaus Töpfer, Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), Potsdam

«Les voies qui mènent à une économie sobre en carbone sont peut-être multiples, mais aucune n'a été aussi complètement et systématiquement explorée que celle des énergies renouvelables, dont la contribution multiforme à la réalisation de cet objectif est détaillée dans le rapport spécial du GIEC.»

– John P. Weyant, Université Stanford

Le changement climatique est l'un des grands problèmes du XXIe siècle. Ses conséquences les plus graves peuvent encore être évitées si des efforts sont faits pour transformer les systèmes actuels de production d'énergie. Les sources d'énergie renouvelable ouvrent de larges perspectives s'agissant de réduire la nécessité de recourir aux combustibles fossiles et, par conséquent, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et d'atténuer le changement climatique. Exploitées dans de bonnes conditions, elles peuvent favoriser le développement socioéconomique, l'accès à l'énergie, la sécurité et la pérennité des approvisionnements énergétiques et la réduction de leurs incidences négatives sur l'environnement et la santé humaine.

Le *Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation du changement climatique*, qui s'adresse aux responsables politiques, au secteur privé, aux chercheurs universitaires et à la société civile, analyse de manière impartiale la littérature scientifique consacrée au rôle que pourraient jouer les énergies renouvelables dans la lutte contre le changement climatique. Il porte sur six sources d'énergie renouvelable – la bioénergie, l'énergie solaire directe, l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique, l'énergie marine et l'énergie éolienne – et sur leur intégration dans les systèmes énergétiques actuels et à venir. Il prend en considération les conséquences, pour l'environnement et la société, de la mise en valeur de ces formes d'énergie et expose des stratégies visant à surmonter les obstacles, techniques et autres, à l'application et à la diffusion des technologies correspondantes. Les auteurs comparent également le coût moyen actualisé de l'énergie renouvelable aux coûts des énergies non renouvelables tels qu'ils ont été calculés récemment.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est l'organisme international chef de file pour l'évaluation des changements climatiques. Il a été créé par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et l'Organisation météorologique mondiale (OMM) avec pour mission de présenter clairement et de manière scientifique l'état actuel des connaissances concernant le changement climatique et son impact environnemental et socio-économique potentiel.

La version intégrale du rapport spécial est publiée par Cambridge University Press (www.cambridge.org) et l'on peut accéder à la version électronique via le site Web du Secrétariat du GIEC (www.ipcc.ch) ou en se procurant un CD-ROM auprès dudit secrétariat. La présente brochure contient le *Résumé à l'intention des décideurs* et le *Résumé technique* du rapport.

GESTION DES RISQUES DE CATASTROPHES ET DE PHÉNOMÈNES EXTRÊMES POUR LES BESOINS DE L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

RÉSUMÉ À L'INTENTION DES DÉCIDEURS



RAPPORT SPÉCIAL DU GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

giec

OMM PNUE

Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique

Résumé à l'intention des décideurs

Rapport des Groupes de travail I et II du GIEC

Publié sous la direction de

Christopher B. Field
Coprésident
Groupe de travail II
Institut Carnegie pour la science

Vicente Barros
Coprésident
Groupe de travail II
CIMA
Université de Buenos Aires

Thomas F. Stocker
Coprésident
Groupe de travail I
Université de Bern

Qin Dahe
Coprésident
Groupe de travail I
Administration météorologique chinoise

David Jon Dokken

Kristie L. Ebi

Michael D. Mastrandrea

Katharine J. Mach

Gian-Kasper Plattner

Simon K. Allen

Melinda Tignor

Pauline M. Midgley

Publié pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

© 2012, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ISBN 978-92-9169-233-0
En couverture: Une rizière en proie à la sécheresse, labeur aratoire en périphérie de Chongqing, Chine *(photo prise le 24 mars 2009)*
© Reuters

Avant-propos

Le Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique (SREX) est le fruit d'une coordination entre les Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Il met l'accent sur les liens entre l'évolution du climat et les phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, sur les répercussions de ces phénomènes et sur les stratégies visant à gérer les risques qui en découlent.

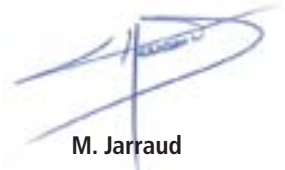
Le GIEC a été créé conjointement, en 1988, par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), dans le but particulier d'établir régulièrement une évaluation complète, objective et transparente de l'ensemble de l'information scientifique, technique et socio-économique permettant de comprendre les éléments scientifiques du risque de changements climatiques induits par l'activité humaine, les incidences potentielles de ces changements et les stratégies d'adaptation et d'atténuation possibles. Depuis 1990, le GIEC a produit une série de rapports d'évaluation, rapports spéciaux, documents techniques, méthodologies et autres documents clés qui sont devenus autant d'ouvrages de référence faisant autorité auprès des décideurs et des scientifiques.

Le présent Rapport spécial contribue en particulier à formuler, dans le cas des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, le problème qui consiste à prendre des décisions face à l'incertitude, en analysant les solutions que propose le domaine de la gestion des risques. Il est constitué de neuf chapitres dans lesquels sont abordés les sujets suivants: la gestion du risque; l'évolution observée et attendue des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes; l'exposition et la vulnérabilité aux phénomènes en question ainsi que les pertes qui en découlent; les solutions d'adaptation à tous les niveaux, de l'échelon local à l'échelon international; le rôle du développement durable dans la modulation des risques; et l'éclairage que fournissent des études de cas précis.

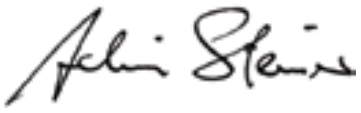
Si l'élaboration de ce Rapport spécial a pu être menée à bonne fin, c'est tout d'abord grâce au savoir, à l'intégrité, à l'enthousiasme et à la coopération de centaines de spécialistes œuvrant dans une très large palette de disciplines partout dans le monde. Aussi tenons-nous à exprimer nos remerciements à l'ensemble des auteurs coordonnateurs principaux, des auteurs principaux, des auteurs collaborateurs, des éditeurs réviseurs et experts, et des réviseurs désignés par les gouvernements, qui ont consacré, outre leur compétence, beaucoup de temps et d'énergie à la production du Rapport spécial et dont l'attachement à l'action du GIEC mérite toute notre gratitude. Nous voudrions remercier aussi le personnel des Unités d'appui technique des Groupes de travail I et II et celui du Secrétariat du GIEC d'avoir contribué sans réserve à l'élaboration d'un rapport spécial d'une portée majeure et ambitieuse.

Nous sommes également très reconnaissants aux gouvernements d'avoir encouragé la participation de leurs propres scientifiques à cette entreprise, sans oublier tous ceux qui ont alimenté le fonds d'affectation spéciale du GIEC afin d'assurer celle, tout à fait essentielle, d'experts de pays en développement. Nous voudrions en outre témoigner notre satisfaction notamment aux Gouvernements australien, panaméen, suisse et vietnamien qui ont accueilli les différentes sessions de rédaction dans leurs pays respectifs, et plus particulièrement au Gouvernement ougandais qui a accueilli à Kampala la première session commune des Groupes de travail I et II, au cours de laquelle le Rapport spécial a été approuvé. Nous nous devons de plus de remercier les Gouvernements suisse et américain d'avoir financé les services d'appui technique respectivement des Groupes de travail I et II. Nous tenons aussi à souligner la collaboration du Gouvernement norvégien, pour son appui précieux aux activités ayant trait aux réunions et à la sensibilisation, et celle de la Stratégie internationale de prévention des catastrophes (SIPC) des Nations Unies à la préparation de la première ébauche du Rapport spécial.

Enfin, nous souhaitons remercier tout spécialement le Président du GIEC, M. Rajendra Pachauri, pour sa conduite du processus du GIEC, et les Coprésidents, MM. Vicente Barros, Christopher Field, Qin Dahe et Thomas Stocker, pour la compétence avec laquelle ils ont dirigé les activités des Groupes de travail II et I tout au long de l'élaboration du Rapport spécial.



M. Jarraud
Secrétaire général
Organisation météorologique mondiale



A. Steiner
Directeur exécutif
Programme des Nations Unies pour l'environnement

Préface

Le présent ouvrage, consacré à la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique, est un rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Il est le fruit d'une collaboration entre le Groupe de travail I et le Groupe de travail II. L'équipe qui a dirigé son élaboration se charge également du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC qui doit paraître en 2013 et 2014.

Le Rapport spécial réunit les milieux scientifiques qui étudient trois aspects très différents de la gestion des risques de phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes. Les spécialistes des catastrophes (relèvement, gestion des risques, atténuation des dangers), jusqu'ici peu associés aux travaux du GIEC, se sont joints aux experts des éléments scientifiques de l'évolution du climat (Groupe de travail I) et à ceux des incidences des changements climatiques et de l'adaptation et de la vulnérabilité à ces changements (Groupe de travail II). Pendant plus de deux années, les membres de ces champs de recherche ont fait converger leurs buts et analyses lors de l'évaluation de l'information et la préparation du Rapport.

Les phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes ont occupé une grande place dans les évaluations antérieures du GIEC. Ils sont susceptibles de déclencher des catastrophes, mais le danger n'est pas uniquement fonction du phénomène en soi. Les risques de catastrophes découlent d'interactions entre les phénomènes météorologiques et climatiques, d'une part, et l'exposition et la vulnérabilité aux dangers, d'autre part; ils résultent donc de paramètres physiques et humains. Cette combinaison de facteurs, la rareté des phénomènes et leurs graves conséquences rendent l'analyse difficile. La compréhension des phénomènes, de leurs impacts et des stratégies possibles a atteint, ces dernières années seulement, un degré de maturité suffisant pour se prêter à une évaluation détaillée. Le Rapport renferme une analyse rigoureuse des textes scientifiques, techniques et socio-économiques publiés jusqu'en mai 2011.

Le Rapport spécial se distingue des travaux antérieurs du GIEC à plusieurs égards. Tout d'abord, il réunit dans un même document les connaissances et perspectives des champs d'étude du Groupe de travail I, du Groupe de travail II et des spécialistes de la gestion des risques de catastrophes. Deuxièmement, l'accent est mis sur l'adaptation et sur la gestion des risques de catastrophes. Enfin, un plan a été élaboré pour assurer une large communication. Ces innovations importantes, comme tous les aspects du Rapport, traduisent une ferme résolution: évaluer les connaissances scientifiques d'une manière utile pour la prise de décision, sans dicter l'action à engager.

La démarche

Le Rapport spécial a vu le jour grâce aux efforts concertés de centaines d'éminents experts. En septembre 2008, le Gouvernement de la Norvège et le Secrétariat de la Stratégie internationale de prévention des catastrophes ont présenté au GIEC une proposition visant la rédaction d'un rapport sur le sujet. Les grandes lignes du document ont été élaborées en mars 2009, lors d'une réunion exploratoire, et approuvées le mois suivant. Les gouvernements et les organisations ayant le statut d'observateurs ont ensuite désigné les experts qui seraient membres du comité de rédaction. L'équipe agréée par les Bureaux des Groupes de travail I et II se composait de 87 auteurs coordonnateurs principaux et auteurs principaux, épaulés par 19 éditeurs réviseurs. En outre, 140 auteurs collaborateurs ont soumis des textes et informations à l'attention des auteurs principaux. Le projet de rapport a été révisé en bonne et due forme à deux reprises, une première fois par les experts et une deuxième fois par les experts et les gouvernements. Les comités de rédaction ont analysé chacune des 18 784 observations formulées; lorsque les connaissances scientifiques le justifiaient, ils ont modifié le texte en conséquence sous la supervision des éditeurs réviseurs. La version modifiée du Rapport a été présentée pour examen à la première session conjointe des Groupes de travail I et II, qui s'est tenue du 14 au 17 novembre 2011. Les délégués d'une centaine de pays y ont approuvé à l'unanimité le Résumé à l'intention des décideurs, à l'issue d'un examen minutieux, et ont accepté le Rapport dans son intégralité.

Structure du Rapport spécial

Le Résumé à l'intention des décideurs et neuf chapitres composent l'ouvrage. Les principaux résultats exposés dans le Résumé sont accompagnés de renvois aux sections correspondantes des parties techniques, à toutes fins utiles. Les deux premiers chapitres délimitent le cadre du Rapport. Le premier aborde la question des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes sous l'angle de la compréhension et de la gestion des risques. Il montre que les risques

naissent de la conjonction d'un phénomène physique déclencheur et d'une situation de vulnérabilité et d'exposition des personnes et des biens. Le chapitre suivant analyse en détail les facteurs qui déterminent l'exposition et la vulnérabilité et conclut que toute catastrophe présente des dimensions à la fois sociales et physiques. La principale contribution du Groupe de travail I se trouve dans le chapitre 3, qui évalue les textes scientifiques traitant de l'évolution observée et prévue des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, et de l'attribution de ces variations à diverses causes, le cas échéant. Les incidences observées et prévues, par secteur et par région, font l'objet du chapitre suivant. Les chapitres 5 à 7 se penchent sur les modèles théoriques et les expériences pratiques en matière d'adaptation aux phénomènes extrêmes et aux catastrophes, en particulier sur les questions et possibilités d'intérêt local (chapitre 5), national (chapitre 6) et international (chapitre 7). On trouvera dans le chapitre 8 une évaluation des interactions entre le développement durable, l'atténuation de la vulnérabilité et les risques de catastrophes, du point de vue des conditions tant favorables que défavorables, et un examen des transformations de nature à lever les obstacles. Enfin, le rapport se clôt par une série d'études de cas qui montrent la complexité à l'œuvre dans les situations concrètes, mais aussi les grands progrès accomplis dans le domaine de la gestion des risques.

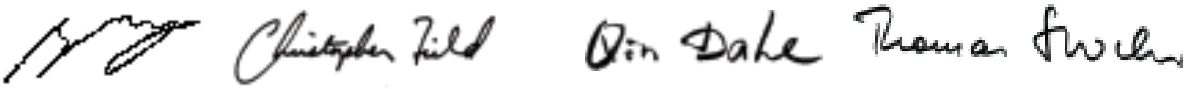
Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous les auteurs coordonnateurs principaux, auteurs principaux, auteurs collaborateurs, éditeurs réviseurs, experts et réviseurs désignés par les gouvernements. La parution d'un rapport d'une aussi haute tenue aurait été impossible s'ils n'avaient pas mis leur compétence, leur sens de l'engagement et leur intégrité au service de cette entreprise et s'ils ne lui avaient pas consacré autant de temps. Nous remercions également les membres des Bureaux des Groupes de travail I et II pour l'assistance qu'ils ont prodiguée et pour la perspicacité et le sens pratique dont ils ont fait preuve tout au long de la préparation du Rapport.

Nous sommes particulièrement reconnaissants au personnel hors pair des Unités d'appui technique des Groupes de travail I et II pour leur professionnalisme, leur esprit novateur et leur ardeur au travail. Merci à Gian-Kasper Plattner, Simon Allen, Pauline Midgley, Melinda Tignor, Vincent Bex, Judith Boschung et Alexander Nauels du Groupe de travail I. Merci aussi à Dave Dokken, Kristie Ebi, Michael Mastrandrea, Katharine Mach, Sandy MacCracken, Rob Genova, Yuka Estrada, Eric Kissel, Patricia Mastrandrea, Monalisa Chatterjee et Kyle Terran du Groupe de travail II, qui a assuré la logistique et la coordination d'ensemble. Les efforts qu'ils ont déployés sans relâche pour organiser avec talent la préparation du Rapport spécial ont permis de produire un document de grande qualité scientifique tout en maintenant un climat de collégialité et de respect.

Nous souhaitons également rendre hommage au personnel du Secrétariat du GIEC, Renate Christ, Gaetano Leone, Mary Jean Burer, Sophie Schlingemann, Judith Ewa, Jesbin Baidya, Joelle Fernandez, Annie Courtin, Laura Biagioni et Amy Smith Aasdam. Nous remercions aussi Francis Hayes de l'OMM, Tim Nuthall de la Fondation européenne pour le climat et Nick Nutall du PNUE.

Nos sincères remerciements vont aux hôtes et organisateurs de la réunion exploratoire, des quatre réunions des auteurs principaux et de la session d'approbation. Nous sommes sensibles à l'appui fourni par les pays hôtes, la Norvège, le Panama, le Viet Nam, la Suisse, l'Australie et l'Ouganda. Nous saluons tout spécialement le Gouvernement de la Norvège du soutien indéfectible qu'il a procuré tout au long de l'entreprise.



Vicente Barros et Christopher B. Field
Coprésidents du Groupe de travail II du GIEC

Qin Dahe et Thomas F. Stocker
Coprésidents du Groupe de travail I du GIEC

Table des matières

Avant-propos iii

Préface v

Résumé à l'intention des décideurs 1

A. Contexte 2

B. Données d'observation concernant l'exposition, la vulnérabilité, les extrêmes climatiques, les impacts et les pertes occasionnées par les catastrophes 6

C. Gestion des risques de catastrophes et adaptation au changement climatique: les extrêmes climatiques dans le passé 8

D. Projections concernant les extrêmes climatiques, les impacts et les pertes occasionnées par les catastrophes 10

E. Gérer les nouveaux risques d'extrêmes climatiques et de catastrophes 15

SPM

Résumé à l'intention des décideurs

Rédaction:
Simon K. Allen (Suisse), Vicente Barros (Argentine), Ian Burton (Canada), Diarmid Campbell-Lendrum (Royaume-Uni), Omar-Dario Cardona (Colombie), Susan L. Cutter (États-Unis d'Amérique), O. Pauline Dube (Botswana), Kristie L. Ebi (États-Unis d'Amérique), Christopher B. Field (États-Unis d'Amérique), John W. Handmer (Australie), Padma N. Lal (Australie), Allan Lavell (Costa Rica), Katharine J. Mach (États-Unis d'Amérique), Michael D. Mastrandrea (États-Unis d'Amérique), Gordon A. McBean (Canada), Reinhard Mechler (Allemagne), Tom Mitchell (Royaume-Uni), Neville Nicholls (Australie), Karen L. O'Brien (Norvège), Taikan Oki (Japon), Michael Oppenheimer (États-Unis d'Amérique), Mark Pelling (Royaume-Uni), Gian-Kasper Plattner (Suisse), Roger S. Pulwarty (États-Unis d'Amérique), Sonia I. Seneviratne (Suisse), Thomas F. Stocker (Suisse), Maarten K. van Aalst (Pays-Bas), Carolina S. Vera (Argentine), Thomas J. Wilbanks (États-Unis d'Amérique)

Résumé à référencer comme suit:

GIEC, 2012: Résumé à l'intention des décideurs. In: *Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique* [sous la direction de Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor et P.M. Midgley]. Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique, pp. 1 à 20.

A. Contexte

Le Résumé à l'intention des décideurs reprend les principales conclusions du Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique (SREX). Les auteurs du Rapport ont évalué les textes scientifiques traitant d'un éventail de questions, des liens entre l'évolution du climat et les phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes (les «extrêmes climatiques») aux répercussions de ces phénomènes sur la société et le développement durable. L'analyse a porté sur les interactions des facteurs climatiques, environnementaux et humains qui peuvent occasionner des dommages et des catastrophes, sur les possibilités de gérer les risques associés à de tels dommages et catastrophes et sur le rôle majeur que les facteurs indépendants du climat jouent dans l'ampleur des impacts. Les notions essentielles dont il est question dans le Rapport SREX sont définies dans l'encadré SPM.1.

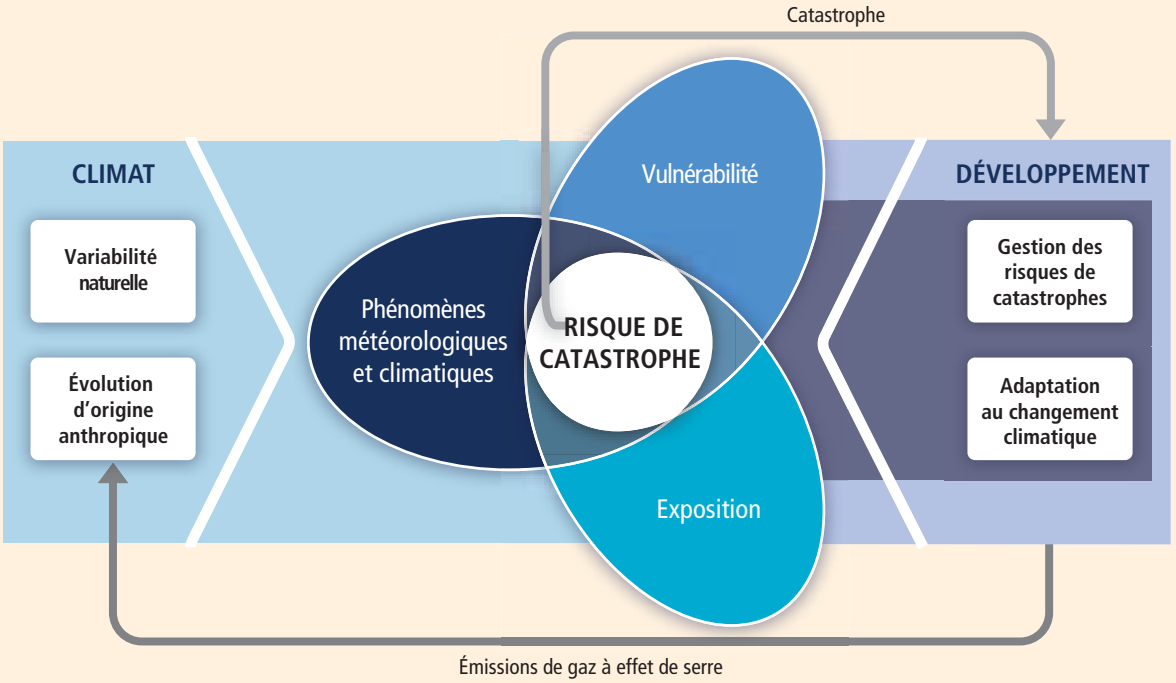


Figure SPM.1 | Notions essentielles dont il est question dans le Rapport SREX. Le Rapport analyse comment l'exposition et la vulnérabilité aux phénomènes météorologiques et climatiques déterminent les conséquences et la probabilité d'une catastrophe (le risque de catastrophe). Il évalue l'incidence de la variabilité naturelle et de l'évolution anthropique du climat sur les extrêmes et autres phénomènes météorologiques et climatiques susceptibles de contribuer aux catastrophes, ainsi que l'exposition et la vulnérabilité des sociétés humaines et des écosystèmes naturels. Il analyse également les effets du développement sur l'évolution de l'exposition et de la vulnérabilité, ses conséquences sur les risques de catastrophes et les interactions entre catastrophes et développement. Le Rapport examine comment la gestion des risques de catastrophes et l'adaptation au changement climatique peuvent atténuer l'exposition et la vulnérabilité aux phénomènes météorologiques et climatiques, et donc réduire la probabilité d'une catastrophe, tout en renforçant la résilience aux risques qu'il est impossible d'éliminer. D'autres processus importants n'entraient pas dans le cadre du Rapport, par exemple les répercussions du développement sur les émissions de gaz à effet de serre et sur l'évolution anthropique du climat, ou les possibilités d'atténuer le changement climatique imputable aux activités humaines. [1.1.2, Figure 1-1]

La nature et la gravité des impacts d'un extrême climatique dépendent du phénomène lui-même, mais aussi de l'exposition et de la vulnérabilité face au danger. Dans le Rapport, on parle de catastrophe lorsque les impacts indésirables produisent des dommages de grande ampleur et perturbent gravement le fonctionnement normal d'une population ou d'une société. Les extrêmes climatiques, l'exposition et la vulnérabilité sont fonction d'une large palette de facteurs, dont le changement climatique d'origine anthropique, la variabilité naturelle du climat et le développement socio-économique (figure SPM.1). Par la gestion des risques de catastrophes et l'adaptation à l'évolution du climat, on vise à réduire l'exposition et la vulnérabilité tout en augmentant la résilience à l'égard des répercussions que pourraient avoir

les extrêmes climatiques, sachant qu'il est impossible d'éliminer tout risque (figure SPM.2). L'atténuation du changement climatique n'est pas le thème central du Rapport; toutefois, les mesures d'adaptation et d'atténuation peuvent se compléter et réduire sensiblement les risques encourus. [SYR AR4, 5.3]

Le Rapport assimile les perspectives de plusieurs branches de la recherche, historiquement distinctes, qui étudient les aspects scientifiques du climat, ses incidences, l'adaptation à son évolution et la gestion des risques de catastrophes. Ces milieux scientifiques, dont les points de vue, le vocabulaire , les méthodes de travail et les objectifs diffèrent, apportent tous des contributions importantes à la description de l'état actuel des connaissances et des lacunes qu'elles comportent. Nombre de résultats fondamentaux de l'évaluation se situent à la jonction de ces domaines divers, comme le montre le tableau SPM.1. Les auteurs ont employé la terminologie type présentée dans l'encadré SPM.2 en vue d'exprimer sans équivoque la confiance attachée aux conclusions du Rapport. Les informations sur lesquelles s'appuient les principaux paragraphes du Résumé à l'intention des décideurs se trouvent dans les sections indiquées entre crochets.

Stratégies d'adaptation et de gestion des risques de catastrophes face au changement climatique

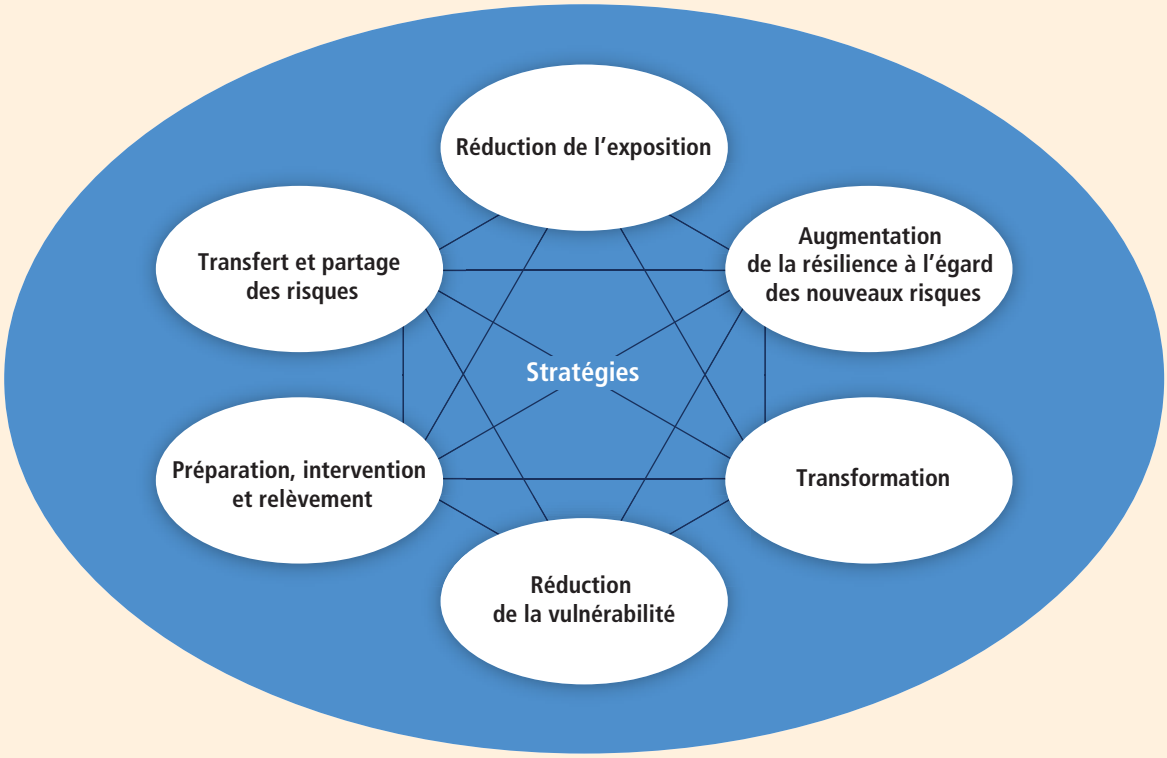


Figure SPM.2 | Stratégies d'adaptation et de gestion des risques de catastrophes visant à réduire et à maîtriser les risques dans un climat en évolution. Le Rapport évalue une grande variété d'approches complémentaires susceptibles d'atténuer les risques d'extrêmes climatiques et de catastrophes et de renforcer la résilience aux risques qui persistent et évoluent au fil du temps. Ces stratégies peuvent se chevaucher et être mises en œuvre simultanément. [6.5, Figure 6-3, 8.6]

Encadré SPM.1 | Notions essentielles

Les notions ci après, définies dans le glossaire SREX[1], sont employées tout au long du Rapport.

Changement climatique: Variation de l'état du climat, que l'on peut caractériser (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels, à des forçages externes ou à des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres.[2]

Extrême climatique (phénomène météorologique ou climatique extrême): Fait qu'une variable météorologique ou climatique prend une valeur située au-dessus (ou au-dessous) d'un seuil proche de la limite supérieure (ou inférieure) de la plage des valeurs observées pour cette variable. Par souci de simplicité, cette expression est utilisée pour désigner les phénomènes extrêmes à la fois météorologiques et climatiques. La définition complète est donnée à la section 3.1.2.

Exposition: Présence de personnes, de moyens de subsistance, de ressources et de services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu susceptible de subir des dommages.

Vulnérabilité: Propension ou prédisposition à subir des dommages.

Catastrophe: Grave perturbation du fonctionnement normal d'une population ou d'une société due à l'interaction de phénomènes physiques dangereux avec des conditions de vulnérabilité sociale, qui provoque sur le plan humain, matériel, économique ou environnemental de vastes effets indésirables nécessitant la prise immédiate de mesures pour répondre aux besoins humains essentiels et exigeant parfois une assistance extérieure pour le relèvement.

Risque de catastrophe: Probabilité que surviennent, au cours d'une période donnée, de graves perturbations du fonctionnement normal d'une population ou d'une société dues à l'interaction de phénomènes physiques dangereux avec des conditions de vulnérabilité sociale, qui provoque sur le plan humain, matériel, économique ou environnemental de vastes effets indésirables nécessitant la prise immédiate de mesures pour répondre aux besoins humains essentiels et exigeant parfois une assistance extérieure pour le relèvement.

Gestion des risques de catastrophes: Action d'élaborer, de mettre en œuvre et d'évaluer des stratégies, politiques et mesures destinées à mieux comprendre les risques de catastrophes, à favoriser la réduction et le transfert de ces risques et à promouvoir l'amélioration constante de la préparation à une catastrophe, des réponses à y apporter et du rétablissement postérieur, dans le but explicite de renforcer la protection des personnes, leur bien-être, la qualité de vie, la résilience et le développement durable.

Adaptation: Pour les systèmes humains, démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences, de manière à en atténuer les effets préjudiciables et à en exploiter les effets bénéfiques. Pour les systèmes naturels, démarche d'ajustement au climat actuel ainsi qu'à ses conséquences; l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu.

Résilience: Capacité que présentent un système et ses éléments constitutifs d'anticiper, d'absorber, ou de supporter les effets d'un phénomène dangereux, ou de s'en relever, avec rapidité et efficacité, y compris par la protection, la remise en état et l'amélioration de ses structures et fonctions de base.

Transformation: Modification des attributs fondamentaux d'un système (y compris les systèmes de valeurs, les cadres réglementaires, législatifs ou administratifs, les institutions financières et les systèmes technologiques et biologiques).

---

[1] Plusieurs définitions diffèrent, par leur portée ou leur orientation, de celles adoptées pour le quatrième Rapport d'évaluation et d'autres rapports du GIEC, en raison de la diversité des milieux qui ont contribué au présent Rapport et des progrès qui ont été accomplis par la science.

[2] Cette définition est différente de celle utilisée par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques qui définit les changements climatiques comme des «changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables». La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines qui altèrent la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat qui est due à des causes naturelles.

L'exposition et la vulnérabilité sont des déterminants clés du risque de catastrophe et des impacts lorsque le risque se matérialise. [1.1.2, 1.2.3, 1.3, 2.2.1, 2.3, 2.5] Par exemple, un cyclone tropical a des conséquences très différentes selon l'endroit et le moment où il atteint les côtes. [2.5.1, 3.1, 4.4.6] De même, une vague de chaleur a une incidence très variable sur les populations selon leur degré de vulnérabilité. [Encadré 4-4, 9.2.1] Un phénomène météorologique ou climatique extrême peut avoir de lourdes répercussions sur les systèmes humains, écologiques ou physiques. Des phénomènes de moindre ampleur peuvent aussi avoir des conséquences catastrophiques si l'exposition et la vulnérabilité sont élevées [2.2.1, 2.3, 2.5] ou si les événements ou leurs effets s'ajoutent les uns aux autres. [1.1.2, 1.2.3, 3.1.3] Ainsi, une chaleur extrême et une faible humidité pendant une période de sécheresse augmentent les risques d'incendies incontrôlés. [Encadré 4-1, 9.2.2]

Les phénomènes météorologiques et climatiques, extrêmes ou non, conditionnent la vulnérabilité à l'égard des phénomènes extrêmes futurs en modifiant la résilience, la capacité de résister et les moyens de s'adapter. [2.4.3] Les effets cumulés des catastrophes, notamment à l'échelon local et infranational, peuvent amputer considérablement les moyens de subsistance, les ressources disponibles et la capacité qu'ont les sociétés et les populations de se préparer et de réagir aux catastrophes à venir. [2.2, 2.7]

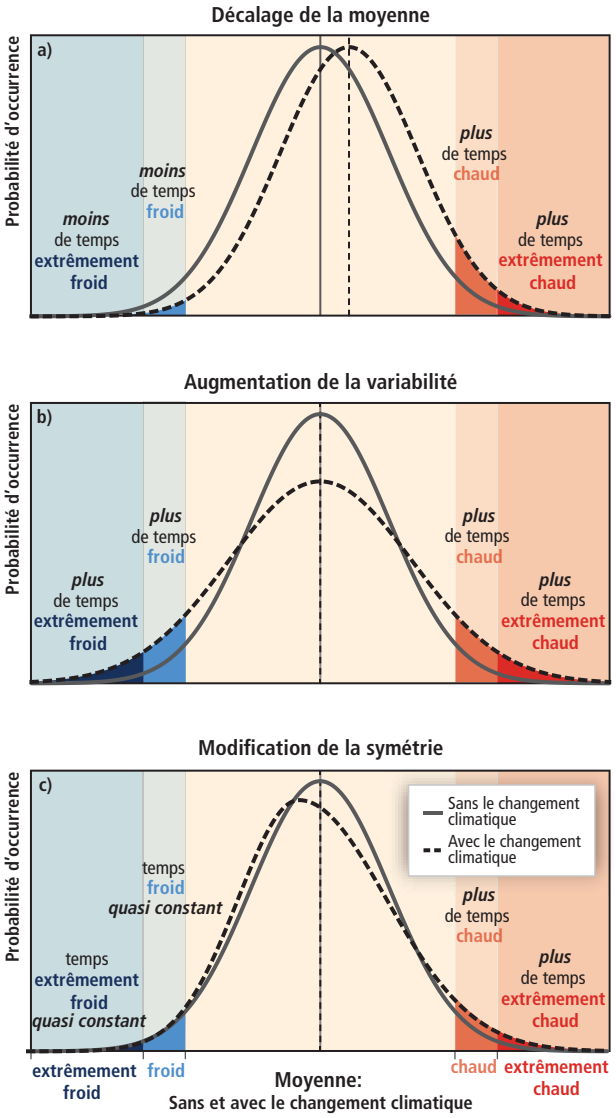


Figure SPM.3 | Effet sur les valeurs extrêmes de l'évolution de la distribution des températures. Diverses modifications de la distribution des températures, entre le climat actuel et futur, et leur incidence sur les valeurs extrêmes de la distribution: a) Effet d'un simple décalage de l'ensemble de la distribution vers des valeurs plus élevées; b) Effet d'une augmentation de la variabilité des températures, sans décalage de la moyenne; c) Effet d'une modification de la forme de la distribution, en l'occurrence d'un changement de symétrie vers les valeurs plus élevées. [Figure 1-2, 1.2.2]

L'évolution du climat modifie la fréquence, l'intensité, l'étendue, la durée et le moment d'apparition des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, et peut porter ces phénomènes à des niveaux sans précédent. La modification des extrêmes peut être liée à un changement de la moyenne, la variance ou la forme de la distribution de probabilité, ou encore de ces trois paramètres à la fois (figure SPM.3). Il arrive que certains extrêmes climatiques (la sécheresse, par exemple) découlent d'une succession de phénomènes météorologiques ou climatiques qui, considérés individuellement, n'ont pas un caractère extrême. Un grand nombre de phénomènes météorologiques ou climatiques extrêmes restent le fait de la variabilité naturelle du climat, qui continuera à influencer les extrêmes futurs, outre l'effet du changement climatique d'origine anthropique. [3.1]

B. Données d'observation concernant l'exposition, la vulnérabilité, les extrêmes climatiques, les impacts et les pertes occasionnées par les catastrophes

Les conséquences des extrêmes climatiques et la possibilité de catastrophe dépendent des extrêmes eux-mêmes et de l'exposition et la vulnérabilité des systèmes humains et naturels. Les variations observées dans les extrêmes climatiques traduisent l'incidence du changement climatique d'origine anthropique et de la variabilité naturelle du climat; l'évolution de l'exposition et de la vulnérabilité s'explique par des facteurs climatiques et non climatiques.

Exposition et vulnérabilité

L'exposition et la vulnérabilité fluctuent dans le temps et dans l'espace en fonction de paramètres économiques, sociaux, géographiques, démographiques, culturels, institutionnels, politiques et environnementaux *(degré de confiance élevé)*. [2.2, 2.3, 2.5] Les personnes et les populations sont plus ou moins exposées et vulnérables selon les inégalités exprimées par le niveau de richesse et d'instruction, les handicaps éventuels ou l'état de santé, ainsi que selon le sexe, l'âge, la classe et d'autres particularités sociales et culturelles. [2.5]

Le type d'habitat, l'urbanisation et l'évolution des conditions socio-économiques ont contribué aux tendances observées de l'exposition et de la vulnérabilité aux extrêmes climatiques *(degré de confiance élevé)*. [4.2, 4.3.5] Par exemple, les établissements humains implantés sur le littoral, y compris dans les petites îles et les grands deltas, ou dans les montagnes sont exposés et vulnérables face aux extrêmes climatiques, dans les nations développées comme dans le monde en développement, bien qu'à des degrés divers d'une région et d'un pays à l'autre. [4.3.5, 4.4.3, 4.4.6, 4.4.9, 4.4.10] L'urbanisation rapide et l'expansion des mégapoles, dans les pays en développement notamment, ont créé des groupes extrêmement vulnérables, en particulier par suite d'un habitat non structuré et d'une gestion des terres inadéquate *(large concordance, degré d'évidence élevé).* [5.5.1] Voir également les études de cas 9.2.8 et 9.2.9. Parmi les populations vulnérables figurent aussi les réfugiés, les personnes déplacées à l'intérieur de leur propre pays et les habitants de zones marginales. [4.2, 4.3.5]

Extrêmes climatiques et impacts

Les observations effectuées depuis 1950 indiquent que certaines valeurs extrêmes changent. Le degré de confiance attaché à ces changements dépend de la qualité et de la quantité des données disponibles et de l'existence d'analyses de ces données, qui varient selon la région et l'extrême en cause. Le fait d'attribuer un «faible degré de confiance» aux changements observés d'une variable particulière, à l'échelle régionale ou mondiale, n'implique ni n'exclut la possibilité d'une évolution de cette variable. Les phénomènes extrêmes étant rares par définition, on dispose de données limitées pour apprécier leur variation en fréquence ou en intensité. Plus un phénomène est rare, plus il est difficile d'en déceler les changements à long terme. Les tendances dans l'évolution d'un extrême climatique donné à l'échelle du globe peuvent être plus fiables (températures extrêmes, par exemple) ou moins fiables (sécheresse, etc.) que les tendances régionales, selon l'uniformité géographique de l'évolution de cette valeur. Les paragraphes qui suivent traitent plus en détail de différents extrêmes climatiques, à partir des observations effectuées depuis 1950. [3.1.5, 3.1.6, 3.2.1]

Il est *très probable* que le nombre de journées et de nuits froides[3] a globalement diminué et que le nombre de journées et de nuits chaudes[3] a globalement augmenté à l'échelle de la planète, c'est-à-dire sur la plupart des terres émergées pour lesquelles on détient suffisamment de données. Il est *probable* que ces changements sont également survenus à l'échelle continentale en Amérique du Nord, en Europe et en Australie. La tendance à la hausse des températures quotidiennes extrêmes bénéficie d'un *degré de confiance moyen* pour une grande partie de l'Asie. En ce qui concerne l'Afrique et l'Amérique du Sud, le *degré de confiance est faible* à *moyen* suivant la région considérée. On estime avec un degré de confiance moyen que la durée ou le nombre de périodes chaudes, ou de vagues de chaleur[3], a progressé dans un grand nombre (mais pas la totalité) des régions du globe sur lesquelles on dispose de données suffisantes. [3.3.1, Tableau 3-2]

[3] Le glossaire SREX donne la définition des termes journée froide / nuit froide, journée chaude / nuit chaude, période chaude – vague de chaleur.

Des tendances statistiquement significatives quant au nombre d'épisodes de fortes précipitations existent dans certaines régions. Il est *probable* que davantage de régions ont connu des augmentations plutôt que des diminutions, bien que les tendances divergent fortement d'une région et d'une sous-région à l'autre. [3.3.2]

Un *faible degré de confiance* est accordé à toute augmentation observée à long terme (40 ans ou plus) de l'activité cyclonique dans les zones tropicales (intensité, fréquence, durée), si l'on prend en considération l'évolution des capacités d'observation. Il est *probable* que les principales trajectoires des tempêtes extratropicales se sont déplacées vers les pôles dans les deux hémisphères. Les tendances observées relativement aux phénomènes de faible étendue, telles les tornades et les tempêtes de grêle, bénéficient d'un *faible degré de confiance* en raison de l'hétérogénéité des données et des limites que présentent les systèmes de surveillance. [3.3.2, 3.3.3, 3.4.4, 3.4.5]

On estime avec un *degré de confiance moyen* que certaines régions ont subi des sécheresses plus intenses et plus longues, notamment en Europe méridionale et en Afrique de l'Ouest, tandis que le phénomène est devenu moins fréquent, moins intense ou plus court ailleurs, par exemple dans le centre de l'Amérique du Nord et dans le Nord-Ouest de l'Australie. [3.5.1]

L'évolution de l'ampleur et de la fréquence des crues imputable au climat bénéficie à l'échelon régional d'un *degré d'évidence faible* à *moyen*, parce que les relevés effectués aux stations de mesure du niveau sont limités dans le temps et dans l'espace, et parce qu'il est impossible de déterminer la contribution des changements survenus dans l'aménagement et l'utilisation des terres. En outre, la concordance est faible à ce propos et, par conséquent, on ne peut lui accorder qu'un *faible degré de confiance* à l'échelle du globe, même pour ce qui est du signe de tels changements. [3.5.2]

Il est *probable* que l'élévation du niveau moyen de la mer s'est accompagnée d'un accroissement des valeurs extrêmes atteintes par les hautes eaux côtières. [3.5.3]

On a des raisons de penser que certains extrêmes ont varié sous l'effet des activités humaines, notamment en raison de la hausse des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il est *probable* que les influences d'origine anthropique ont entraîné une élévation des températures minimales et maximales quotidiennes sur la planète. On estime avec un *degré de confiance moyen* qu'elles ont contribué à l'intensification des précipitations extrêmes à l'échelle du globe. Il est *probable* que les activités humaines ont favorisé l'accroissement des niveaux extrêmes des hautes eaux côtières dû à l'élévation du niveau moyen de la mer. L'attribution à une influence humaine de tout changement décelable dans l'activité des cyclones tropicaux ne bénéficie que d'un *faible degré de confiance*, pour diverses raisons: incertitudes qui entachent les relevés historiques, compréhension imparfaite des mécanismes physiques qui lient les paramètres des cyclones tropicaux au changement climatique et degré de variabilité de l'activité cyclonique. Il est délicat d'attribuer un phénomène extrême donné au changement climatique d'origine anthropique. [3.2.2, 3.3.1, 3.3.2, 3.4.4, 3.5.3, Table 3-1]

Pertes occasionnées par les catastrophes

Les dommages économiques provoqués par les catastrophes liées au temps et au climat se sont accrus, mais de façon très variable d'une zone et d'une année à l'autre *(degré de confiance élevé, reposant sur une large concordance et un degré d'évidence moyen)*. Les pertes imputables ces dernières décennies aux conditions météorologiques et climatiques se répartissent de manière inégale et correspondent essentiellement à la valeur des biens directement endommagés. Les dommages annuels estimés depuis 1980 vont de quelques milliards de dollars É. U. à plus de 200 milliards (en dollars de 2010), les dégâts les plus lourds ayant été déplorés en 2005, année de l'ouragan Katrina. Ces estimations se situent à la limite inférieure car il est difficile de chiffrer, d'assortir d'une valeur monétaire et, par conséquent, de prendre en compte de nombreux impacts, telle la perte de vies humaines, de patrimoine culturel ou de services procurés par les écosystèmes. Les répercussions sur l'économie parallèle ou souterraine et les effets économiques indirects sont considérables à certains endroits et dans certains secteurs, mais ils sont rarement inclus dans les estimations officielles. [4.5.1, 4.5.3, 4.5.4]

Les pertes économiques, assurées ou non, dues aux catastrophes d'origine météorologique, climatique et géophysique[4] sont plus vastes dans les pays développés. Les taux de mortalité et les pertes économiques en proportion du produit intérieur brut (PIB) sont plus élevés dans les pays en développement (*degré de confiance élevé*). Entre 1970 et 2008, au-delà de 95 % des décès provoqués par les catastrophes naturelles sont survenus dans le monde en développement. Ce sont les pays à revenu intermédiaire dont la base d'actifs s'étend rapidement qui ont payé le plus lourd tribut. Au cours de la période 2001-2006, les pays à revenu intermédiaire ont subi des pertes de l'ordre de 1 % de leur PIB, chiffre qui s'établissait à 0,3 % environ pour les pays à faible revenu et à moins de 0,1 % pour les pays à revenu élevé (*faible degré d'évidence*). Les petits pays exposés, en particulier les petits États insulaires en développement, ont éprouvé des pertes massives en proportion de leur PIB; la moyenne de la période 1970-2010, incluant les années où il n'y a pas eu de catastrophe, excédait souvent 1 % et atteignait 8 % dans les pires cas. [4.5.2, 4.5.4]

L'exposition accrue des personnes et des biens est la principale cause de la hausse durable des pertes économiques occasionnées par les catastrophes liées au temps et au climat *(degré de confiance élevé)*. Les tendances que présentent les pertes à long terme, compte dûment tenu de l'augmentation de la richesse et de l'accroissement de la population, n'ont pas été attribuées au changement climatique, sans qu'une contribution du climat ne soit pour autant exclue *(large concordance, degré d'évidence moyen)*. Ces conclusions sont affaiblies par les limites que présentent les études publiées à ce jour. Il n'est pas assez tenu compte de la vulnérabilité, qui est pourtant un facteur déterminant de l'ampleur des dommages. Les autres faiblesses concernent: i) les données disponibles, la plupart se bornant aux secteurs économiques classiques des pays développés, et ii) le type de dangers étudiés, généralement les cyclones, alors qu'on accorde un *faible degré de confiance* aux tendances que présente ce phénomène et à l'attribution de ces changements aux activités humaines. Deux autres aspects viennent restreindre la portée de la deuxième conclusion: iii) les méthodes employées pour corriger la valeur des pertes au fil du temps, et iv) la durée pendant laquelle les éléments ont été observés. [4.5.3]

C. Gestion des risques de catastrophes et adaptation au changement climatique: les extrêmes climatiques dans le passé

L'analyse des extrêmes climatiques qui sont survenus dans le passé aide à préciser les stratégies efficaces pour gérer les risques de catastrophes et s'adapter aux dangers.

La gravité des impacts dépend fortement du degré d'exposition et de vulnérabilité aux extrêmes climatiques *(degré de confiance élevé).* [2.1.1, 2.3, 2.5]

Les risques de catastrophes dépendent fortement de l'exposition et de la vulnérabilité *(degré de confiance élevé)*. [2.5] Il est indispensable de comprendre la nature pluridimensionnelle de l'exposition et de la vulnérabilité pour déterminer comment les phénomènes liés au temps et au climat concourent aux catastrophes et pour élaborer et mettre en œuvre des stratégies efficaces d'adaptation et de gestion des risques. [2.2, 2.6] La réduction de la vulnérabilité constitue un élément central commun à l'adaptation et à la gestion des risques de catastrophes. [2.2, 2.3]

Les pratiques et politiques de développement, et leurs résultats, façonnent dans une large mesure les risques de catastrophes et les augmentent en cas d'inadéquation *(degré de confiance élevé)*. [1.1.2, 1.1.3] Un niveau élevé d'exposition et de vulnérabilité découle souvent d'un développement inapproprié, par exemple de la détérioration de l'environnement, d'une urbanisation rapide et anarchique dans des zones dangereuses, de problèmes de gouvernance ou de moyens de subsistance insuffisants pour les populations démunies. [2.2.2, 2.5] Les interrelations grandissantes à l'échelle planétaire et l'interdépendance des systèmes économiques et écologiques peuvent avoir des effets contraires, c'est-à-dire atténuer ou aggraver la vulnérabilité et les risques de catastrophes. [7.2.1] Le meilleur moyen de gérer les risques de catastrophes à l'échelle d'un pays consiste à intégrer ces risques dans les plans sectoriels et les programmes de développement nationaux et à adopter des stratégies d'adaptation au changement climatique, en veillant à ce que ces plans, programmes et stratégies se traduisent par des mesures concrètes au profit des zones et groupes vulnérables. [6.2, 6.5.2]

[4] Les pertes économiques et humaines présentées dans ce paragraphe découlent toutes de catastrophes liées à un phénomène météorologique, climatique ou géophysique.

L'insuffisance de données sur les catastrophes et sur la réduction des risques de catastrophes à l'échelon local peut freiner l'atténuation de la vulnérabilité à ce niveau *(large concordance, degré d'évidence moyen)*. [5.7] Il est rare que les systèmes nationaux de gestion des risques de catastrophes et les mesures qui les accompagnent tiennent expressément compte des changements attendus dans l'exposition, la vulnérabilité et les extrêmes climatiques, et des incertitudes que présentent ces projections. [6.6.2, 6.6.4]

Les inégalités influent sur la capacité de résister et de s'adapter à l'échelon local et rendent difficiles la gestion des risques et l'adaptation, de l'échelon local à l'échelon national *(large concordance, degré d'évidence élevé)*. Ces inégalités correspondent à des écarts sur le plan socio-économique, démographique et sanitaire, ainsi qu'à des différences en matière de gouvernance, de moyens de subsistance, de droits et d'autres facteurs. [5.5.1, 6.2] Elles existent aussi entre pays: les pays développés détiennent en général des moyens financiers et institutionnels plus larges que les pays en développement; ils peuvent donc prendre des mesures spécifiques pour faire face et s'adapter avec efficacité aux changements prévus dans l'exposition, la vulnérabilité et les extrêmes climatiques. Tous les pays ont néanmoins de la difficulté à évaluer ces changements, à les comprendre et à y réagir. [6.3.2, 6.6]

Une aide humanitaire est souvent nécessaire lorsqu'aucune mesure de réduction des risques de catastrophes n'a été adoptée ou lorsque les dispositions prises sont inadéquates *(large concordance, degré d'évidence élevé)*. [5.2.1] Les petits États ou les États dont l'économie est peu diversifiée ont beaucoup de mal à procurer les services d'intérêt général associés à la gestion des risques de catastrophes, à éponger les pertes occasionnées par les extrêmes climatiques et à participer aux opérations de secours et de reconstruction. [6.4.3]

Le relèvement et la reconstruction après une catastrophe sont l'occasion de prendre des mesures propres à réduire les risques d'origine météorologique et climatique et de renforcer la capacité d'adaptation *(large concordance, degré d'évidence élevé)*. La priorité donnée à la reconstruction rapide des maisons et des infrastructures et à la réhabilitation des moyens de subsistance conduit souvent à recréer, voire à accentuer, les vulnérabilités déjà présentes et empêche d'infléchir les politiques et plans d'aménagement à long terme dans le sens d'un renforcement de la résilience et d'un développement durable. [5.2.3] Voir également l'analyse exposée dans les sections 8.4.1 et 8.5.2.

Les mécanismes de répartition et de transfert des risques à l'échelle locale, nationale, régionale et mondiale sont susceptibles d'accroître la résilience à l'égard des extrêmes climatiques *(degré de confiance moyen).* Citons par exemple les mécanismes plus ou moins structurés de répartition des risques, la micro-assurance, l'assurance, la réassurance et la mise en commun des risques nationaux, régionaux et mondiaux. [5.6.3, 6.4.3, 6.5.3, 7.4] Ces dispositions sont propices à la réduction des risques de catastrophes et à l'adaptation au changement climatique parce qu'elles donnent les moyens de financer l'assistance, la reconstitution des moyens de subsistance et la reconstruction, atténuent la vulnérabilité, permettent de savoir comment réduire les risques et incitent à œuvrer dans ce sens. [5.5.2, 6.2.2] Dans certaines situations toutefois, elles peuvent freiner la réduction des risques de catastrophes. [5.6.3, 6.5.3, 7.4.4] Le recours aux mécanismes structurés de répartition et de transfert des risques est plus ou moins important selon la région et le danger concernés. [6.5.3] Voir également l'étude de cas 9.2.13.

Il est très important de prêter attention à la dynamique temporelle et spatiale de l'exposition et de la vulnérabilité; en effet, les stratégies et politiques d'adaptation et de gestion des risques de catastrophes peuvent être efficaces à court terme, mais amplifier l'exposition et la vulnérabilité à plus longue échéance *(large concordance, degré d'évidence moyen)*. Par exemple, les réseaux de digues diminuent l'exposition en assurant une protection immédiate contre les inondations, mais elles encouragent aussi une colonisation susceptible d'accentuer les risques au fil du temps. [2.4.2, 2.5.4, 2.6.2] Voir également l'analyse exposée dans les sections 1.4.3, 5.3.2 et 8.3.1.

Les systèmes nationaux conditionnent la capacité des pays à relever les défis posés par les changements observés et attendus dans l'exposition, la vulnérabilité et les extrêmes météorologiques et climatiques *(large concordance, degré d'évidence élevé)*. Les systèmes efficaces rassemblent une multitude d'acteurs (gouvernements nationaux et territoriaux, secteur privé, milieux de la recherche et société civile, incluant les organisations locales) qui jouent des rôles différents mais complémentaires dans la gestion des risques, selon leurs fonctions et capacités. [6.2]

Il serait bénéfique sur tous les plans d'intégrer plus étroitement la gestion des risques de catastrophes et l'adaptation au changement climatique, et d'inclure ces deux démarches dans les politiques et pratiques locales, infranationales, nationales et internationales de développement *(large concordance, degré d'évidence moyen)*. [5.4, 5.5, 5.6, 6.3.1, 6.3.2, 6.4.2, 6.6, 7.4] Il est de plus en plus largement admis à l'échelon international que la prise en considération du bien-être de la population, de la qualité de vie, des besoins d'infrastructure et des moyens de subsistance, conjuguée à une approche multidanger de la planification et de la prévention des catastrophes à brève échéance, facilite une adaptation aux extrêmes climatiques à long terme. [5.4, 5.5, 5.6, 7.3] Les stratégies et politiques sont d'autant plus efficaces qu'elles reconnaissent l'existence de multiples facteurs de perturbation, de valeurs prioritaires différentes et de buts politiques en concurrence. [8.2, 8.3, 8.7]

D. Projections concernant les extrêmes climatiques, les impacts et les pertes occasionnées par les catastrophes

Les effets que la variabilité naturelle du climat, le changement climatique d'origine anthropique et le développement socio-économique auront sur l'exposition, la vulnérabilité et les extrêmes climatiques pourraient modifier les impacts de ces extrêmes sur les systèmes naturels et humains et les possibilités de catastrophes.

Extrêmes climatiques et impacts

Le degré de confiance dans la projection d'une variation du sens et de l'ampleur des extrêmes climatiques dépend de nombreux facteurs, dont le type d'extrême, la région et la saison, la quantité et la qualité des données d'observation, la compréhension des processus sous-jacents et la fiabilité avec laquelle ces derniers sont simulés dans les modèles. En règle générale, les changements attendus selon différents scénarios d'émissions[5] ne divergent pas fortement pour les deux ou trois prochaines décennies, mais les signaux sont assez faibles en comparaison de la variabilité naturelle du climat sur la même période. Le signe même des changements est incertain pour certains extrêmes climatiques. En ce qui concerne les variations prévues d'ici à la fin du XXIe siècle, l'incertitude propre aux modèles ou les incertitudes liées aux scénarios d'émissions prennent une grande ampleur dans le cas de certains extrêmes. On ne saurait exclure l'apparition de changements peu probables mais à fort impact dus au dépassement de seuils climatiques mal compris, étant donné la nature mouvante et complexe du système climatique. Le fait d'attribuer un «faible degré de confiance» aux projections d'un extrême particulier n'implique ni n'exclut la possibilité d'une évolution de cette variable. Les évaluations ci-après de la probabilité et/ou du degré de confiance attachés aux projections portent en principe sur le climat à la fin du XXIe siècle, par rapport à celui de la fin du siècle précédent. [3.1.5, 3.1.7, 3.2.3, Encadré 3-2]

Les modèles prévoient une élévation prononcée des températures extrêmes d'ici à la fin du XXIe siècle. Il est *pratiquement certain* que l'on observera à l'échelle du globe une augmentation en fréquence et en ordre de grandeur des valeurs extrêmes des températures maximales quotidiennes et une diminution des valeurs extrêmes minimales au cours du XXIe siècle. Il est *très probable* que la durée, la fréquence et/ou l'intensité des périodes chaudes ou des vagues de chaleur s'accroîtront sur la majeure partie des terres émergées. Selon les scénarios d'émissions A1B et A2, il est *probable* qu'une journée extrêmement chaude qui revient tous les 20 ans se répétera tous les 2 ans d'ici à la fin du siècle dans la plupart des régions, à l'exception des hautes latitudes de l'hémisphère Nord où elle se reproduira *probablement* tous les 5 ans (voir la figure SPM.4A). Avec le scénario B1, un événement qui réapparaît tous les 20 ans surviendra *probablement* tous les 5 ans (et tous les 10 ans aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord). Il est *probable* que la valeur extrême de la température maximale quotidienne dont la période de retour est de 20 ans (autrement dit, qui n'a été dépassée qu'une fois en moyenne entre 1981 et 2000) s'élèvera de 1 à 3 °C d'ici au milieu du XXIe siècle et de 2 à 5 °C d'ici à la fin du XXIe siècle, selon la région et le scénario d'émission considérés (B1, A1B ou A2). [3.3.1, 3.1.6, Tableau 3-3, Figure 3-5]

[5] Les scénarios d'émissions relatifs aux substances importantes sur le plan radiatif découlent des voies de développement socio-économique et technologique. Dans le présent Rapport, on considère un sous-ensemble (B1, A1B, A2) des 40 scénarios décrits dans le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES), qui s'étendent jusqu'en 2100 et ne prévoient pas de mesures supplémentaires relativement au climat. Couramment employés pour effectuer des projections, ils englobent une bonne part mais non la totalité des concentrations d'équivalent-CO_2 examinées dans le Rapport SRES.

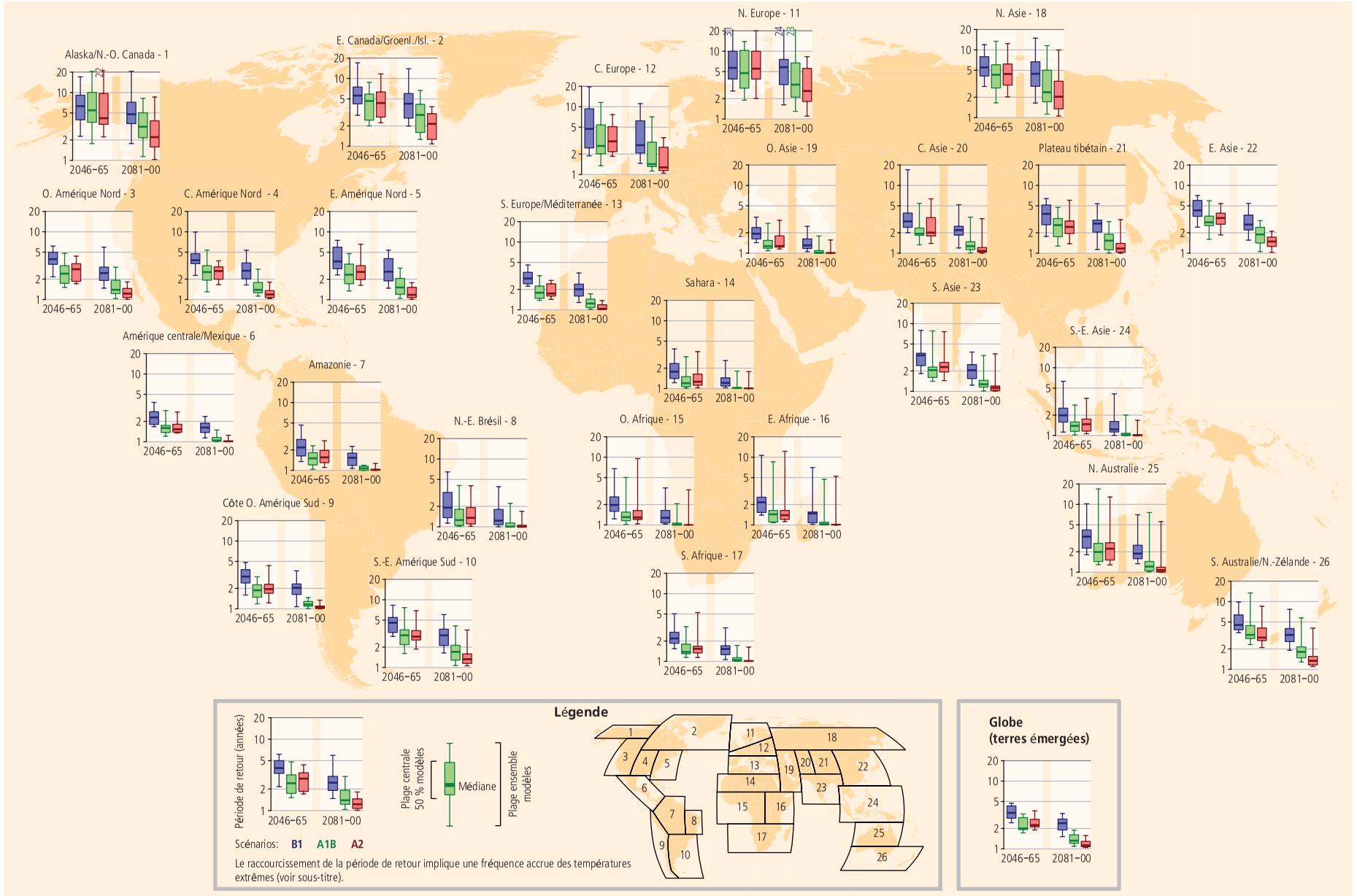


Figure SPM.4A | Périodes de retour prévues de la température maximale quotidienne qui a été dépassée une fois en moyenne au cours des 20 dernières années du XX^{e} siècle (1981–2000). Le raccourcissement de la période de retour implique une fréquence accrue des températures extrêmes (moins de temps entre deux événements, globalement). Les diagrammes en boîte montrent les résultats des projections sous forme de moyennes régionales à deux horizons temporels, soit 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la fin du XX^{e} siècle et pour trois scénarios d'émissions du SRES (B1, A1B, A2) (voir la légende). Les résultats reposent sur 12 modèles du climat mondial qui contribuent à la troisième phase du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP3). Le degré de concordance entre les modèles est indiqué par la taille des boîtes de couleur (dans lesquelles entrent 50 % des projections des modèles) et par la longueur des segments verticaux (qui indiquent les projections maximales et minimales de tous les modèles). La légende montre les limites des régions. Les valeurs sont calculées uniquement pour les points terrestres. L'encadré «Globe» présente les résultats obtenus avec l'ensemble des points de grille terrestres. [3.3.1, Figure 3-1, Figure 3-5]

Il est *probable* que la fréquence de fortes précipitations ou la part de ces dernières dans la pluviosité totale augmentera au XXIe siècle dans de nombreuses régions du globe. Cela vaut surtout pour les hautes latitudes et les zones tropicales et, en hiver, pour les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. Les fortes pluies qui accompagnent les cyclones tropicaux augmenteront *probablement* avec le réchauffement de la planète. On estime avec un *degré de confiance moyen* que, dans certaines régions, les fortes précipitations seront plus abondantes, en dépit d'une baisse attendue de la pluviosité totale. Selon divers scénarios d'émissions (B1, A1B, A2), il est *probable* que les précipitations maximales quotidiennes qui reviennent tous les 20 ans se répéteront tous les 5 à 15 ans d'ici à la fin du XXIe siècle dans de nombreuses régions. Avec les scénarios d'émissions élevés (A1B et A2), le raccourcissement de la période de retour est encore plus marqué dans la plupart des régions. Voir la figure SPM.4B. [3.3.2, 3.4.4, Tableau 3-3, Figure 3-7]

Il est *probable* que la vitesse moyenne du vent maximal associé aux cyclones tropicaux augmentera, mais peut-être pas dans tous les bassins océaniques. Il est *probable* que la fréquence globale des cyclones tropicaux diminuera ou restera presque la même. [3.4.4]

On estime avec un *degré de confiance moyen* que le nombre de cyclones extratropicaux diminuera en moyenne dans les deux hémisphères. Tandis qu'on n'accorde qu'un *faible degré de confiance* aux projections géographiques précises de l'activité cyclonique dans les zones extratropicales , il est attribué un *degré de confiance moyen* au déplacement vers les pôles des trajectoires suivies par les tempêtes extratropicales. Les projections relatives aux phénomènes de faible étendue, telles les tornades et les tempêtes de grêle, bénéficient d'un *faible degré de confiance* parce que divers processus physiques concurrents pourraient infléchir les tendances et parce que les modèles climatiques actuels ne simulent pas ce genre de phénomènes. [3.3.2, 3.3.3, 3.4.5]

On estime avec un *degré de confiance moyen* que la sécheresse s'intensifiera pendant le XXIe siècle au cours de certaines saisons et dans plusieurs régions, en raison de la baisse de la pluviosité et/ou de la hausse de l'évapotranspiration. Cela inclut le Sud de l'Europe et la région méditerranéenne, l'Europe centrale, le centre de l'Amérique du Nord, l'Amérique centrale et le Mexique, le Nord-Est du Brésil et l'Afrique australe. Pour les autres régions, on n'accorde qu'un *faible degré de confiance* aux résultats, faute de concordance dans les projections touchant à l'évolution du phénomène (selon le modèle et l'indice de sécheresse utilisé). La divergence des définitions, l'insuffisance des observations et l'impossibilité d'inclure dans les modèles tous les facteurs en jeu expliquent que les projections de la sécheresse bénéficient seulement d'un *degré de confiance moyen*. Voir la figure SPM.5. [3.5.1, Tableau 3-3, Encadré 3-3]

L'évolution attendue des précipitations et des températures pourrait modifier les paramètres des crues même si, globalement, on attribue un *faible degré de confiance* aux projections de changements dans les crues fluviales. Le *degré de confiance est faible* parce que le *degré d'évidence* est lui-même *faible* et parce que les causes des variations régionales sont complexes, bien qu'il existe des exceptions. On estime avec un *degré de confiance moyen* (sur la base de raisonnements physiques) que l'augmentation des fortes précipitations contribuera à accroître les inondations locales dans certains bassins ou régions. [3.5.2]

L'élévation du niveau moyen de la mer tendra très probablement à augmenter les valeurs extrêmes des hautes eaux côtières. On estime avec un *degré de confiance élevé* que l'érosion du littoral, les inondations et d'autres phénomènes qui frappent déjà certains secteurs se poursuivront en raison de la montée du niveau des mers, tous les autres facteurs en cause étant stables par ailleurs. La contribution *très probable* de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'accroissement des valeurs extrêmes des hautes eaux côtières, alliée au renforcement *probable* de la vitesse maximale des vents associés aux cyclones tropicaux, préoccupe particulièrement les petits États insulaires des zones tropicales. [3.5.3, 3.5.5, Encadré 3-4]

On estime avec un *degré de confiance élevé* que les modifications affectant les vagues de chaleur, la fonte des glaciers et/ou la dégradation du pergélisol auront des répercussions sur divers phénomènes des hautes montagnes, tels que l'instabilité des pentes, les mouvements de masse et les crues provoquées par la vidange soudaine de lacs glaciaires. De même, on estime avec un *degré de confiance élevé* que les changements attendus dans les fortes pluies auront un impact sur les glissements de terrain dans certaines régions. [3.5.6]

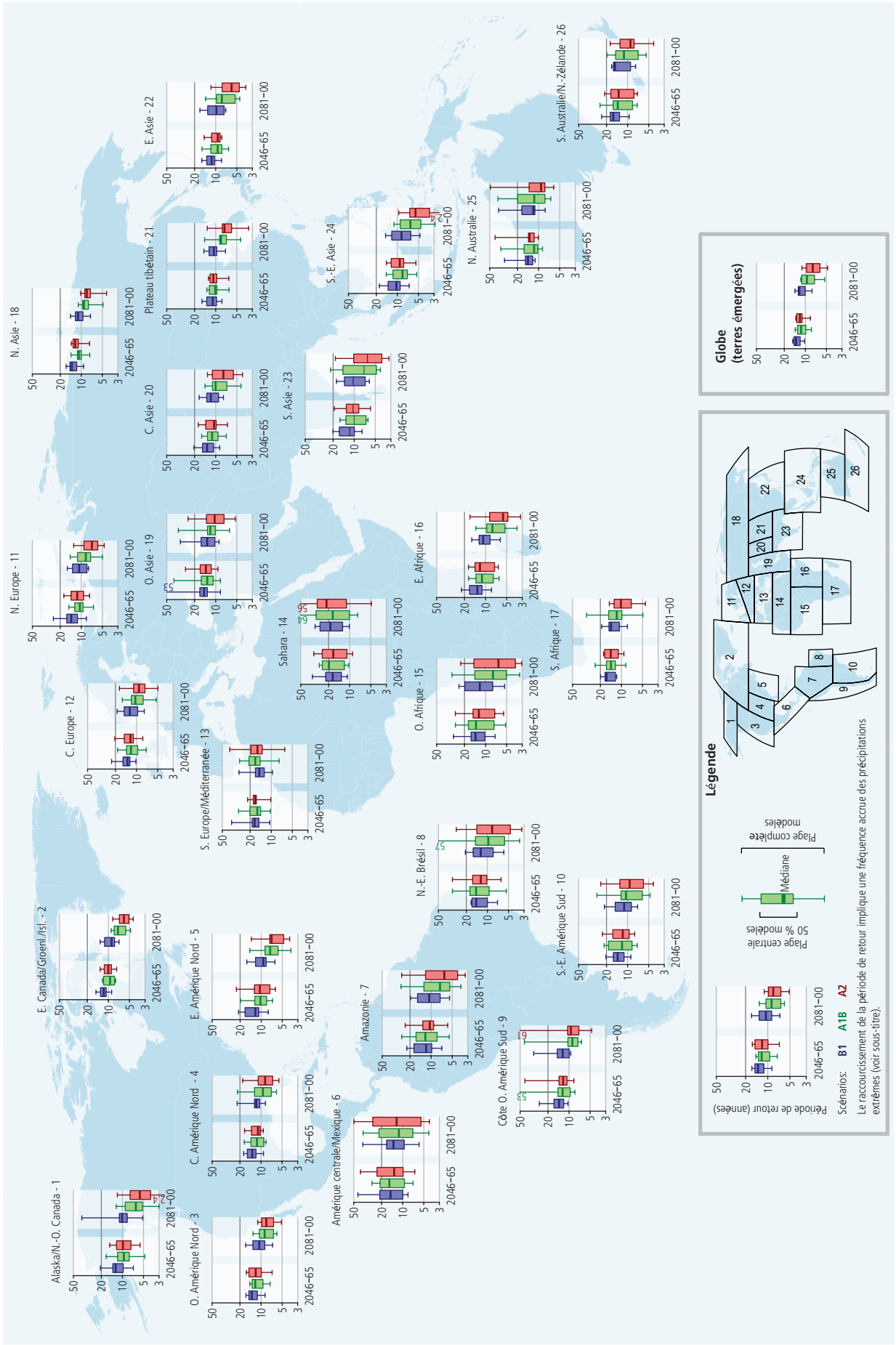


Figure SPM.4B | Périodes de retour prévues de la pluviosité quotidienne qui a été dépassée une fois en moyenne au cours des 20 dernières années du XX^e siècle (1981–2000). Le raccourcissement de la période de retour implique une fréquence accrue des précipitations extrêmes (moins de temps entre deux événements, globalement). Les diagrammes en boîte montrent les résultats des projections sous forme de moyennes régionales à deux horizons temporels, soit 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la fin du XX^e siècle et pour trois scénarios d'émissions du SRES (B1, A1B, A2) (voir la légende). Les résultats reposent sur 14 modèles du climat mondial ayant contribué au projet CMIP3. Le degré de concordance entre les modèles est indiqué par la taille des boîtes de couleur (dans lesquelles entrent 50 % des projections des modèles) et par la longueur des segments verticaux (qui indiquent les projections maximales et minimales de tous les modèles). La légende montre les limites des régions. Les valeurs sont calculées uniquement pour les points terrestres. L'encadré «Globe» présente les résultats obtenus avec l'ensemble des points de grille terrestres. [3.3.2, Figure 3-1, Figure 3-7]

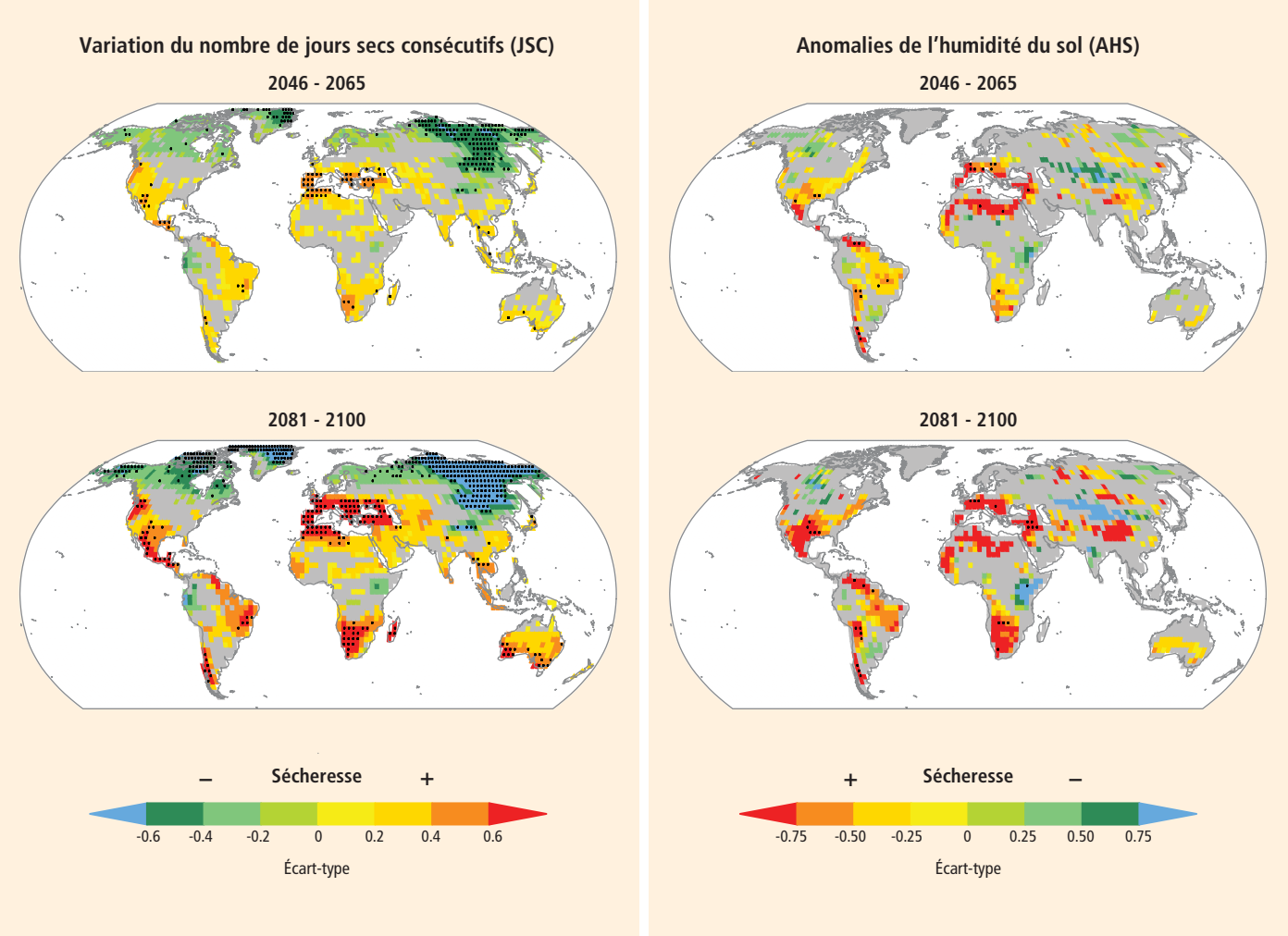


Figure SPM.5 | Variation annuelle prévue de la sécheresse selon deux indices. Colonne de gauche: Variation du nombre maximal de jours secs consécutifs par an (JSC - précipitations inférieures à 1 mm). Colonne de droite: Variation de l'humidité du sol (AHS - anomalies de l'humidité du sol). L'accentuation de la sécheresse est représentée par les couleurs jaune à rouge, l'atténuation de la sécheresse par les couleurs vert à bleu. Les changements prévus sont exprimés en unités d'écart-type de la variabilité interannuelle au cours de trois périodes de 20 ans (1980–1999, 2046–2065 et 2081–2100). Les variations sont présentées à deux horizons temporels, soit 2046–2065 et 2081–2100, par rapport aux valeurs de la fin du XX^{e} siècle (1980–1999), selon les simulations de modèles du climat mondial avec le scénario d'émissions A2 du SRES, relativement aux simulations correspondantes effectuées pour la fin du XX^{e} siècle. Les résultats reposent sur 17 (JSC) et 15 (AHS) modèles ayant contribué au projet CMIP3. Les couleurs signifient qu'au moins 66 % des modèles (12 sur 17 pour les JSC, 10 sur 15 pour les AHS) s'accordent sur le signe de la variation; des points sont ajoutés lorsqu'au moins 90 % des modèles (16 sur 17 pour les JSC, 14 sur 15 pour les AHS) s'accordent à ce sujet. La teinte grise désigne une concordance insuffisante des modèles (< 66 %). [3.5.1, Figure 3-9]

Les projections de changements dans les configurations de la variabilité naturelle du climat à grande échelle présentent un *faible degré de confiance*. En ce qui a trait aux moussons (précipitations, circulation), le *degré de confiance est faible* parce que les modèles climatiques s'accordent mal sur le signe des modifications futures. Les changements produits par les modèles concernant la variabilité du phénomène El Niño/Oscillation australe et la fréquence des épisodes El Niño ne concordent pas, ce qui amène à attribuer un *faible degré de confiance* aux projections visant ce phénomène. [3.4.1, 3.4.2, 3.4.3]

Impacts humains et pertes occasionnées par les catastrophes

Les extrêmes climatiques auront une incidence marquée sur les secteurs qui sont étroitement liés au climat tels que les ressources en eau, l'agriculture et la production alimentaire, la foresterie, la santé et le tourisme. Ainsi, bien qu'il ne soit pas encore possible de prévoir avec fiabilité les modifications à l'échelle d'un bassin versant, on estime avec un *degré de confiance élevé* que l'évolution du climat pourrait nuire gravement aux systèmes de gestion des ressources en eau. Dans bien des cas néanmoins, le changement climatique n'est que l'un des éléments à l'œuvre dans les changements futurs et pas nécessairement le plus important à l'échelon local. Les extrêmes climatiques devraient également avoir de lourdes répercussions sur l'infrastructure, même si les analyses poussées des dommages potentiels et anticipés se limitent à quelques pays, types d'installations et secteurs. [4.3.2, 4.3.5]

Dans nombre de régions, les principales causes de la hausse des pertes économiques dues aux extrêmes climatiques seront de nature socio-économique (*degré de confiance moyen*, reposant sur une *concordance moyenne* et un *faible degré d'évidence*). Les extrêmes climatiques ne sont pas les seuls facteurs qui conditionnent les risques, mais peu d'études ont quantifié expressément les effets que l'évolution de la démographie, de l'exposition des personnes et des biens et de la vulnérabilité a sur les pertes. Les rares travaux publiés à ce jour soulignent pour la plupart l'incidence majeure des changements (augmentations) de la population et des biens exposés au risque. [4.5.4]

Les cyclones tropicaux provoqueront de plus lourdes pertes économiques directes du fait d'une exposition accrue. L'ampleur des dommages dépendra aussi de la fréquence et de l'intensité futures de ce phénomène (*degré de confiance élevé*). Les pertes globales dues aux cyclones extratropicaux augmenteront également, même si elles pourraient décroître ou se stabiliser dans certains secteurs (*degré de confiance moyen*). Les crues causeront des dégâts plus importants à bien des endroits si l'on ne renforce pas la protection (*large concordance, degré d'évidence moyen*), mais l'ampleur des changements estimés varie sensiblement selon le lieu, les scénarios climatiques utilisés et la façon d'évaluer les conséquences sur le débit des cours d'eau et sur la formation des crues. [4.5.4]

Les catastrophes associées aux extrêmes climatiques ont une incidence sur la mobilité et le déplacement des populations, ce qui n'est pas sans effet dans les sociétés d'origine et d'accueil (*concordance moyenne, degré d'évidence moyen*). Si la fréquence et/ou l'ampleur des catastrophes augmentent, il sera de plus en plus difficile de vivre ou de maintenir les moyens de subsister dans certains lieux. Les migrations et les déplacements pourraient alors devenir définitifs et exercer des pressions nouvelles sur les terres d'accueil. Il est possible que de nombreux habitants des atolls, par exemple, soient contraints de s'établir ailleurs. [5.2.2]

E. Gérer les nouveaux risques d'extrêmes climatiques et de catastrophes

Une multitude de stratégies complémentaires peuvent être adoptées pour s'adapter au changement climatique et faire face aux risques d'extrêmes climatiques et de catastrophes (figure SPM.2). Leur mise en œuvre et leur combinaison effectives peuvent bénéficier d'une prise en compte des enjeux plus larges du développement durable.

Les mesures bénéfiques dans le climat actuel et pour divers scénarios d'évolution du climat sont dites «quasi sans regrets», elles constituent des points de départ pour répondre aux tendances attendues en matière d'exposition, de vulnérabilité et d'extrêmes climatiques. Elles sont à même de procurer des avantages aujourd'hui et jettent les bases d'une action face aux changements futurs (*large concordance, degré d'évidence moyen*). Nombre de ces stratégies ont des effets bénéfiques additionnels, concourent à plusieurs objectifs de développement, telle l'amélioration des moyens de subsistance, du bien-être des populations et de la conservation de la biodiversité, et réduisent l'ampleur des problèmes d'adaptation. [6.3.1, Tableau 6-1]

Les mesures quasi sans regrets peuvent porter sur les systèmes d'alerte précoce, la communication des risques entre les organes de décision et la population locale, la gestion durable des terres, y compris l'aménagement du territoire, et la gestion et la remise en état des écosystèmes. Ces mesures quasi sans regrets comprennent également les améliorations de la surveillance sanitaire, de l'approvisionnement en eau, de l'assainissement et des systèmes d'irrigation et de drainage, la protection des infrastructures contre les risques climatiques, l'élaboration et l'application des normes de construction, et une éducation et une sensibilisation améliorées. [5.3.1, 5.3.3, 6.3.1, 6.5.1, 6.5.2] Voir également les études de cas 9.2.11 et 9.2.14, ainsi que l'analyse exposée dans la section 7.4.3.

Une gestion efficace des risques fait appel à un ensemble de mesures destinées à réduire et transférer les risques et à réagir aux événements et aux catastrophes et ne doit pas se focaliser uniquement sur une action ou un champ d'action donné (*degré de confiance élevé*). [1.1.2, 1.1.4, 1.3.3] Des approches intégrées de ce type donnent de meilleurs résultats quand elles tiennent compte des circonstances locales et s'y adaptent (*large concordance, degré d'évidence élevé*). [5.1] Les stratégies efficaces combinent des mesures matérielles concernant l'infrastructure et des mesures intellectuelles, telles que le renforcement des capacités des personnes et des institutions et les réponses fondées sur les écosystèmes existants. [6.5.2]

Les stratégies de gestion multidanger permettent de réduire les risques complexes et composites (*large concordance, degré d'évidence élevé*). Prendre en compte de multiples types de dangers permet d'éviter que les efforts de réduction des risques associés à un type donné de danger n'aggravent l'exposition et la vulnérabilité à d'autres dangers, aujourd'hui ou dans le futur. [8.2.5, 8.5.2, 8.7]

Il existe des possibilités de synergies dans le financement international de la gestion des risques de catastrophes et de l'adaptation au changement climatique, mais elles ne sont pas encore totalement exploitées (*degré de confiance élevé*). La communauté internationale affecte beaucoup moins de fonds à l'atténuation des risques qu'à l'aide humanitaire. [7.4.2] Le transfert de technologie et la coopération sont importants pour faire avancer la réduction des risques de catastrophes et l'adaptation au changement climatique. Le manque de coordination dans les transferts de technologie et de coopération entre ces deux domaines a conduit à une mise en œuvre fragmentaire. [7.4.3]

Le fait de redoubler d'efforts à l'échelon international ne produit pas systématiquement des résultats tangibles et rapides à l'échelon local (*degré de confiance élevé*). Il existe des possibilités d'améliorer l'intégration entre tous les niveaux d'intervention, de l'international au local. [7.6]

L'intégration du savoir local dans les connaissances scientifiques et techniques peut améliorer la réduction des risques de catastrophes et l'adaptation au changement climatique (*large concordance, degré d'évidence élevé*). Les populations locales enregistrent de bien des manières leur vécu de l'évolution du climat, en particulier des phénomènes météorologiques extrêmes; ce savoir local peut révéler les capacités existant au sein de la communauté et les principales faiblesses à combler. [5.4.4] Grâce à la participation locale, l'adaptation des communautés profite à la gestion des risques de catastrophes et des extrêmes climatiques. Toutefois, cette adaptation de la communauté serait améliorée par la disponibilité de ressources humaines et financières et une information sur le climat et les risques de catastrophes adaptée aux besoins des acteurs locaux (*concordance moyenne, degré d'évidence moyen*). [5.6]

Une communication sur les risques faite au bon moment et de façon appropriée est décisive pour que l'adaptation et la gestion des risques soient effectives (*degré de confiance élevé*). Une caractérisation explicite de l'incertitude et de la complexité renforce la communication sur les risques. [2.6.3] Une bonne communication des risques climatiques repose sur l'échange, le partage et l'intégration des connaissances entre tous les groupes intéressés. La perception des dangers par les personnes et par les groupes dépend de facteurs psychologiques et culturels, des valeurs et des croyances. [1.1.4, 1.3.1, 1.4.2] Voir également l'analyse exposée dans la section 7.4.5.

Une démarche itérative impliquant la surveillance, la recherche, l'évaluation, l'apprentissage et l'innovation est de nature à réduire les risques de catastrophes et à promouvoir une gestion adaptative face aux extrêmes climatiques (*large concordance, degré d'évidence élevé*). [8.6.3, 8.7] Les stratégies itératives de gestion des risques sont bénéfiques aux efforts d'adaptation étant donné la complexité, les incertitudes et le cadre temporel associés au changement climatique (*degré de confiance élevé*). [1.3.2] Combler les manques de connaissance grâce à l'intensification des observations et des recherches peut réduire les incertitudes et aider à élaborer des stratégies efficaces d'adaptation et de gestion des risques. [3.2, 6.2.5, Tableau 6-3, 7.5, 8.6.3] Voir également l'analyse exposée dans la section 6.6.

Le tableau SPM.1 montre, à l'aide d'exemples, comment les tendances observées et prévues en matière d'exposition, de vulnérabilité et d'extrêmes climatiques peuvent éclairer les stratégies, politiques et mesures de gestion des risques et d'adaptation. L'intérêt que présentent ces tendances pour la prise de décision dépend de leur ampleur et de leur degré de certitude, aux échelles spatiales et temporelles du danger considéré, et de la possibilité de mettre en œuvre des mesures de gestion du risque (voir le tableau SPM.1).

Tableau SPM.1 | Quelques options de gestion des risques et d'adaptation face à la variation de l'exposition, de la vulnérabilité et des extrêmes climatiques. Dans chaque exemple, l'information donnée correspond à l'échelle directement utile pour la prise de décision. Le sens, l'ampleur et/ou le degré de certitude des changements observés et prévus dans le monde et dans les régions en ce qui a trait aux extrêmes climatiques varient parfois selon l'échelle considérée.
Les exemples ont été choisis en fonction des éléments présentés dans les chapitres correspondants, notamment sur l'exposition, la vulnérabilité, l'information climatologique et les options d'adaptation et de gestion des risques. Ils visent à illustrer les questions et échelles pertinentes, et non à procurer des informations détaillées sur les régions. Le but recherché n'est pas non plus de faire état d'éventuels écarts régionaux sur le plan de l'exposition, de la vulnérabilité ou des pratiques de gestion des risques. L'évolution des extrêmes climatiques prévue aux échelles locales est souvent affectée d'un degré de confiance moindre que les changements attendus à l'échelle des régions ou du globe. Cette confiance limitée amène à privilégier les options de gestion des risques quasi sans regrets qui tentent d'atténuer l'exposition et la vulnérabilité tout en renforçant la résilience et la préparation à l'égard des risques qu'on ne pourrait éliminer complètement. Il est possible d'ajuster de manière ciblée les stratégies, politiques et mesures en se basant sur l'évolution des extrêmes climatiques qui bénéficie d'un degré supérieur de confiance et qui devrait survenir aux échelles où se prennent les décisions en matière d'adaptation et de gestion des risques. [3.1.6, Encadré 3-2, 6.3.1, 6.5.2]

Exemple	Exposition et vulnérabilité à l'échelle de la gestion des risques	Information sur les extrêmes climatiques à différentes échelles spatiales			Options de gestion des risques et d'adaptation
		GLOBE Changements mondiaux observés (depuis 1950) et projetés (d'ici à 2100)	**RÉGION** Changements observés (depuis 1950) et projetés (d'ici à 2100)	**ÉCHELLE DE LA GESTION DES RISQUES** Information disponible	
Inondations liées aux **niveaux extrêmes de la mer** dans les petits États insulaires en développement des zones tropicales	Les petits États insulaires des océans Pacifique, Indien et Atlantique, souvent de faible altitude, sont très vulnérables face à l'élévation du niveau de la mer et à divers impacts tels que l'érosion, les inondations, la modification du littoral et l'intrusion d'eau salée dans les nappes souterraines côtières. Ces phénomènes peuvent perturber les écosystèmes, abaisser la productivité agricole, modifier les tableaux épidémiologiques, provoquer des pertes économiques (dans le tourisme par exemple) et amener les populations à se déplacer, tous facteurs qui aggravent la vulnérabilité à l'égard des conditions météorologiques extrêmes. [3.5.5, Encadré 3-4, 4.3.5, 4.4.10, 9.2.9]	**Observés:** Il est *probable* que l'élévation du niveau moyen de la mer s'est accompagnée d'un accroissement des valeurs extrêmes des hautes eaux côtières dans le monde. **Projetés:** L'élévation du niveau moyen de la mer tendra *très probablement* à hausser les valeurs extrêmes des hautes eaux côtières. On estime avec un *degré de confiance élevé* que l'érosion du littoral et les inondations qui frappent déjà certains endroits se poursuivront à cause de la montée du niveau des mers, en l'absence de modifications des autres facteurs en cause. Il est *probable* que la fréquence globale des cyclones tropicaux diminuera ou restera à peu près la même. Il est *probable* que la vitesse moyenne du vent maximal associé aux cyclones tropicaux augmentera, mais peut-être pas dans tous les bassins océaniques. [Tableau 3-1, 3.4.4, 3.5.3, 3.5.5]	**Observés:** Les marées et le phénomène El Niño/Oscillation australe ont contribué à accroître ces dernières années la fréquence des valeurs extrêmes des hautes eaux côtières, et des inondations résultantes, dans certaines îles du Pacifique. **Projetés:** La contribution *très probable* de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'accroissement des valeurs extrêmes des hautes eaux côtières, alliée au renforcement *probable* de la vitesse maximale des vents associés aux cyclones tropicaux, préoccupe particulièrement les petits États insulaires des zones tropicales. Voir les projections mondiales concernant les cyclones tropicaux dans la colonne «Globe». [Encadré 3-4, 3.4.4, 3.5.3]	Couverture spatiale et temporelle fragmentaire par les réseaux d'observation terrestres, réseau limité d'observation *in situ* des océans, mais affinement des observations par satellite ces dernières décennies. Les changements relatifs à l'activité orageuse pourraient modifier les valeurs extrêmes des hautes eaux côtières; toutefois, il est impossible d'évaluer globalement les effets de ces changements sur les ondes de tempête, en raison des zones limitées qui ont été étudiées à ce jour et des incertitudes qui sont globalement associées à ces changements. [Encadré 3-4, 3.5.3]	Options quasi sans regrets qui diminuent l'exposition et la vulnérabilité face aux dangers, sur une gamme de tendances: • Maintien en état des réseaux de drainage • Forage de puits en vue de limiter la contamination des eaux souterraines par l'eau salée • Amélioration des systèmes d'alerte précoce • Mise en commun des risques régionaux • Protection, restauration et reconstitution des mangroves Parmi les options spécifiques d'adaptation figurent les mesures propres à rendre les économies nationales moins tributaires du climat et une gestion adaptative incluant l'apprentissage itératif. Il pourrait être nécessaire d'envisager un déplacement, par exemple lorsque les atolls risquent d'être complètement submergés par les ondes de tempête. [4.3.5, 4.4.10, 5.2.2, 6.3.2, 6.5.2, 6.6.2, 7.4.4, 9.2.9, 9.2.11, 9.2.13]
Crues éclair dans les zones d'habitation non structurées à Nairobi, Kenya	L'augmentation rapide du nombre de pauvres dans la région de Nairobi s'est traduite par la construction de maisons fragiles juste à côté de cours d'eau et par l'obstruction de zones de drainage naturel, ce qui aggrave l'exposition et la vulnérabilité. [6.4.2, Encadré 6-2]	**Observés:** L'évolution de l'ampleur et de la fréquence des crues (imputable au climat) bénéficie d'un *faible degré d'évidence* à l'échelle du globe. **Projetés:** On attribue un *faible degré de confiance* aux projections de changements dans les crues fluviales, parce que le degré d'évidence est lui-même faible et parce que les causes des variations régionales sont complexes. Toutefois, on estime avec un *degré de confiance moyen* (raisonnements physiques) que l'augmentation des fortes précipitations contribuera à accroître les inondations locales dans certains bassins ou régions. [Tableau 3-1, 3.5.2]	**Observés:** Un *faible degré de confiance* est attaché aux tendances des fortes précipitations en Afrique de l'Est, car le degré d'évidence est insuffisant. **Projetés:** Il est *probable* que les indicateurs de fortes précipitations augmenteront en Afrique de l'Est. [Tableau 3-2, Tableau 3-3, 3.3.2]	Capacité restreinte de prévoir les crues éclair à l'échelon local. [3.5.2]	Options quasi sans regrets qui diminuent l'exposition et la vulnérabilité face aux dangers, sur une gamme de tendances: • Construction de bâtiments plus résistants et renforcement de la réglementation • Adoption de programmes de lutte contre la pauvreté • Amélioration des réseaux de drainage et d'évacuation des eaux usées dans l'ensemble de la ville Le Programme de réhabilitation et de restauration des cours d'eau de Nairobi comprend plusieurs mesures: aménagement de zones tampons le long des cours d'eau, excavation de canaux et de fossés de drainage, dégagement des canaux existants, prise en compte de la variabilité et de l'évolution du climat lors de l'implantation et de la conception des installations de traitement des eaux usées et surveillance des paramètres environnementaux en vue de déclencher des alertes précoces aux crues. [6.3, 6.4.2, Encadré 6-2, Encadré 6-6]

Suite sur la page suivante →

Exemple	Exposition et vulnérabilité à l'échelle de la gestion des risques	Information sur les extrêmes climatiques à différentes échelles spatiales			Options de gestion des risques et d'adaptation
		GLOBE Changements mondiaux observés (depuis 1950) et projetés (d'ici à 2100)	**RÉGION** Changements observés (depuis 1950) et projetés (d'ici à 2100)	**ÉCHELLE DE LA GESTION DES RISQUES** Information disponible	
Impacts des **vagues de chaleur** dans les villes d'Europe	Les facteurs qui influent sur l'exposition et la vulnérabilité sont l'âge, l'état de santé, la conduite d'activités à l'extérieur, les facteurs socio-économiques (dont la pauvreté et l'isolement), l'accès à des sources de refroidissement et leur utilisation, l'adaptation physiologique et le comportement de la population, l'infrastructure urbaine. [2.5.2, 4.3.5, 4.3.6, 4.4.5, 9.2.1]	**Observés:** On estime avec un *degré de confiance moyen* que la durée ou le nombre de périodes chaudes et de vagues de chaleur a progressé depuis le milieu du XX^{e} siècle dans un grand nombre (mais pas la totalité) des régions du globe. Il est *très probable* que le nombre de journées et de nuits chaudes a augmenté à l'échelle de la planète. **Projetés:** Il est *très probable* que la durée, la fréquence et/ou l'intensité des périodes chaudes ou des vagues de chaleur s'accroîtront sur la majeure partie des terres émergées. Il est *pratiquement certain* que la fréquence et l'ampleur des journées et des nuits chaudes augmenteront à l'échelle du globe. [Tableau 3-1, 3.3.1]	**Observés:** On estime avec un *degré de confiance moyen* que les vagues de chaleur ou les périodes chaudes ont augmenté en Europe. Il est *probable* que le nombre de journées et de nuits chaudes s'est globalement accru sur la majeure partie du continent. **Projetés:** Il est *probable* que les vagues de chaleur ou les périodes chaudes seront plus fréquentes, plus longues et plus intenses en Europe. Il est *très probable* que le nombre de journées et de nuits chaudes augmentera. [Tableau 3-2, Tableau 3-3, 3.3.1]	Observations et projections utiles pour certaines villes du continent, augmentation des vagues de chaleur attendue selon les tendances régionales et compte tenu de l'effet d'îlot de chaleur urbain. [3.3.1, 4.4.5]	Options quasi sans regrets qui diminuent l'exposition et la vulnérabilité face aux dangers, sur une gamme de tendances: • Systèmes d'alerte précoce ciblant les groupes vulnérables (personnes âgées, etc.) • Cartographie de la vulnérabilité et prise de mesures en conséquence • Information publique sur ce qu'il convient de faire pendant une vague de chaleur, y compris les comportements à adopter • Recours aux réseaux de services sociaux pour atteindre les groupes vulnérables Les mesures suivantes pourraient être prises pour ajuster les stratégies, politiques et mesures: sensibiliser la population au problème de santé publique que sont les vagues de chaleur, modifier l'infrastructure urbaine et l'aménagement du territoire (expansion des espaces verts, etc.), repenser les méthodes de refroidissement des bâtiments publics et adapter l'infrastructure de production et de transport énergétique. [Tableau 6-1, 9.2.1]
Hausse des pertes causées par les **ouragans** aux États-Unis d'Amérique et dans les Caraïbes	L'exposition et la vulnérabilité s'aggravent sous l'effet de la poussée démographique et de la hausse de la valeur des biens, surtout le long de la côte atlantique et du golfe du Mexique aux États-Unis d'Amérique. Ces tendances ont été compensées en partie par un renforcement des normes de construction. [4.4.6]	**Observés:** Un *faible degré* de confiance est attaché à toute augmentation relevée à long terme (40 ans ou plus) de l'activité cyclonique dans les zones tropicales, compte tenu de l'évolution des capacités d'observation. **Projetés:** Il est *probable* que la fréquence globale des cyclones tropicaux diminuera ou restera à peu près la même. Il est *probable* que la vitesse moyenne du vent maximal associé aux cyclones tropicaux augmentera, mais peut-être pas dans tous les bassins océaniques. Les fortes pluies qui accompagnent les cyclones tropicaux augmenteront *probablement*. L'élévation du niveau moyen de la mer devrait accentuer les impacts des ondes de tempête liées aux cyclones tropicaux. [Tableau 3-1, 3.4.4]	Voir les projections mondiales dans la colonne «Globe».	Capacité limitée d'anticiper les changements pour un lieu précis, car les modèles mondiaux ne peuvent simuler avec précision les facteurs qui interviennent dans l'évolution de la formation, de la trajectoire et de l'intensité des cyclones tropicaux. [3.4.4]	Options quasi sans regrets qui diminuent l'exposition et la vulnérabilité face aux dangers, sur une gamme de tendances: • Adoption et application de normes de construction renforcées • Affinement de la capacité de prévision et mise en place de meilleurs systèmes d'alerte précoce (comprenant des plans et moyens d'évacuation) • Mise en commun des risques régionaux Vu la forte variabilité sous-jacente et l'incertitude des tendances, on pourrait promouvoir une gestion adaptative fondée sur l'apprentissage et la souplesse (exemple du Comité national des ouragans des Îles Caïman). [5.5.3, 6.5.2, 6.6.2, Encadré 6-7, Tableau 6-1, 7.4.4, 9.2.5, 9.2.11, 9.2.13]
Sécheresse et sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest	Faute d'une évolution suffisante des pratiques agricoles, la région est vulnérable face à la variabilité accrue des précipitations saisonnières, de la sécheresse et des extrêmes météorologiques. La vulnérabilité est exacerbée par la poussée démographique, la dégradation des écosystèmes et la surexploitation des ressources naturelles, ainsi que par des normes minimales en matière de santé, d'éducation et de gouvernance. [2.2.2, 2.3, 2.5, 4.4.2, 9.2.3]	**Observés:** On estime avec un *degré de confiance moyen* que certaines régions ont subi des sécheresses plus intenses et plus longues, tandis que le phénomène est devenu moins fréquent, moins intense ou plus court ailleurs. **Projetés:** On estime avec un *degré de confiance moyen* que la sécheresse s'intensifiera au cours de certaines saisons et dans plusieurs régions. Un *faible degré de confiance* est attaché aux autres régions, faute de concordance dans les projections. [Tableau 3-1, 3.5.1]	**Observés:** L'accentuation de la sécheresse jouit d'un *degré de confiance moyen*. Ces dernières années ont été marquées par une variabilité interannuelle plus forte que les 40 années précédentes; le Sahel est resté sec dans l'Ouest mais a retrouvé des conditions plus humides dans l'Est. **Projetés:** Le *degré de confiance* est *faible* car les projections fournies par les modèles ne concordent pas. [Tableau 3-2, Tableau 3-3, 3.5.1]	Prévisions intrasaisonnières, saisonnières et interannuelles, l'incertitude augmentant avec l'échéance. Surveillance, instruments et données améliorés grâce aux systèmes d'alerte précoce, mais participation limitée et diffusion insuffisante aux populations menacées. [5.3.1, 5.5.3, 7.3.1, 9.2.3, 9.2.11]	Options quasi sans regrets qui diminuent l'exposition et la vulnérabilité face aux dangers, sur une gamme de tendances: • Méthodes traditionnelles de récupération et d'entreposage des eaux de pluie et des eaux souterraines • Gestion de la demande d'eau et amélioration des systèmes d'irrigation • Agriculture durable, assolement et diversification des moyens de subsistance • Recours accru aux variétés résistantes à la sécheresse • Systèmes d'alerte précoce intégrant les prévisions saisonnières aux projections de la sécheresse, et amélioration de la communication par le biais des services de vulgarisation • Mise en commun des risques à l'échelle régionale ou nationale [2.5.4, 5.3.1, 5.3.3, 6.5, Tableau 6-3, 9.2.3, 9.2.11]

Implications pour le développement durable

Des actions allant de mesures graduelles limitées à des transformations de fond sont essentielles pour réduire les risques associés aux extrêmes climatiques (*large concordance, degré d'évidence élevé*). Les mesures graduelles ont pour but d'accroître l'efficacité des systèmes de technologie, de gouvernance et de valeur en place, tandis que les transformations peuvent impliquer la modification des attributs fondamentaux de ces systèmes. Ces transformations, lorsqu'elles sont nécessaires, sont facilitées par un accent mis sur la gestion adaptative et l'apprentissage. Si la vulnérabilité est grande et la capacité d'adaptation limitée, il peut être difficile pour les systèmes d'évoluer de manière durable sans se transformer, pour faire face aux changements dans les extrêmes climatiques. La vulnérabilité est souvent concentrée dans les pays et populations à faible revenu, quoique les nations et populations prospères ne soient pas toujours à l'abri des impacts des extrêmes climatiques. [8.6, 8.6.3, 8.7]

La durabilité sociale, économique et environnementale peut être améliorée par des stratégies d'adaptation et de gestion des risques de catastrophes. La durabilité face à l'évolution du climat impose de s'attaquer aux causes de la vulnérabilité, y compris les inégalités structurelles qui créent et entretiennent la pauvreté et qui limitent l'accès aux ressources (*concordance moyenne, degré d'évidence élevé*). Cela implique que la gestion des risques de catastrophes et l'adaptation soient intégrées dans toutes les politiques sociales, économiques et environnementales. [8.6.2, 8.7]

Les mesures d'adaptation et de réduction des risques de catastrophes les plus efficaces sont celles qui renforcent le développement dans un avenir assez proche et qui réduisent la vulnérabilité à plus longue échéance (*large concordance, degré d'évidence moyen*). Des arbitrages sont nécessaires entre les décisions à prendre maintenant et les buts qui s'inscrivent dans la durée, car les valeurs, les intérêts et les priorités diffèrent. Il peut être difficile de concilier les perspectives à court et à long terme en matière de gestion des risques de catastrophes et d'adaptation au changement climatique. Un compromis de cette nature nécessite de combler le fossé qui existe entre les pratiques locales de gestion des risques et les cadres institutionnels et légaux, la politique et la planification de l'échelon national. [8.2.1, 8.3.1, 8.3.2, 8.6.1]

Les progrès vers un développement durable et résilient face aux extrêmes climatiques peuvent bénéficier d'une remise en question des hypothèses et paradigmes et d'une stimulation de l'innovation, en vue d'encourager la recherche de nouveaux schémas d'action (*concordance moyenne, degré d'évidence élevé*). Une gestion efficace des risques de catastrophes, du changement climatique et des autres facteurs de perturbation implique souvent une large participation à l'élaboration des stratégies, l'aptitude à combiner plusieurs perspectives et des vues contrastées sur l'organisation des relations sociales. [8.2.5, 8.6.3, 8.7]

Les liens entre l'atténuation du changement climatique, l'adaptation et la gestion des risques de catastrophes peuvent avoir une grande incidence sur la résilience et la durabilité des trajectoires de développement (*large concordance, faible degré d'évidence*). Les interactions entre les buts de l'atténuation et ceux de l'adaptation, en particulier, se manifestent à l'échelle locale mais ont des conséquences à l'échelle planétaire. [8.2.5, 8.5.2]

Il existe de nombreuses approches et de nombreuses trajectoires pour parvenir à la durabilité et à la résilience. [8.2.3, 8.4.1, 8.6.1, 8.7] Cependant, les limites de la résilience sont atteintes lorsque des seuils ou points charnières associés aux systèmes sociaux et/ou naturels sont franchis, rendant l'adaptation particulièrement ardue. [8.5.1] Le choix des mesures d'adaptation aux phénomènes climatiques et les résultats escomptés doivent tenir compte de la diversité des capacités et ressources et de la multitude des processus en interaction. Ces mesures sont marquées par les compromis entre valeurs et objectifs prioritaires différents et par des visions du développement qui divergent et évoluent dans le temps. Les approches itératives présentent l'avantage de pouvoir intégrer la gestion des risques dans les trajectoires de développement, de telle sorte qu'il est ainsi possible d'envisager diverses politiques, puisque les risques et leur mesure, leur perception et leur compréhension varient au fil du temps. [8.2.3, 8.4.1, 8.6.1, 8.7]

Encadré SPM.2 | Traitement de l'incertitude

En accord avec les orientations qui ont été données aux auteurs principaux du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC en vue d'assurer un traitement cohérent des incertitudes[6], ce Résumé à l'intention des décideurs fait usage de deux indicateurs du degré de certitude que présentent les principaux résultats du Rapport, en fonction de l'appréciation que les comités de rédaction ont faite des connaissances scientifiques sous-jacentes:

- Confiance dans la validité d'un résultat, selon la nature, la quantité, la qualité et la cohérence des éléments qui déterminent le degré d'évidence (compréhension mécaniste, théorie, données, modèles, avis autorisés, etc.) et selon la concordance des vues des auteurs. Elle s'exprime en termes qualitatifs.
- Mesures quantifiées de l'incertitude liée à un résultat, exprimées en termes de probabilité (selon l'analyse statistique des observations ou des résultats issus des modèles, ou selon un avis autorisé).

Ces orientations affinent les indications qui avaient été données pour le troisième et le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC. Il est difficile, voire impossible, de comparer directement l'appréciation des incertitudes dans le présent Rapport et dans le quatrième Rapport pour diverses raisons: révision des orientations fournies aux auteurs quant au traitement des incertitudes, existence de nouvelles informations, progrès de la science, poursuite de l'analyse des données et modèles, et application de méthodes différentes dans les études évaluées. En outre, certaines études portaient sur des aspects différents d'une même valeur extrême, rendant impropre toute comparaison directe.

Chacune des conclusions clés repose sur l'évaluation, par le comité de rédaction concerné, du degré d'évidence et de la concordance. Le degré de confiance représente une synthèse qualitative du jugement du comité en ce qui a trait à la validité d'un résultat, déterminée par l'évaluation du degré d'évidence et de la concordance. Quand il était possible de quantifier les incertitudes, le comité de rédaction pouvait recourir à des expressions types ou indiquer précisément la probabilité en question. Sauf indication contraire, une *confiance élevée* à *très élevée* est accordée aux résultats auxquels les comités de rédaction ont affecté une probabilité.

Le degré d'évidence est qualifié de *faible, moyen ou élevé*, tandis que la concordance peut être *faible, moyenne ou large*. Cinq qualificatifs précisent le degré de confiance: *très faible, faible, moyen, élevé* et *très élevé*. La figure 1 de l'encadré SPM.2 illustre les expressions employées pour décrire le degré d'évidence et la concordance, et leur rapport avec le degré de confiance. Ce lien n'est pas figé: différents degrés de confiance peuvent être associés à une même appréciation du degré d'évidence et de la concordance, mais plus le degré d'évidence et la concordance sont élevés, plus la confiance augmente.

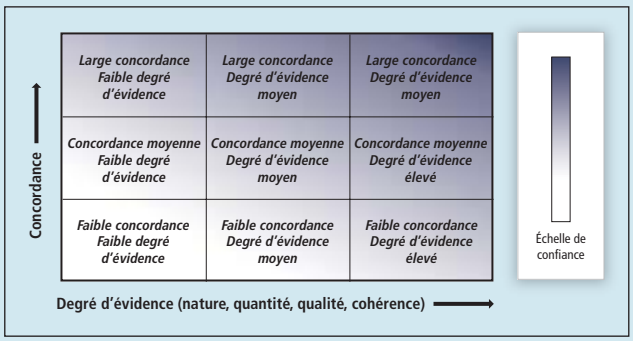


Illustration des expressions désignant le degré d'évidence et la concordance, et leur rapport avec le degré de confiance. L'intensité croissante de l'ombrage vers le coin supérieur droit signifie que le degré de confiance augmente. En principe, le degré d'évidence est maximal quand on dispose de multiples éléments cohérents, indépendants et de grande qualité.

Les termes suivants servent à indiquer la probabilité:

Terme*	**Probabilité**
Pratiquement certain	de 99 à 100 %
Très probable	de 90 à 100 %
Probable	de 66 à 100 %
Aussi probable qu'improbable	de 33 à 66 %
Improbable	de 0 à 33 %
Très improbable	de 0 à 10 %
Exceptionnellement improbable	de 0 à 1 %

***** D'autres expressions figurant dans le quatrième Rapport d'évaluation (extrêmement probable - probabilité de 95 à 100 %, plus probable qu'improbable - probabilité de 50 à 100 % et extrêmement improbable - probabilité de 0 à 5 %) peuvent également être employées quand il convient.

[6] Mastrandrea, M.D., C.B. Field, T.F. Stocker, O. Edenhofer, K.L. Ebi, D.J. Frame, H. Held, E. Kriegler, K.J. Mach, P.R. Matschoss, G.-K. Plattner, G.W. Yohe et F.W. Zwiers, 2010: Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Genève, Suisse, www.ipcc.ch.

L'interaction entre des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, d'une part, et des systèmes humains et naturels exposés et vulnérables, d'autre part, peut engendrer des catastrophes. Le présent Rapport spécial analyse les difficultés à comprendre et à gérer les risques associés aux extrêmes climatiques, pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Les catastrophes liées au temps et au climat présentent des dimensions à la fois sociales et physiques. Les phénomènes physiques influencent donc le risque de catastrophe en fonction de leurs variations de fréquence et d'intensité, mais cela est vrai aussi des facteurs d'exposition et de vulnérabilité qui se caractérisent par leur diversité spatiale et leur dynamisme temporel. La fréquence et l'intensité de certains types de phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes ont augmenté, mais c'est aussi le cas des populations et des biens exposés aux risques et par conséquent des risques de catastrophes. De l'échelon local à l'échelon international, il existe à tous les niveaux des possibilités de gérer les risques de catastrophes liées au temps et au climat, ou alors de mettre en place de telles possibilités. Parmi les stratégies efficaces de gestion des risques et d'adaptation au changement climatique, certaines exigent d'apporter des ajustements aux activités actuelles, tandis que d'autres nécessitent une véritable transformation ou un changement fondamental.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est l'organisme international chargé au premier chef d'évaluer les changements climatiques, notamment: les éléments scientifiques; les incidences, la capacité d'adaptation et la vulnérabilité; et l'atténuation des changements climatiques. Le GIEC a été créé par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et l'Organisation météorologique mondiale (OMM) avec pour mission d'offrir au monde une évaluation régulière et approfondie de l'état des connaissances s'agissant du changement climatique et de ses incidences éventuelles, environnementales et socio-économiques.

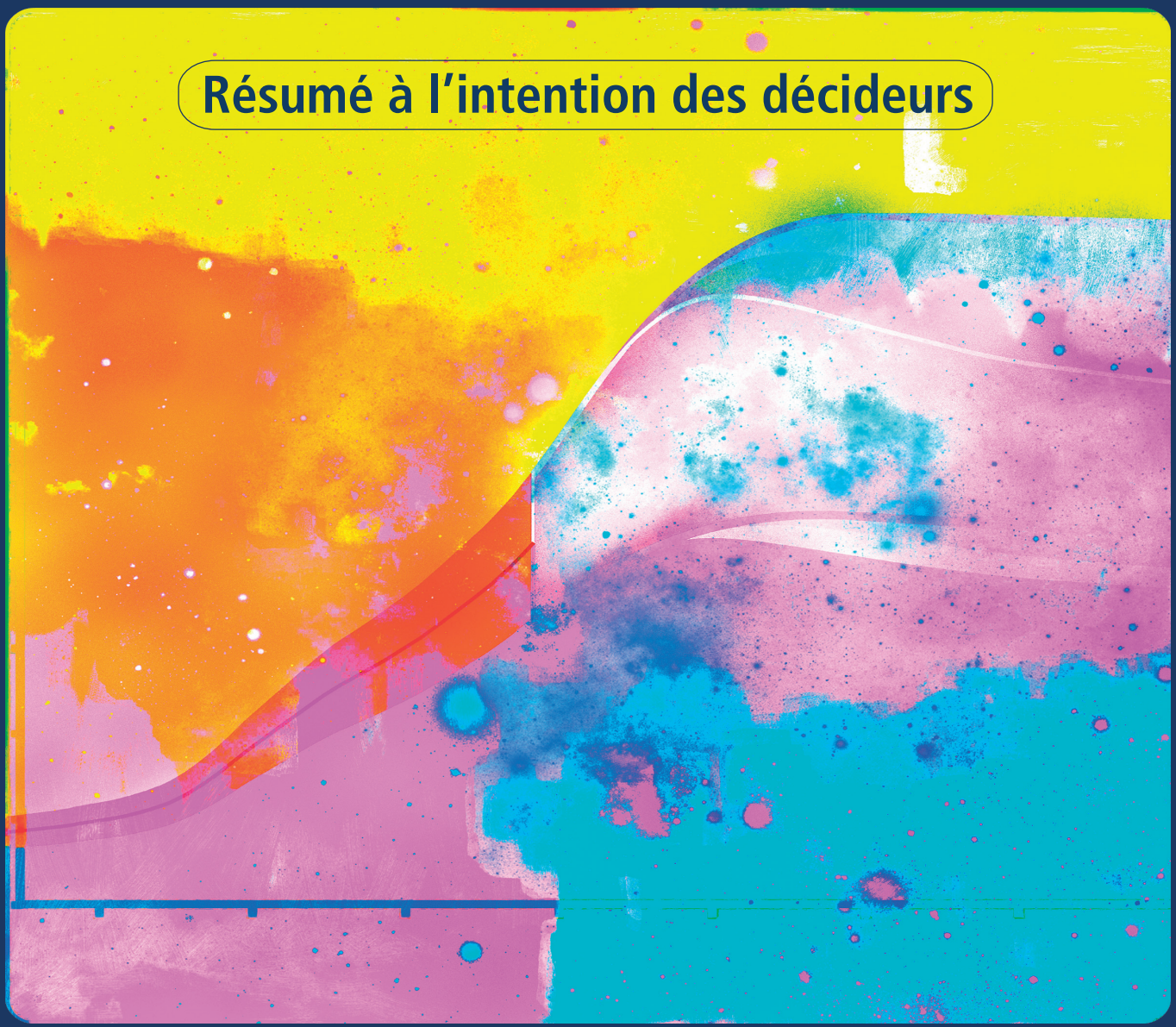
La présente brochure contient le résumé à l'intention des décideurs du Rapport spécial qui est publié dans son intégralité par Cambridge University Press (www.cambridge.org) et dont on peut se procurer la version électronique sur le site Web du GIEC (www.ipcc.ch) ou encore sur support de stockage électronique auprès du Secrétariat du GIEC.

giec

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR l'évolution du climat

Réchauffement planétaire de 1,5 °C

Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté



GT I GT II GT III

OMM PNUE

Réchauffement planétaire de 1,5 °C

Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté

Résumé à l'intention des décideurs

Publié sous la direction de

Valérie Masson-Delmotte
Coprésidente du Groupe de travail I

Panmao Zhai
Coprésident du Groupe de travail I

Hans-Otto Pörtner
Coprésident du Groupe de travail II

Debra Roberts
Coprésidente du Groupe de travail II

Jim Skea
Coprésident du Groupe de travail III

Priyadarshi R. Shukla
Coprésident du Groupe de travail III

Anna Pirani
Responsable de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail I

Wilfran Moufouma-Okia
Responsable scientifique

Clotilde Péan
Responsable des opérations

Roz Pidcock
Responsable de la communication

Sarah Connors
Administratrice scientifique

J. B. Robin Matthews
Administrateur scientifique

Yang Chen
Administrateur scientifique

Xiao Zhou
Assistante scientifique

Melissa I. Gomis
Administratrice graphique

Elisabeth Lonnoy
Assistante de projet

Tom Maycock
Rédacteur scientifique

Melinda Tignor
Responsable de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail II

Tim Waterfield
Administrateur informatique

Unité d'appui technique du Groupe de travail I

Maquette de couverture : Nigel Hawtin
Illustration de couverture : *Time to Choose* d'Alisa Singer — www.environmentalgraphiti.org — © Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
Cette illustration est inspirée d'un graphique figurant dans le RID (figure RID.1).

© Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019.
Des versions électroniques du Résumé à l'intention des décideurs peuvent être téléchargées à partir du site web du GIEC: www.ipcc.ch.

ISBN 978-92-9169-251-4

Résumé à l'intention des décideurs

RID

Résumé à l'intention des décideurs

Rédaction :
Myles Allen (Royaume-Uni), Mustafa Babiker (Soudan), Yang Chen (Chine), Heleen de Coninck (Pays-Bas/Union européenne), Sarah Connors (Royaume-Uni), Renée van Diemen (Pays-Bas), Opha Pauline Dube (Botswana), Kristie L. Ebi (États-Unis d'Amérique), François Engelbrecht (Afrique du Sud), Marion Ferrat (Royaume-Uni/France), James Ford (Royaume-Uni/Canada), Piers Forster (Royaume-Uni), Sabine Fuss (Allemagne), Tania Guillén Bolaños (Allemagne/Nicaragua), Jordan Harold (Royaume-Uni), Ove Hoegh-Guldberg (Australie), Jean-Charles Hourcade (France), Daniel Huppmann (Autriche), Daniela Jacob (Allemagne), Kejun Jiang (Chine), Tom Gabriel Johansen (Norvège), Mikiko Kainuma (Japon), Kiane de Kleijne (Pays-Bas/Union européenne), Elmar Kriegler (Allemagne), Debora Ley (Guatemala/Mexique), Diana Liverman (États-Unis d'Amérique), Natalie Mahowald (États-Unis d'Amérique), Valérie Masson-Delmotte (France), J. B. Robin Matthews (Royaume-Uni), Richard Millar (Royaume-Uni), Katja Mintenbeck (Allemagne), Angela Morelli (Norvège/Italie), Wilfran Moufouma-Okia (France/Congo), Luis Mundaca (Suède/Chili), Maike Nicolai (Allemagne), Chukwumerije Okereke (Royaume-Uni/Nigéria), Minal Pathak (Inde), Antony Payne (Royaume-Uni), Roz Pidcock (Royaume-Uni), Anna Pirani (Italie), Elvira Poloczanska (Royaume-Uni/Australie), Hans-Otto Pörtner (Allemagne), Aromar Revi (Inde), Keywan Riahi (Autriche), Debra C. Roberts (Afrique du Sud), Joeri Rogelj (Autriche/Belgique), Joyashree Roy (Inde), Sonia I. Seneviratne (Suisse), Priyadarshi R. Shukla (Inde), James Skea (Royaume-Uni), Raphael Slade (Royaume-Uni), Drew Shindell (États-Unis d'Amérique), Chandni Singh (Inde), William Solecki (États-Unis d'Amérique), Linda Steg (Pays-Bas), Michael Taylor (Jamaïque), Petra Tschakert (Australie/Autriche), Henri Waisman (France), Rachel Warren (Royaume-Uni), Panmao Zhai (Chine), Kirsten Zickfeld (Canada)

Résumé à référencer comme suit :
GIEC, 2018 : Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield]. Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 32 p.

Remerciements

Nous sommes grandement reconnaissants aux auteurs coordonnateurs principaux et aux auteurs principaux qui se sont portés volontaires de la compétence, de la rigueur et du dévouement dont ils ont constamment fait preuve, aidés en cela par la contribution essentielle des nombreux auteurs collaborateurs, qui ont mené des travaux dans toutes les disciplines scientifiques servant de fondement à chacun des chapitres du rapport. Les éditeurs-réviseurs ont joué un rôle essentiel en aidant les équipes d'auteurs et en veillant à l'intégrité du processus de relecture. Nous exprimons aussi nos sincères remerciements à l'ensemble des examinateurs et des réviseurs désignés par les gouvernements. Des remerciements particuliers sont adressés aux scientifiques intervenant en appui aux différents chapitres du rapport, qui ont largement dépassé nos attentes : Neville Ellis, Tania Guillén Bolaños, Daniel Huppmann, Kiane de Kleijne, Richard Millar et Chandni Singh.

Nous tenons également à remercier les trois vice-présidents du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Ko Barrett, Thelma Krug et Youba Sokona, ainsi que les membres des Bureaux des Groupes de travail I, II et III de leur aide, de leurs conseils et de leur discernement tout au long de l'élaboration du rapport : Amjad Abdulla, Edvin Aldrian,Carlo Carraro, Diriba Korecha Dadi, Fatima Driouech, Andreas Fischlin, Gregory Flato, Jan Fuglestvedt, Mark Howden, Nagmeldin G. E. Mahmoud, Carlos Mendez, Joy Jacqueline Pereira, Ramón Pichs- Madruga, Andy Reisinger, Roberto Sánchez Rodríguez, Sergey Semenov, Muhammad I. Tariq, Diana Ürge-Vorsatz, Carolina Vera, Pius Yanda, Noureddine Yassaa et Taha Zatari.

Nous adressons des remerciements chaleureux aux hôtes et aux organisateurs de la réunion de cadrage, des quatre réunions des auteurs principaux du Rapport spécial et de la quarante-huitième session du GIEC. Nous tenons aussi à souligner l'appui que nous ont accordé les pays et organismes hôtes : l'Organisation météorologique mondiale, Suisse ; le Ministère des affaires étrangères et l'Institut national de recherche spatiale (INPE), Brésil ; le Met Office et l'Université d'Exeter, Royaume-Uni ; l'Institut suédois de météorologie et d'hydrologie (SMHI), Suède ; le Ministère de l'environnement, de la conservation des ressources naturelles et du tourisme, le Comité national sur le changement climatique relevant du Département des services météorologiques et le Comité botswanais sur le changement environnemental mondial établi à l'Université du Botswana, Botswana ; ainsi que l'Administration météorologique coréenne (KMA) et la ville d'Incheon (République de Corée). L'appui apporté par les gouvernements et les institutions, ainsi que par l'intermédiaire des contributions au fonds d'affectation spéciale du GIEC, a été vivement apprécié, car il a permis aux équipes d'auteurs de participer à l'élaboration du rapport. Le bon fonctionnement de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail I a été rendu possible grâce au généreux soutien financier du Gouvernement français et à l'assistance administrative et informatique fournie par l'Université Paris-Saclay, l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL) et le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE). Nous tenons aussi à remercier l'Agence norvégienne pour l'environnement de son soutien à l'élaboration des graphiques du Résumé à l'intention des décideurs, ainsi que la bibliothèque du PNUE, qui a prêté main forte aux auteurs tout au long du processus de rédaction de l'évaluation en leur fournissant des ouvrages de référence.

Nous tenons également à remercier le Secrétaire du GIEC, Abdalah Mokssit, ainsi que le personnel du Secrétariat du GIEC : Kerstin Stendahl, Jonathan Lynn, Sophie Schlingemann, Judith Ewa, Mxolisi Shongwe, Jesbin Baidya, Werani Zabula, Nina Peeva, Joelle Fernandez, Annie Courtin, Laura Biagioni et Oksana Ekzarkho. Nous adressons aussi nos remerciements à Elhousseine Gouaini, qui a rempli les fonctions de responsable des conférences lors de la quarante-huitième session du GIEC.

Enfin, nous voudrions en particulier exprimer notre reconnaissance aux unités d'appui technique des groupes de travail, dont le dévouement inlassable, le professionnalisme et l'enthousiasme ont permis de produire le Rapport spécial. Ce rapport n'aurait pu être élaboré sans l'engagement des

membres de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail I, tous nouveaux au GIEC, qui ont relevé le défi sans précédent du sixième Rapport d'évaluation et ont joué un rôle central dans tous les aspects de l'élaboration du rapport : Yang Chen, Sarah Connors, Melissa Gomis, Elisabeth Lonnoy, Robin Matthews, Wilfran Moufouma-Okia, Clotilde Péan, Roz Pidcock, Anna Pirani, Nicholas Reay, Tim Waterfield et Xiao Zhou. Nos remerciements les plus chaleureux vont aussi à Marlies Craig, Andrew Okem, Jan Petzold, Melinda Tignor et Nora Weyer, de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail II, et à Bhushan Kankal, Suvadip Neogi et Joana Portugal Pereira, de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III, pour leur soutien collectif et collaboratif. Nous remercions tout spécialement Kenny Coventry, Harmen Gudde, Irene Lorenzoni et Stuart Jenkins pour leur contribution aux figures du Résumé à l'intention des décideurs de même que Nigel Hawtin pour son assistance graphique concernant le rapport. De plus, nous tenons à remercier les personnes ci-après pour leur contribution : Jatinder Padda (préparation du texte pour la publication), Melissa Dawes (préparation du texte pour la publication), Marilyn Anderson (index), Vincent Grégoire (mise en page) et Sarah le Rouzic (stagiaire).

Le site Web consacré au rapport spécial a été conçu par Habitat Seven, sous la direction de Jamie Herring, et le contenu du rapport a été mis en forme pour le site Web par Nicholas Reay et Tim Waterfield. Nous tenons à saluer le soutien apporté à cet égard par la Fondation pour les Nations Unies.

Introduction

Le présent rapport fait suite à l'invitation faite au GIEC de présenter un rapport spécial en 2018 sur les conséquences d'un réchauffement planétaire supérieur à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, telle qu'elle figure dans la décision de la 21e session de la Conférence des Parties (COP 21) à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques visant à adopter l'Accord de Paris[1].

Le GIEC a accepté cette invitation en avril 2016 et pris la décision d'élaborer ce rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire supérieur à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le cadre du renforcement de la riposte mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté.

Le Résumé à l'intention des décideurs (RID) présente les principales conclusions du Rapport spécial, sur la base de l'évaluation de la documentation scientifique, technique et socio-économique disponible[2] qui se rapporte à un réchauffement planétaire de 1,5 °C et aux fins de comparaison d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C et d'un réchauffement planétaire de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Le degré de confiance correspondant à chacune des principales conclusions est indiqué au moyen du langage « calibré » du GIEC[3]. La base scientifique sur laquelle se fonde chacune des principales conclusions principales peut être retrouvée dans les sections des chapitres du Rapport spécial indiquées en référence. Dans le Résumé à l'intention des décideurs, les lacunes en matière de connaissances sont recensées relativement aux chapitres sous-jacents du rapport.

A. Compréhension d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C[4]

A.1 Selon les estimations, les activités humaines ont provoqué un réchauffement planétaire d'environ 1 °C[5] au-dessus des niveaux préindustriels, avec une fourchette *probable* allant de 0,8 °C à 1,2 °C. Il est *probable* que le réchauffement planétaire atteindra 1,5 °C entre 2030 et 2052 s'il continue d'augmenter au rythme actuel (*degré de confiance élevé*). (figure RD.1) {1.2 }

A.1.1 S'incrivant dans la tendance au réchauffement à long terme enregistrée depuis l'époque préindustrielle, la température moyenne à la surface du globe observée pour la décennie 2006-2015 a été supérieure de 0,87 °C (avec une fourchette *probable* comprise entre 0,75 °C et 0,99 °C)[6] à la température moyenne pour la période 1850-1900 (*degré de confiance très élevé*). Le réchauffement planétaire anthropique estimé correspond au niveau de réchauffement observé à ± 20 % près (fourchette *probable*) et augmente actuellement de 0,2 °C (fourchette *probable* comprise entre 0,1 °C et 0,3 °C) par décennie sous l'effet des émissions passées et présentes (*degré de confiance élevé*). {1.2.1, tableau 1.1, 1.2.4}

A.1.2 Un réchauffement supérieur à la moyenne annuelle mondiale est constaté dans de nombreuses régions continentales et pendant de nombreuses saisons, notamment dans l'Arctique où l'on a relevé des valeurs deux à trois fois plus élevées que la moyenne planétaire. Le réchauffement est généralement plus marqué sur les continents que sur les océans (*degré de confiance élevé*). {1.2.1, 1.2.2, figure 1.1, figure 1.3, 3.3.1, 3.3.2}

---

1 Décision 1/COP 21, paragraphe 21.

2 L'analyse porte sur la documentation retenue pour publication à l'échéance du 15 mai 2018.

3 Chaque conclusion se fonde sur une évaluation des éléments probants et de la concordance s'y rapportant. Cinq qualificatifs sont utilisés pour exprimer le degré de confiance : très faible, faible, moyen, élevé et très élevé ; le degré de confiance est indiqué en italique : par exemple degré de confiance moyen. Les qualificatifs ci-après ont été utilisés pour indiquer la probabilité évaluée d'un résultat : quasiment certain (probabilité de 99 à 100 %), très probable (90 à 100 %), probable (66 à 100 %), à peu près aussi probable qu'improbable (33 à 66 %), improbable (0 à 33 %), très improbable (0 à 10 %), exceptionnellement improbable (0 à 1 %). D'autres qualificatifs peuvent également être utilisés le cas échéant : extrêmement probable (95 à 100 %), plus probable qu'improbable (> 50 à 100 %), plus improbable que probable (0 à < 50 %) et extrêmement improbable (0 à 5 %). La probabilité évaluée est indiquée en italique : par exemple très probable. Cela est conforme au cinquième Rapport d'évaluation.

4 Voir aussi l'encadré RID.1 : Notions essentielles.

5 Le niveau actuel de réchauffement planétaire est défini comme le niveau moyen pour une période de 30 ans centrée sur 2017, en supposant que le réchauffement se poursuive au rythme enregistré récemment.

6 Cette fourchette englobe les quatre estimations validées disponibles de la variation observée de la température moyenne à la surface du globe et représente aussi une incertitude supplémentaire due à l'éventuelle variabilité naturelle à court terme. {1.2.1, tableau 1.1}

A.1.3 Une évolution de l'intensité et de la fréquence de certains phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes a été détectée sur des périodes pendant lesquelles le réchauffement planétaire a augmenté d'environ 0,5 °C (*degré de confiance moyen*). Cette évaluation est fondée sur plusieurs éléments de preuve, y compris des études d'attribution concernant les variations des phénomènes extrêmes depuis 1950. {3.3.1, 3.3.2, 3.3.3}

A.2 Le réchauffement dû aux émissions anthropiques mondiales qui ont eu lieu depuis l'époque préindustrielle jusqu'à présent persistera pendant des siècles à des millénaires et continuera de causer d'autres changements à long terme dans le système climatique tels que l'élévation du niveau de la mer, avec des impacts associés à ces modifications (*degré de confiance élevé*), mais il est *improbable* que ces émissions soient à elles seules en mesure de provoquer un réchauffement planétaire de 1,5 °C (*degré de confiance moyen*). (figure RID.1) {1.2, 3.3, figure 1.5}

A.2.1 Il est *improbable* que les émissions anthropiques mondiales (qui comprennent les gaz à effet de serre, les aérosols et leurs précurseurs) qui ont eu lieu jusqu'à présent provoquent un réchauffement supplémentaire supérieur à 0,5 °C au cours des deux ou trois prochaines décennies (*degré de confiance élevé*) ou à une échelle de temps centennale (*degré de confiance moyen*).{1.2.4, figure 1.5}

A.2.2 Le fait d'atteindre des émissions anthropiques de CO_2 nettes égales à zéro et de les stabiliser à ce niveau et la diminution du forçage radiatif net autre que celui dû au CO_2 mettraient un terme au réchauffement planétaire anthropique sur des échelles de temps multidécennales (degré de confiance élevé). La température maximale atteinte est alors déterminée par les émissions anthropiques mondiales nettes cumulées de CO_2 jusqu'au moment correspondant à des émissions nettes égales à zéro (*degré de confiance élevé*) et par le niveau du forçage radiatif autre que celui dû au CO_2 durant les décennies antérieures au moment où cette température maximale est atteinte (*degré de confiance moyen*). À des échelles de temps plus grandes, le maintien des émissions anthropiques de CO_2 mondiales nettes négatives et/ou de nouvelles réductions du forçage radiatif autre que celui dû au CO_2 pourraient encore se révéler nécessaires pour empêcher un réchauffement supplémentaire dû aux rétroactions du système Terre et inverser le processus d'acidification des océans (*degré de confiance moyen*) et s'avéreront nécessaires pour réduire au minimum l'élévation du niveau de la mer (*degré de confiance élevé*). {Encadré interchapitres 2 du chapitre 1, 1.2.3, 1.2.4, figure 1.4, 2.2.1, 2.2.2, 3.4.4.8, 3.4.5.1, 3.6.3.2}

A.3 Les risques liés au climat auxquels sont exposés les systèmes naturels et humains sont plus élevés pour un réchauffement planétaire de 1,5 °C qu'à présent, mais moins élevés que pour un réchauffement de 2 °C (*degré de confiance élevé*). Ces risques sont fonction de l'ampleur et du rythme du réchauffement, de la région considérée, du niveau de développement et du degré de vulnérabilité, ainsi que des options retenues en matière d'adaptation et d'atténuation et de leur mise en œuvre (*degré de confiance élevé*) (figure RID.2). {1.3, 3.3, 3.4, 5.6}

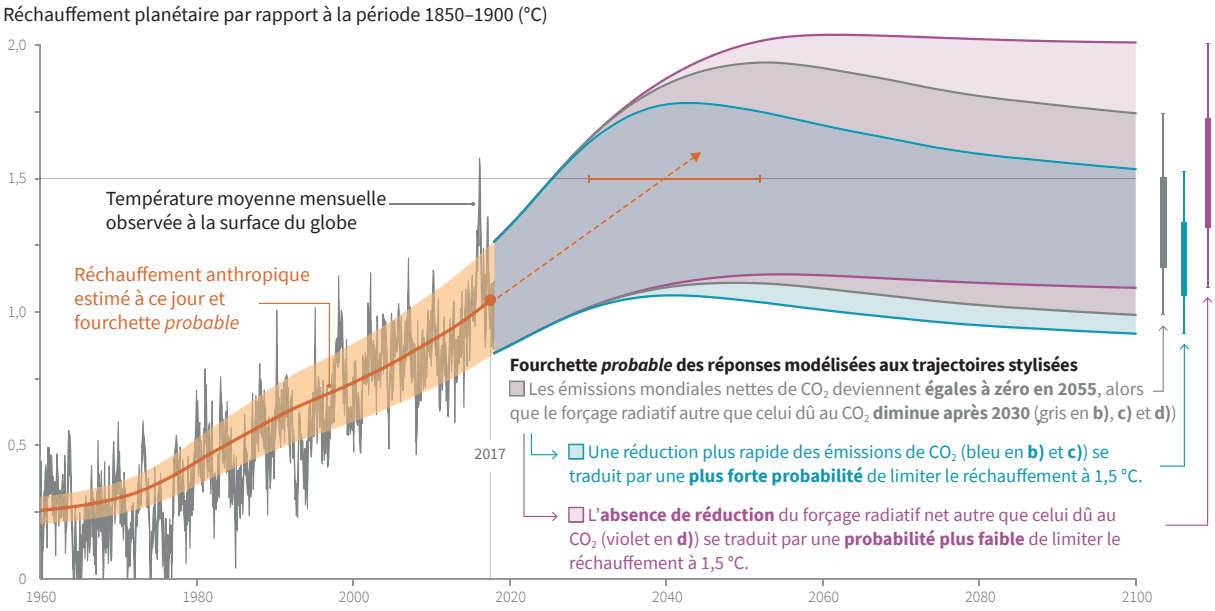
A.3.1 Les impacts du réchauffement planétaire sur les systèmes naturels et humains sont déjà visibles (*degré de confiance élevé*). De nombreux écosystèmes terrestres et océaniques et certains des services qu'ils rendent ont déjà changé sous l'effet du réchauffement planétaire (*degré de confiance élevé*). (figure RID.2) {1.4, 3.4, 3.5}

A.3.2 Les risques futurs liés au climat dépendent du rythme, de l'intensité maximale et de la durée du réchauffement. Globalement, ils sont plus importants si le réchauffement planétaire dépasse 1,5 °C avant de revenir ultérieurement à ce niveau d'ici à 2100 que s'il se stabilise progressivement à 1,5 °C, notamment si le pic de température est élevé (par exemple aux alentours de 2 °C) (*degré de confiance élevé*). Certains impacts peuvent être de longue durée ou irréversibles, tels que la perte de certains écosystèmes (*degré de confiance élevé*). {3.2, 3.4.4, 3.6.3, encadré interchapitres 8 du chapitre 3}

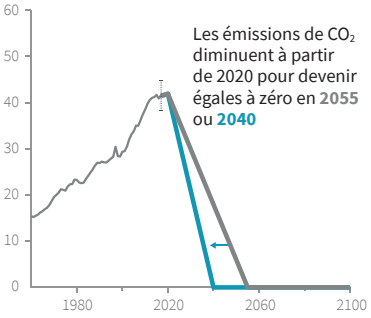
A.3.3 Des mesures d'adaptation et d'atténuation sont déjà appliquées (*degré de confiance élevé*). Les risques futurs liés au climat seraient réduits par l'amplification et l'accélération de mesures d'atténuation des effets du changement climatique à grande échelle, multi-niveaux et transsectorielles et par la mise en œuvre d'une adaptation à la fois incrémentale et transformationnelle (*degré de confiance élevé*). {1.2, 1.3, tableau 3.5, 4.2.2, encadré interchapitres 9 du chapitre 4, encadré 4.2, encadré 4.3, encadré 4.6, 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5, 4.4.1, 4.4.4, 4.4.5, 4.5.3}

Les émissions cumulées de CO_2 et l'évolution future du forçage radiatif autre que celui dû au CO_2 déterminent la probabilité de limiter le réchauffement à 1,5 °C

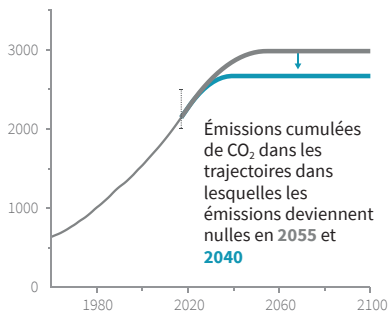
a) Variation de la température mondiale observée et réponses modélisées à des trajectoires stylisées des émissions et du forçage anthropiques



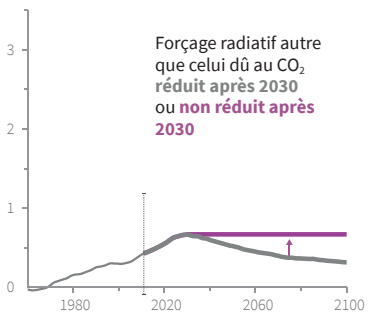
b) Trajectoires stylisées des émissions mondiales nettes de CO_2
en milliards de tonnes de CO_2 par an ($GtCO_2$/an)



c) Émissions nettes cumulées de CO_2
en milliards de tonnes de CO_2 ($GtCO_2$)



d) Trajectoires du forçage radiatif autre que celui dû au CO_2
en watts par mètre carré (W/m^2)



Une réduction immédiate plus rapide des émissions de CO_2 limite les émissions cumulées de CO_2 présentées dans le graphique **c)**.

La hausse maximale de la température est déterminée par les émissions nettes cumulées de CO_2 et par le forçage radiatif net autre que celui dû au CO_2 (dû au méthane, au protoxyde d'azote, aux aérosols et aux autres facteurs de forçage anthropiques).

Figure RID.1 | Graphique a) : Variation de la température moyenne mensuelle observée à la surface du globe (ligne grise jusqu'en 2017, d'après les jeux de données HadCRUT4, GISTEMP, Cowtan – Way et NOAA) et réchauffement planétaire anthropique estimé (ligne orange continue jusqu'en 2017 et bande ombrée orange indiquant la fourchette *probable* évaluée). La flèche orange en pointillé et la barre d'erreur orange horizontale représentent respectivement le point médian et la fourchette *probable* du moment où le réchauffement atteindra 1,5 °C s'il continue d'augmenter au rythme actuel. La bande ombrée grise sur la droite du graphique a) représente la fourchette *probable* des réponses du réchauffement, calculées au moyen d'un modèle climatique simple, à une trajectoire stylisée (avenir hypothétique) d'après lequel les émissions nettes de CO_2 (ligne grise dans les graphiques b) et c)) diminuent de façon linéaire à partir de 2020 pour atteindre des émissions nettes égales à zéro en 2055 et le forçage radiatif net autre que celui dû au CO_2 (ligne grise dans le graphique d)) augmente jusqu'en 2030 puis diminue. La bande ombrée bleue dans le graphique a) représente la réponse à des réductions plus rapides des émissions de CO_2 (ligne bleue dans le graphique b)), avec des émissions nettes devenant égales à zéro en 2040 et une diminution des émissions de CO_2 cumulées (graphique c)). La bande ombrée violette représente la réponse à des émissions nettes de CO_2 ramenées à zéro en 2055, avec un forçage net autre que celui dû au CO_2 restant constant après 2030. Les barres d'erreur verticales sur la droite du graphique a) représentent les fourchettes *probables* (en trait fin) et les terciles centraux (33e au 66e percentile, en trait épais) de la distribution estimée du réchauffement en 2100 selon ces trois trajectoires stylisées. Dans les graphiques b), c) et d), les barres d'erreur en pointillé représentent la fourchette *probable* des données historiques sur les émissions nettes mondiales annuelles et cumulées en 2017 (données tirées du Projet mondial sur le carbone) et du forçage radiatif net autre que celui dû au CO_2 en 2011 selon le cinquième Rapport d'évaluation, respectivement. Dans les graphiques c) et d), les échelles des axes verticaux ont été choisies afin de représenter des effets semblables sur la température moyenne à la surface du globe. {1.2.1, 1.2.3, 1.2.4, 2.3, figure 1.2 et compléments d'information du chapitre 1, encadré interchapitres 2 du chapitre 1}

B. Changements climatiques anticipés, impacts potentiels de ces changements et risques connexes

B.1 Selon les projections des modèles climatiques, les caractéristiques climatiques régionales devraient présenter des différences robustes[7] entre le moment présent et celui où le réchauffement planétaire atteindra 1,5 °C[8], et entre 1,5 °C et 2 °C. Ces différences consistent notamment dans l'augmentation de la température moyenne dans la plupart des régions continentales et océaniques (*degré de confiance élevé*), des extrêmes de chaleur dans la plupart des zones habitées (*degré de confiance élevé*), des épisodes de fortes précipitations dans plusieurs régions (*degré de confiance moyen*) et de la probabilité de sécheresses et de déficits de précipitations dans certaines régions (*degré de confiance moyen*). {3.3}

B.1.1 Les éléments probants tirés de changements attribués dans certains phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes pour un réchauffement planétaire d'environ 0,5 °C confortent le résultat selon lequel un réchauffement supplémentaire de 0,5 °C par rapport au présent s'accompagnerait de nouveaux changements décelables dans ces phénomènes extrêmes (*degré de confiance moyen*). D'après les analyses, plusieurs changements climatiques régionaux devraient se produire sous l'effet d'un réchauffement planétaire pouvant atteindre 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, y compris une hausse des températures extrêmes dans de nombreuses régions (*degré de confiance élevé*), une augmentation de fréquence, d'intensité et/ou de quantité des fortes précipitations dans plusieurs régions (degré de confiance élevé) et une augmentation d'intensité ou de fréquence des épisodes de sécheresse dans certaines régions (*degré de confiance moyen*). {3.2, 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, tableau 3.2}

B.1.2 Selon les projections, les extrêmes de température sur les terres émergées devraient augmenter davantage que la température moyenne à la surface du globe (*degré de confiance élevé*) : ainsi, les extrêmes de température des journées chaudes pourraient augmenter d'environ 3 °C aux latitudes moyennes pour un réchauffement planétaire de 1,5 °C et d'environ 4 °C pour un réchauffement de 2 °C. Les extrêmes de température des nuits froides pourraient augmenter d'environ 4,5 °C aux latitudes élevées pour un réchauffement de 1,5 °C et d'environ 6 °C environ pour un réchauffement de 2 °C (*degré de confiance élevé*). Toujours selon les projections, le nombre de journées très chaudes devrait augmenter dans la plupart des régions continentales, et c'est en zone tropicale que cette augmentation devrait être la plus marquée (*degré de confiance élevé*). {3.3.1, 3.3.2, encadré interchapitres 8 du chapitre 3}

B.1.3 Selon les projections, les risques de sécheresse et de déficits de précipitations devraient être plus grands à 2 °C qu'à 1,5 °C de réchauffement planétaire dans certaines régions (*degré de confiance moyen*). Toujours selon les projections, les risques d'épisodes de fortes précipitations devraient être plus élevés à 2 °C qu'à 1,5 °C de réchauffement planétaire dans plusieurs régions de hautes latitudes et/ou d'altitude élevée de l'hémisphère Nord, en Asie orientale et dans l'est de l'Amérique du Nord (degré de confiance moyen). Les fortes précipitations qui accompagnent les cyclones tropicaux devraient être plus intenses à 2 °C qu'à 1,5 °C de réchauffement planétaire (*degré de confiance moyen*). Les différences entre les projections des fortes précipitations à 2 °C et celles à 1,5 °C de réchauffement planétaire dans les autres régions sont généralement associées à un *degré de confiance faible*. Dans leur ensemble, agrégées à l'échelle du globe, les fortes précipitations devraient être plus intenses à 2 °C qu'à 1,5 °C de réchauffement planétaire (*degré de confiance moyen*). En conséquence des fortes précipitations, plus de terres émergées devraient être exposées à des risques de crue à 2 °C qu'à 1,5 °C de réchauffement planétaire (*degré de confiance moyen*). {3.3.1, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6}

B.2 À l'horizon 2100, l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C devrait être inférieure de 10 cm environ à celle correspondant à un réchauffement de 2 °C (*degré de confiance moyen*). L'élévation du niveau de la mer se poursuivra bien au-delà de 2100 (*degré de confiance élevé*), et l'ampleur et le rythme de cette élévation dépendra des trajectoires future des émissions. Un ralentissement de l'élévation du niveau de la mer offre de meilleures possibilités d'adaptation pour les systèmes humains et écologiques des petites îles, des zones côtières de faible altitude et des deltas (*degré de confiance moyen*). {3.3, 3.4, 3.6}

B.2.1 Les projections fournies par les modèles pour ce qui concerne l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe (par rapport à la période 1986-2005) suggèrent une fourchette indicative de 26 à 77 cm d'ici à 2100 pour un réchauffement planétaire de 1,5 °C, soit 10 cm (4 à 16 cm) de moins que pour un réchauffement planétaire de 2 °C (*degré de confiance moyen*). Une diminution de 10 cm de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle du globe signifie que, d'après les estimations concernant la population en 2010 et sans tenir compte de l'adaptation, jusqu'à 10 millions de personnes de moins seraient exposées aux risques associés (*degré de confiance moyen*). {3.4.4, 3.4.5, 4.3.2}

---

7 Robuste signifie ici qu'au moins les deux tiers des modèles climatiques montrent le même signe de changement à l'échelle du point de grille et que les différences concernant de grandes régions sont statistiquement significatives.

8 Les changements anticipés dans les impacts correspondant aux différents niveaux de réchauffement planétaire sont déterminés par rapport aux variations de la température moyenne de l'air à la surface du globe.

B.2.2 L'élévation du niveau de la mer se poursuivra au-delà de 2100 même si le réchauffement planétaire ne dépasse pas 1,5 °C au XXIe siècle (*degré de confiance élevé*). La déstabilisation de secteurs potentiellement instables de la calotte polaire de l'Antarctique et/ou la perte irréversible de la calotte glaciaire du Groenland pourraient provoquer une élévation de plusieurs mètres du niveau de la mer à des échelles de temps allant du siècle au millénaire. Ces phénomènes d'instabilité pourraient être déclenchés aux alentours de 1,5 °C à 2 °C de réchauffement planétaire (*degré de confiance moyen*). (figure RID.2) {3.3.9, 3.4.5, 3.5.2, 3.6.3, encadré 3.3}

B.2.3 L'intensification du réchauffement amplifie l'exposition des petites îles, des zones côtières de faible altitude et des deltas aux risques liés à l'élévation du niveau de la mer pour de nombreux systèmes humains et écologiques, et notamment à l'accroissement des invasions d'eau salée, des inondations et des dégâts causés aux infrastructures (*degré de confiance élevé*). Les risques liés à l'élévation du niveau de la mer sont plus élevés à 2 °C qu'à 1,5 °C de réchauffement planétaire. Le ralentissement de l'élévation du niveau de la mer en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C réduit ces risques et offre donc de meilleures possibilités d'adaptation, notamment pour ce qui concerne la gestion et la remise en état des écosystèmes côtiers naturels et le renforcement des infrastructures (*degré de confiance moyen*). (figure RID.2) {3.4.5, encadré 3.5}

B.3 Sur les terres émergées, selon les projections, les impacts sur la biodiversité et les écosystèmes, y compris la disparition et l'extinction d'espèces, devraient être plus limitées à 1,5 °C qu'à 2 °C de réchauffement planétaire. La limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C devrait donner lieu à des impacts moindres sur les écosystèmes terrestres, d'eau douce et côtiers et mieux préserver les services qu'ils rendent aux êtres humains (*degré de confiance élevé*). (figure RID.2) {3.4, 3.5, encadré 3.4, encadré 4.2, encadré interchapitres 8 du chapitre 3}

B.3.1 Selon les projections, sur les 105 000 espèces étudiées,[9] 6 % des insectes, 8 % des plantes et 4 % des vertébrés devraient perdre plus de la moitié de l'aire de leur niche climatique en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C, en comparaison de 18 % des insectes, 16 % des plantes et 8 % des vertébrés en cas de réchauffement planétaire de 2 °C (*degré de confiance moyen*). Les impacts liées à d'autres risques pour la biodiversité tels que les incendies de forêt et la prolifération d'espèces invasives sont moins importants à 1,5 °C qu'à 2 °C de réchauffement planétaire (*degré de confiance élevé*). {3.4.3, 3.5.2}

B.3.2 Selon les projections, approximativement 4 % (intervalle interquartile : 2-7 %) des terres émergées mondiales devraient faire l'objet d'une transformation des écosystèmes d'un type à un autre à 1 °C de réchauffement planétaire, par rapport à 13 % (intervalle interquartile : 8-20 %) à 2 °C (*degré de confiance moyen*). Cela signifie que la superficie menacée est approximativement réduite de moitié en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport à un réchauffement de 2 °C (*degré de confiance moyen*). {3.4.3.1, 3.4.3.5}

B.3.3 Aux latitudes élevées, la toundra et les forêts boréales sont particulièrement exposées à une dégradation et à une disparition dues au changement climatique, avec une colonisation de la toundra par une végétation arbustive ligneuse qui est déjà en cours (*degré de confiance élevé*) et qui se poursuivra avec l'intensification du réchauffement. Selon les projections, la limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C devrait empêcher pendant plusieurs siècles le dégel du pergélisol sur une superficie comprise entre 1,5 et 2,5 millions de km^2 à l'échelle de plusieurs siècles (*degré de confiance moyen*). {3.3.2, 3.4.3, 3.5.5}

B.4 Selon les projections, la limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C devrait réduire la hausse de la température des océans ainsi que l'augmentation associée de leur acidité et la diminution de leur oxygénation (*degré de confiance élevé*). En conséquence, la limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C devrait réduire les risques pour la biodiversité marine, les pêches et les écosystèmes marins, y compris leurs fonctions écologiques et les services qu'ils rendent aux êtres humains, comme l'illustrent les changements récents dont font l'objet les écosystèmes des glaces de mer dans l'Arctique et des récifs coralliens des eaux chaudes (*degré de confiance élevé*). {3.3, 3.4, 3.5, encadré 3.4, encadré 3.5}

B.4.1 On attache un *degré de confiance élevé* au fait que la probabilité d'un océan Arctique sans glaces de mer pendant l'été est considérablement plus faible à 1,5 °C de réchauffement planétaire qu'à 2 °C. Ainsi, selon les projections, il ne devrait y avoir qu'un seul été arctique sans glace de mer par siècle en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C. Cette fréquence passe à au moins un été par décennie en cas de réchauffement planétaire de 2 °C. Les effets d'un dépassement temporaire sont réversibles pour ce qui concerne l'étendue des glaces de mer dans l'Arctique à des échelles de temps décennales (*degré de confiance élevé*). {3.3.8, 3.4.4.7}

B.4.2 Selon les projections, un réchauffement planétaire de 1,5 °C devrait déplacer les aires de distribution de nombreuses espèces marines vers des latitudes plus élevées et aggraver les dommages infligés à de nombreux écosystèmes. Il devrait aussi entraîner la perte de ressources côtières et réduire la productivité des pêches et de l'aquaculture (notamment aux basses latitudes). Les risques d'impact d'origine climatique devraient être plus élevés à 2 °C de réchauffement planétaire qu'à 1,5 °C (*degré de confiance élevé*). La dégradation des récifs coralliens, par exemple, devrait se poursuivre et toucher 70 à 90 % d'entre eux en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C

9 Conformément aux études antérieures, des chiffres illustratifs ont été adoptés à partir d'une méta-étude récente.

(*degré de confiance élevé*), avec des pertes encore plus importantes (supérieures à 99 %) en cas de réchauffement de 2 °C (*degré de confiance très élevé*). Le risque de perte irréversible de nombreux écosystèmes marins et côtiers augmente avec le réchauffement planétaire, en particulier si celui-ci atteint 2 °C ou plus (*degré de confiance élevé*). {3.4.4, encadré 3.4}

B.4.3 Selon les projections, le degré d'acidification des océans dû à l'augmentation de la concentration de CO_2 correspondant à un réchauffement planétaire de 1,5 °C devrait amplifier les effets néfastes du réchauffement – et même les amplifier davantage en cas de réchauffement de 2 °C –, notamment sur la croissance, le développement, la calcification, la survie et, par conséquent, l'abondance d'un grand nombre d'espèces allant par exemple des algues aux poissons (*degré de confiance élevé*). {3.3.10, 3.4.4}

B.4.4 Les impacts du changement climatique dans les océans augmentent les risques pour les pêcheries et l'aquaculture par suite de leurs répercussions sur la physiologie, la survie, l'habitat, la reproduction, l'impact des maladies et le risque d'espèces invasives (*degré de confiance moyen*), mais, selon les projections, devraient être moindres à 1,5 °C de réchauffement planétaire qu'à 2 °C. Un modèle mondial des pêcheries a, par exemple, projeté une diminution des prises annuelles mondiales pour les pêches maritimes d'environ 1,5 million de tonnes en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C et de plus de 3 millions de tonnes en cas de réchauffement de 2 °C (*degré de confiance moyen*). {3.4.4, encadré 3.4}

B.5 Selon les projections, les risques liés au climat pour la santé, les moyens de subsistance, la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau, la sécurité des personnes et la croissance économique devraient augmenter en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C, et même davantage en cas de réchauffement de 2 °C (figure RID.2). {3.4, 3.5, 5.2, encadré 3.2, encadré 3.3, encadré 3.5, encadré 3.6, encadré interchapitres 6 du chapitre 3, encadré interchapitres 9 du chapitre 4, encadré interchapitres 12 du chapitre 5, 5.2}

B.5.1 Les populations défavorisées et vulnérables, certains peuples autochtones et les communautés locales tributaires de moyens de subsistance liés à l'agriculture et aux ressources côtières sont exposées de façon disproportionnée aux conséquences néfastes du réchauffement planétaire de 1,5 °C et plus (*degré de confiance élevé*). Les régions confrontées à un tel risque comprennent les écosystèmes arctiques, les zones arides, les petits États insulaires en développement et les pays les moins avancés (*degré de confiance élevé*). La pauvreté et les préjudices devraient augmenter dans certaines populations à mesure que le réchauffement planétaire s'intensifie ; la limitation du réchauffement à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C pourrait, à l'horizon 2050, réduire de plusieurs centaines de millions le nombre de personnes exposées aux risques liés au climat et vulnérables à la pauvreté (*degré de confiance moyen*) {3.4.10, 3.4.11, encadré 3.5, encadré interchapitres 6 du chapitre 3, encadré interchapitres 9 du chapitre 4, encadré interchapitres 12 du chapitre 5, 4.2.2.2, 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, 5.6.3}

B.5.2 Selon les projections, toute augmentation du réchauffement planétaire devrait affecter la santé, avec des conséquences principalement négatives (*degré de confiance élevé*). Les risques devraient être moins importants à 1,5 °C qu'à 2 °C de réchauffement pour ce qui concerne la morbidité et la mortalité liées à la chaleur (*degré de confiance très élevé*) et la mortalité liée à l'ozone si les émissions nécessaires à la formation d'ozone restent élevées (*degré de confiance élevé*). Les îlots de chaleur urbains amplifient souvent l'impact des vagues de chaleur dans les villes (*degré de confiance élevé*). D'après les projections, les risques associés à certaines maladies à transmission vectorielle telles que le paludisme ou la dengue devraient s'accroître avec un réchauffement passant de 1,5 °C à 2 °C, y compris par suite de déplacements potentiels de l'aire d'extension géographique de ces maladies (*degré de confiance élevé*). {3.4.7, 3.4.8, 3.5.5.8}

B.5.3 D'après les projections, la limitation du réchauffement à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C devrait donner lieu à une réduction moins marquée du rendement des cultures de maïs, de riz et de blé et, potentiellement, des autres cultures céréalières, notamment en Afrique subsaharienne, en Asie du Sud-Est et en Amérique centrale et du Sud, ainsi que de la qualité nutritionnelle – qui dépend de la concentration de CO_2 – du riz et du blé (*degré de confiance élevé*). Les projections de réduction des disponibilités alimentaires sont plus marquées à 2 °C qu'à 1,5 °C de réchauffement planétaire dans le Sahel, en Afrique australe, dans le bassin méditerranéen, en Europe centrale et en Amazonie (*degré de confiance moyen*). D'après les projections, la hausse des températures devrait avoir un effet négatif sur l'élevage, subordonné à l'ampleur des changements de qualité des aliments pour animaux, à la propagation des maladies et à la disponibilité des ressources en eau (*degré de confiance élevé*). {3.4.6, 3.5.4, 3.5.5, encadré 3.1, encadré interchapitres 6 du chapitre 3, encadré interchapitres 9 du chapitre 4}

B.5.4 Selon l'évolution future de la situation socio-économique, la limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C pourrait réduire de 50 % la fraction de la population mondiale exposée à une intensification du stress hydrique due au changement climatique, malgré la grande variabilité entre les régions (*degré de confiance moyen*). De nombreux petits États insulaires en développement devraient en outre faire face à un stress hydrique moins marqué par suite des variations anticipées de l'aridité si le réchauffement planétaire était limité à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C (*degré de confiance moyen*). {3.3.5, 3.4.2, 3.4.8, 3.5.5, encadré 3.2, encadré 3.5, encadré interchapitres 9 du chapitre 4}

B.5.5 D'après les projections, d'ici la fin du siècle, les risques pour la croissance économique mondiale dans son ensemble dus aux impacts du changement climatique devraient être moindres à 1,5 °C qu'à 2 °C de réchauffement planétaire[10] (*degré de confiance moyen*). Cela ne tient pas compte des coûts de l'atténuation ni des investissements en matière d'adaptation et des avantages que celle-ci procure. Selon les projections, les pays de la zone tropicale et des régions subtropicales de l'hémisphère Sud devraient faire face aux plus forts impacts du changement climatique sur la croissance économique en cas d'augmentation du réchauffement planétaire de 1,5 °C à 2 °C (*degré de confiance moyen*). {3.5.2, 3.5.3}

B.5.6 L'exposition aux risques multiples et complexes liés au changement climatique augmente entre 1,5 °C et 2 °C de réchauffement planétaire, avec une plus grande proportion de la population exposée à ces risques et à la pauvreté en Afrique et en Asie (*degré de confiance élevé*). En cas de réchauffement planétaire compris entre 1,5 °C et 2 °C, les risques concernant les secteurs de l'énergie, de l'alimentation et de l'eau pourraient se chevaucher dans l'espace et dans le temps, aggravant ainsi les dangers, les expositions et les vulnérabilités actuels et créant de nouveaux risques dont un nombre accru de personnes et de régions pourraient subir les effets (*degré de confiance moyen*). {Encadré 3.5, 3.3.1, 3.4.5.3, 3.4.5.6, 3.4.11, 3.5.4.9}

B.5.7 De nombreuses sources de données suggèrent que, depuis le cinquième Rapport d'évaluation (AR5), les niveaux évalués de risque ont augmenté pour quatre des cinq motifs de préoccupation dans la perspective d'un réchauffement planétaire de 2 °C (*degré de confiance élevé*). L'évolution du niveau de risque selon le degré de réchauffement planétaire est maintenant la suivante : d'« élevé » à « très élevé » entre 1,5 °C et 2 °C de réchauffement en ce qui concerne le premier motif de préoccupation (Systèmes uniques et menacés) (*degré de confiance élevé*) ; de « moyen » à « élevé » entre 1 °C et 1,5 °C en ce qui concerne le deuxième motif de préoccupation (Phénomènes météorologiques extrêmes) (*degré de confiance moyen*) ; de « moyen » à « élevé » entre 1,5 °C et 2 °C en ce qui concerne le troisième motif de préoccupation (Répartition des impacts) (*degré de confiance élevé*) ; de « moyen » à « élevé » entre 1,5 °C et 2,5 °C en ce qui concerne le quatrième motif de préoccupation (Impacts mondiaux cumulés) (*degré de confiance moyen*) ; et de « moyen » à « élevé » entre 1 °C et 2,5 °C en ce qui concerne le cinquième motif de préoccupation (Phénomènes particuliers de grande échelle) (*degré de confiance moyen*) (figure RID.2). {3.4.13, 3.5, 3.5.2}

B.6 La plupart des besoins en matière d'adaptation seront moindres à 1,5 °C de réchauffement planétaire qu'à 2 °C (*degré de confiance élevé*). Il existe un large éventail d'options en matière d'adaptation susceptibles de réduire les risques liés au changement climatique (*degré de confiance élevé*). Il existe aussi des limites en matière d'adaptation et de capacité d'adaptation pour certains systèmes humains et naturels en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C, avec des pertes associées (*degré de confiance moyen*). Le nombre et la disponibilité des options en matière d'adaptation varient selon les secteurs (*degré de confiance moyen*). {Tableau 3.5, 4.3, 4.5, encadré interchapitres 9 du chapitre 4, encadré interchapitres 12 du chapitre 5}

B.6.1 Il existe un large éventail d'options en matière d'adaptation destinées à réduire les risques concernant les écosystèmes naturels et gérés (adaptation fondée sur les écosystèmes, remise en état des écosystèmes, mesures de lutte contre la dégradation et le déboisement, gestion de la biodiversité, aquaculture durable, savoir local et savoir autochtone, etc.), les risques associés à l'élévation du niveau de la mer (protection et consolidation du littoral, etc.) et les risques concernant la santé, les moyens de subsistance, l'alimentation, l'eau et la croissance économique, en particulier dans les espaces ruraux (irrigation efficace, filets de protection sociale, gestion des risques de catastrophe, répartition et partage des risques, adaptation communautaire, etc.) et en milieu urbain (infrastructure verte, utilisation et aménagement durables des sols, gestion durable des ressources en eau, etc.) (*degré de confiance moyen*). {4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.5, 4.5.3, 4.5.4, 5.3.2, encadré 4.2, encadré 4.3, encadré 4.6, encadré interchapitres 9 du chapitre 4}

B.6.2 L'adaptation des écosystèmes et des systèmes alimentaires et de santé devrait être plus difficile à 2 °C de réchauffement planétaire qu'à 1,5 °C (*degré de confiance moyen*). Selon les projections, certaines régions vulnérables, dont les petites îles et les pays les moins avancés, devraient faire face à d'importants et multiples risques climatiques interdépendants, même en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C (*degré de confiance élevé*). {3.3.1, 3.4.5, encadré 3.5, tableau 3.5, encadré interchapitres 9 du chapitre 4, 5.6, encadré interchapitres 12 du chapitre 5, encadré 5.3}

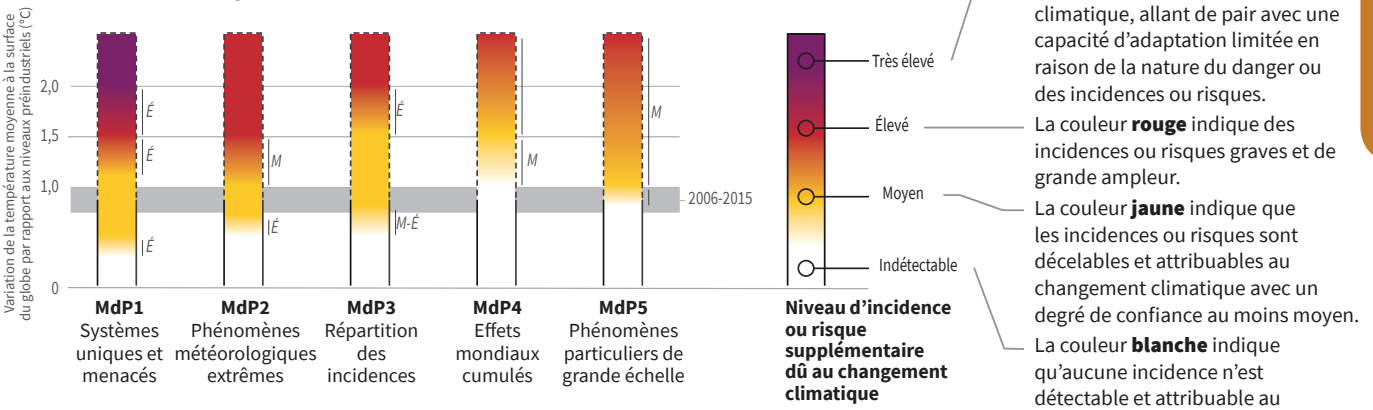
B.6.3 Il existe des limites en matière de capacité d'adaptation en cas de réchauffement planétaire de 1,5 °C, qui deviennent plus prononcées à des niveaux supérieurs de réchauffement et qui varient selon les secteurs, avec des conséquences propres au lieu considéré pour les populations vulnérables, les écosystèmes et la santé (*degré de confiance moyen*). {Encadré interchapitres 12 du chapitre 5, encadré 3.5, tableau 3.5}

10 En l'occurrence, les impacts sur la croissance économique se réfèrent aux variations du produit intérieur brut (PIB). De nombreux impacts tels que la perte de vies humaines, du patrimoine culturel et des services fournis par les écosystèmes sont difficiles à évaluer, en particulier sur le plan monétaire.

Manière dont le niveau du réchauffement planétaire influe sur les incidences et/ou les risques associés aux motifs de préoccupation (MdP) et à un certain nombre de systèmes naturels, gérés et humains

Cinq motifs de préoccupation (MdP) illustrent les incidences et les risques associés à différents niveaux de réchauffement planétaire pour les personnes, les systèmes économiques et les écosystèmes selon les secteurs et les régions.

Incidences et risques associés aux motifs de préoccupation (MdP)



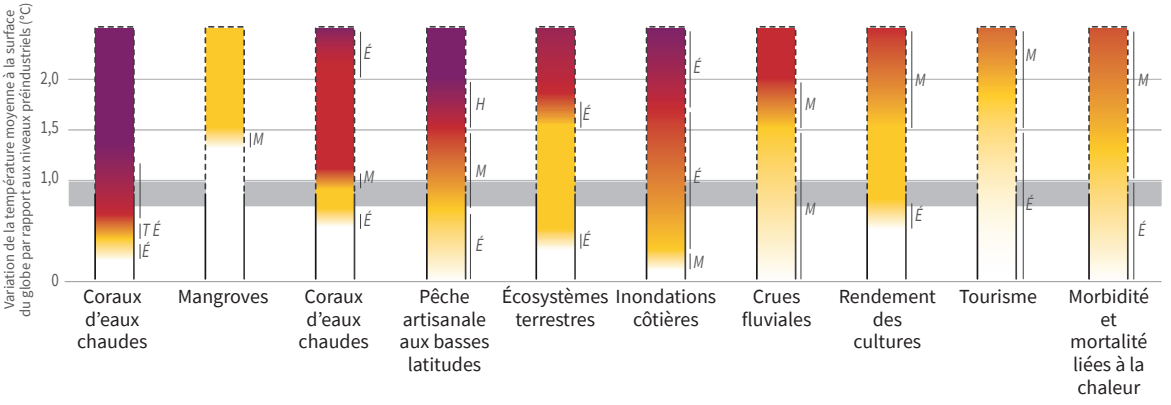
La couleur **violette** indique de très forts risques de graves incidences ou risques et la présence d'une irréversibilité marquée ou la persistance de dangers d'origine climatique, allant de pair avec une capacité d'adaptation limitée en raison de la nature du danger ou des incidences ou risques.

La couleur **rouge** indique des incidences ou risques graves et de grande ampleur.

La couleur **jaune** indique que les incidences ou risques sont décelables et attribuables au changement climatique avec un degré de confiance au moins moyen.

La couleur **blanche** indique qu'aucune incidence n'est détectable et attribuable au changement climatique.

Incidences et risques pour un certain nombre de systèmes naturels, gérés et humains



Degré de confiance pour la transition : F = faible, M = moyen, É = élevé, TÉ = très élevé

Figure RID.2 | Cinq motifs de préoccupation (MdP) intégrés fournissent un cadre pour un résumé des impacts et risques majeurs par secteur et par région et ont été présentés pour la première fois dans le troisième Rapport d'évaluation. Les MdP illustrent les conséquences du réchauffement planétaire pour les personnes, l'économie et les écosystèmes. Les impacts et/ou les risques propres à chaque MdP sont fondés sur l'évaluation de publications récentes. Comme dans le cinquième Rapport d'évaluation, ces publications ont servi à formuler des avis d'experts afin de déterminer les niveaux de réchauffement planétaire auxquels l'impact et/ou le risque sont indétectables, moyens, élevés ou très élevés. Dans le graphique du bas, le choix des impacts et des risques associés aux systèmes naturels, gérés ou humains est donné à titre illustratif et ne prétend nullement à l'exhaustivité. {3.4, 3.5, 3.5.2.1, 3.5.2.2, 3.5.2.3, 3.5.2.4, 3.5.2.5, 5.4.1, 5.5.3, 5.6.1, encadré 3.4}

MdP 1 (Systèmes uniques et menacés) : Systèmes écologiques et humains dont l'aire d'extension géographique a été restreinte par les conditions d'ordre climatique et qui ont un endémisme élevé ou d'autres propriétés distinctives. Ces systèmes comprennent les récifs coralliens, l'Arctique et ses peuples autochtones, les glaciers de montagne et les points chauds de la biodiversité.

MdP 2 (Phénomènes météorologiques extrêmes) : Risques ou impacts des phénomènes météorologiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, les fortes pluies, la sécheresse et les incendies de forêt connexes et les inondations côtières pour ce qui concerne la santé, les moyens de subsistance, les biens et les écosystèmes.

MdP 3 (Répartition des impacts) : Risques ou impacts qui touchent de façon disproportionnée des groupes particuliers en raison de la répartition inégale des dangers, de l'exposition et de la vulnérabilité à l'égard du changement climatique physique.

MdP 4 (Impacts mondiaux cumulés) : Préjudice monétaire mondial, dégradation et disparition à l'échelle du globe des écosystèmes et de la biodiversité.

MdP 5 (Phénomènes particuliers de grande échelle) : Changements systémiques d'ampleur relativement grande, soudains et parfois irréversibles qui sont causés par le réchauffement planétaire, tels que la désintégration des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique.

C. Trajectoires d'émissions et transitions systémiques compatibles avec un réchauffement planétaire de 1,5 °C

C.1 Dans les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime, les émissions anthropiques mondiales nettes de CO_2 diminuent d'environ 45 % depuis les niveaux de 2010 jusqu'en 2030 (intervalle interquartile : 40-60 %), devenant égales à zéro vers 2050 (intervalle interquartile : 2045-2055). Pour limiter le réchauffement planétaire à moins de 2 °C,[11] les émissions de CO_2 devraient diminuer d'environ 25 % d'ici à 2030 dans la plupart des trajectoires (intervalle interquartile : 10-30 %) et devenir nulles vers 2070 (intervalle interquartile : 2065-2080). Dans les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C, les émissions de gaz autres que le CO_2 font l'objet de fortes réductions, d'ampleurs équivalentes à celles figurant dans les trajectoires qui limitent le réchauffement à 2 °C (*degré de confiance élevé*). (figure RID.3a) {2.1, 2.3, tableau 2.4}

C.1.1 Les réductions des émissions de CO_2 qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime peuvent nécessiter différents éventails de mesures d'atténuation, réalisant différents équilibres entre la diminution de l'intensité énergétique et d'utilisation des ressources, le taux de décarbonisation et le recours à l'élimination du CO_2. Les divers éventails de mesures font face à des défis différents en matière de mise en œuvre, ainsi que des synergies et des compromis potentiels avec le développement durable (*degré de confiance élevé*) (figure RID.3b). {2.3.2, 2.3.4, 2.4, 2.5.3}

C.1.2 Les trajectoires modélisées qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime nécessitent d'importantes réductions des émissions de méthane et de carbone suie (35 % ou plus dans les deux cas d'ici à 2050 par rapport à 2010). Ils prévoient aussi la réduction de la plupart des aérosols qui ont un effet refroidissant sur le climat, ce qui neutralise en partie les effets des mesures d'atténuation pendant deux à trois décennies. Les émissions de gaz autres que le CO_2 peuvent être réduites à l'aide de mesures d'atténuation de grande ampleur dans le secteur de l'énergie. De plus, des mesures d'atténuation ciblées des émissions de gaz autres que le CO_2[12] peuvent réduire le protoxyde d'azote et le méthane issus de l'agriculture, le méthane émis par le secteur des déchets, certaines sources de carbone suie et les hydrofluorocarbones. La forte demande de bioénergie peut augmenter les émissions de protoxyde d'azote dans certaines trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C, ce qui souligne à quel point il importe d'adopter des méthodes de gestion appropriées. L'amélioration de la qualité de l'air résultant des réductions anticipées de nombreuses émissions de gaz autres que le CO_2 apporte des avantages directs et immédiats pour la santé publique dans toutes les trajectoires modélisées axées sur l'objectif de 1,5 °C (*degré de confiance élevé*). (figure RID.3a) {2.2.1, 2.3.3, 2.4.4, 2.5.3, 4.3.6, 5.4.2}

C.1.3 Limiter le réchauffement planétaire impose de limiter le total des émissions anthropiques mondiales cumulées de CO_2 depuis l'époque préindustrielle, c'est-à-dire de rester dans les limites d'un budget carbone total (*degré de confiance élevé*).[13] Selon les estimations, à la fin de l'année 2017, les émissions anthropiques de CO_2 depuis l'époque préindustrielle avaient réduit le budget carbone total pour l'objectif de 1,5 °C d'environ 2 200 ± 320 $GtCO_2$ (*degré de confiance moyen*). Le budget carbone restant qui en résulte est encore grevé par les émissions actuelles de 42 ± 3 $GtCO_2$ par an (*degré de confiance élevé*). Le choix de la méthode de mesure de la température mondiale influe sur l'estimation du budget carbone restant. En utilisant la température moyenne de l'air à la surface du globe comme dans le cinquième Rapport d'évaluation, on obtient un budget carbone restant estimé à 580 $GtCO_2$ pour une probabilité de 50 % de parvenir à limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C et à 420 $GtCO_2$ pour une probabilité de 66 % (*degré de confiance moyen*).[14] En revanche, si l'on utilise la température moyenne à la surface du globe, on obtient un budget carbone restant estimé à 770 $GtCO_2$ et 570 $GtCO_2$ pour une probabilité de 50 % et de 66 %, respectivement (*degré de confiance moyen*).[15] Les incertitudes concernant les estimations de ces budgets carbone restants sont importantes et dépendent de plusieurs facteurs. Les incertitudes qui ont trait à la réponse du climat aux émissions de CO_2 et d'autres gaz que le CO_2 représentent ± 400 $GtCO_2$ et celles qui concernent le niveau de réchauffement historique, ± 250 $GtCO_2$ (*degré de confiance moyen*). Le dégagement potentiel de carbone supplémentaire par suite du dégel futur du pergélisol et le dégagement de méthane provenant des terres humides pourraient réduire les budgets de 100 $GtCO_2$ au cours de ce siècle et d'une quantité supérieure par la suite (*degré de confiance moyen*). De plus, le niveau futur d'atténuation des émissions d'autres gaz que le CO_2 pourrait modifier le budget carbone de 250 $GtCO_2$ dans un sens ou dans l'autre (*degré de confiance moyen*). {1.2.4, 2.2.2, 2.6.1, tableau 2.2, compléments d'information du chapitre 2}

---

11 Les références aux trajectoireslimitant le réchauffement planétaire à 2 °C sont fondées sur une probabilité de 66 % de ne pas dépasser 2 °C.

12 Les émissions de gaz autres que le CO_2 mentionnées dans le présent rapport sont toutes les émissions anthropiques de gaz autres que le CO_2 qui entraînent un forçage radiatif. Ce sont notamment les facteurs de forçage climatique à courte durée de vie tels que le méthane, certains gaz fluorés, les précurseurs de l'ozone, les aérosols ou les précurseurs d'aérosols comme, respectivement, le carbone suie et le dioxyde de soufre ainsi que les gaz à effet de serre à longue durée de vie tels que le protoxyde d'azote et quelques gaz fluorés. Le forçage radiatif résultant des émissions de gaz autres que le CO_2 et des variations de l'albédo de la surface est qualifié de forçage radiatif autre que celui dû au CO_2. {2.2.1}

13 Il existe une base scientifique probante à l'appui d'un budget carbone total compatible avec la limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C. Cependant, ni ce budget carbone total, ni la fraction de ce budget correspondant aux émissions passées ne sont évalués dans le présent rapport.

14 Indépendamment de la méthode de mesure de la température mondiale utilisée, l'actualisation des connaissances et le perfectionnement des méthodes ont abouti à une augmentation d'environ 300 $GtCO_2$ du budget carbone restant estimé par rapport aux chiffres figurant dans le cinquième Rapport d'évaluation. (degré de confiance moyen) {2.2.2}

15 Ces estimations sont fondées sur la température moyenne observée à la surface du globe et évaluent les variations futures de la température au moyen des valeurs de la température de l'air à proximité de la surface.

C.1.4 Les mesures visant à la modification du rayonnement solaire ne sont prises en compte dans aucune des trajectoires d'émissions compatibles évaluées dans ce rapport. Bien que certaines de ces mesures puissent en théorie permettre d'atténuer un éventuel dépassement du seuil de 1,5 °C, elles se heurtent à de grandes incertitudes et lacunes de connaissances ainsi qu'à des risques importants et à des contraintes institutionnelles et sociales limitant leur déploiement, liées à la gouvernance, à l'éthique et aux impacts sur le développement durable. En outre, elles ne contribuent pas à atténuer l'acidification des océans (*degré de confiance moyen*). {4.3.8, encadré interchapitres 10 du chapitre 4}

Caractéristiques des trajectoires des émissions mondiales

Caractéristiques générales de l'évolution des émissions nettes anthropiques de CO_2, et total des émissions de méthane, de carbone suie et de protoxyde d'azote dans les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec dépassement minime. Les émissions nettes sont définies comme étant les émissions anthropiques moins les volumes éliminés par l'être humain. Il est possible de réduire les émissions nettes grâce à différents ensembles de mesures d'atténuation (voir figure RID3b).

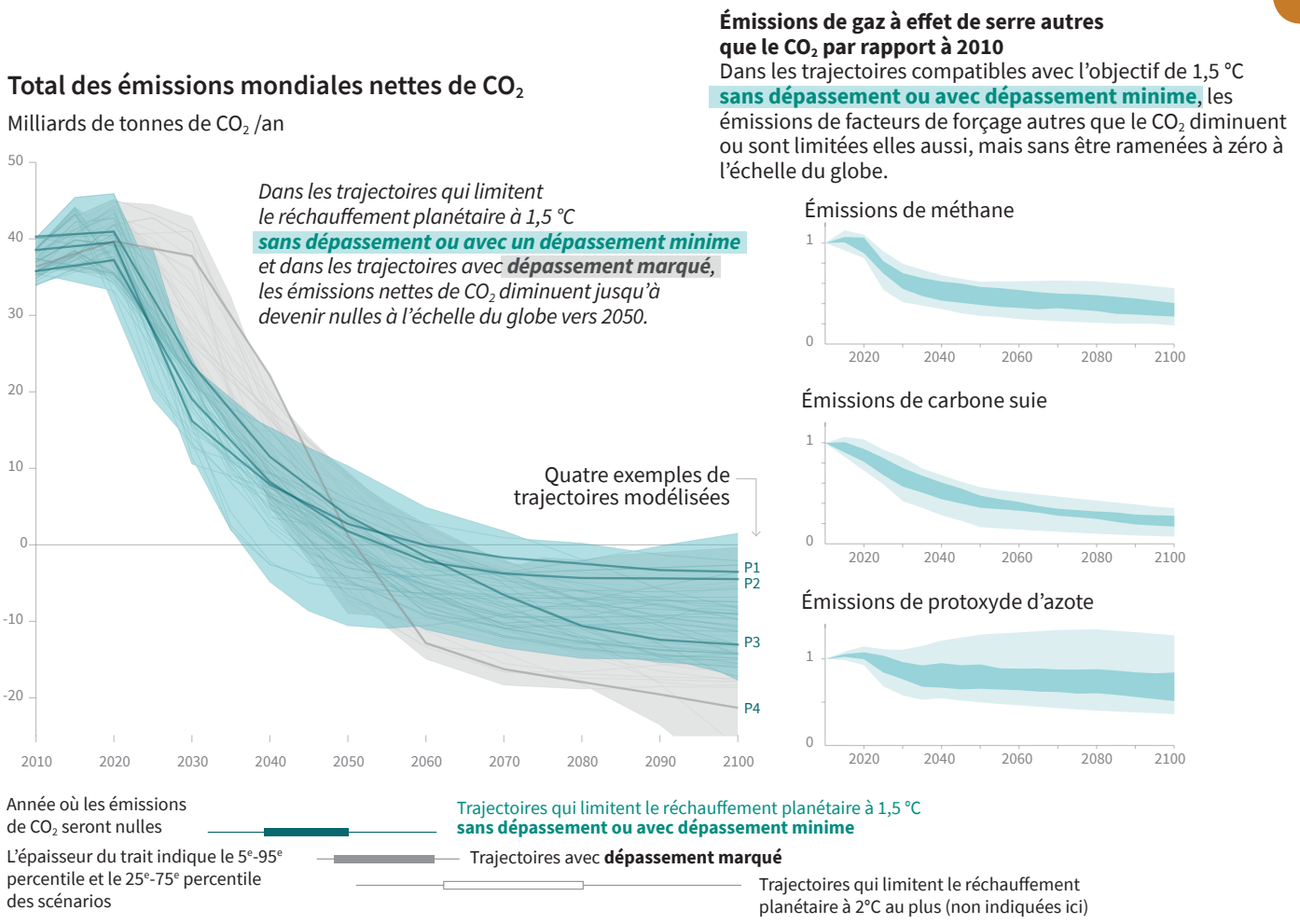
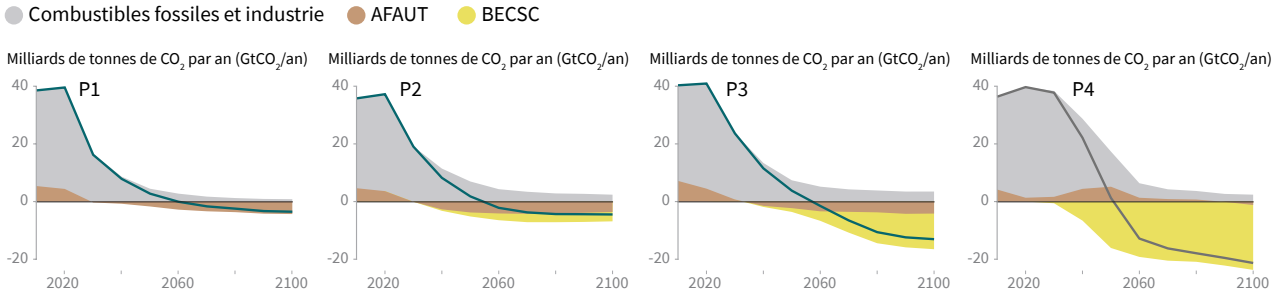


Figure RID.3a | Caractéristiques des trajectoires d'émissions mondiales. Le graphique principal montre les émissions mondiales nettes de CO_2 d'origine humaine pour des trajectoires d'émissions mondiales compatibles avec un réchauffement planétaire limité à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime (moins de 0,1 °C) et des trajectoires à dépassement marqué. La zone ombrée montre l'ensemble de la fourchette pour ce qui est des trajectoires d'émissions mondiales analysées dans le présent rapport. Quant aux graphiques sur la droite, ils représentent les fourchettes d'émission de gaz à effet de serre autres que le CO_2 pour trois composés dont l'effet de forçage est historiquement marqué et dont les émissions proviennent pour une large part de sources distinctes de celles qui sont directement concernées par les mesures d'atténuation du CO_2. Sur ces graphiques, les zones ombrées représentent l'intervalle 5-95 % (gris clair) et l'intervalle interquartile (gris foncé) pour les trajectoires d'émissions compatibles avec un réchauffement planétaire de 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime. Les boîtes à moustache au bas de la figure montrent à quel moment les émissions nettes de CO_2 deviendront égales à zéro, et aussi, à titre de comparaison, les trajectoires d'émissions mondiales correspondant à un réchauffement planétaire limité à 2 °C, avec une probabilité d'au moins 66 %. Le graphique principal met en évidence quatre exemples de trajectoires modélisées, P1, P2, P3 et P4, qui correspondent aux trajectoires LED, S1, S2, et S5 évalués au chapitre 2. Les caractéristiques de ces trajectoires d'émissions mondiales sont décrites dans la figure RID.3b {2.1, 2.2, 2.3, figure 2.5, figure 2.10, figure 2.11}.

Trajectoires modélisées : quatre exemples détaillés

Différentes stratégies d'atténuation peuvent permettre de réduire les émissions nettes qui seraient nécessaires pour concrétiser une trajectoire qui limite le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime. Toutes les trajectoires prévoient l'élimination du dioxyde de carbone (EDC), mais la quantité éliminée varie selon les trajectoires, tout comme les contributions relatives de la bioénergie avec captage et stockage du dioxyde de carbone (BECSC) et les éliminations réalisées dans le secteur de l'agriculture, de la foresterie et des autres utilisations des terres (AFAUT), ce qui a des incidences sur les émissions et plusieurs autres caractéristiques des trajectoires.

Détail des contributions aux émissions nettes mondiales de CO_2 pour quatre exemples de trajectoires modélisées



P1 : Scénario selon lequel les innovations sociales, commerciales et technologiques engendrent une réduction de la demande d'énergie jusqu'en 2050 alors que les conditions de vie s'améliorent, en particulier dans l'hémisphère Sud. Un système énergétique de moindre envergure permet une décarbonisation rapide de l'énergie fournie. Le boisement est la seule option d'EDC retenue ; il n'est pas fait recours aux combustibles fossiles avec captage et stockage du dioxyde de carbone (CSC) ni à la BECSC.

P2 : Scénario qui met beaucoup l'accent sur la durabilité, y compris l'intensité énergétique, le développement humain, la convergence économique et la coopération internationale, ainsi qu'une réorientation vers des modes de consommation durables et robustes, des innovations technologiques à faible intensité de carbone et des systèmes d'utilisation des terres bien gérés, avec une acceptabilité sociétale limitée pour ce qui est de la BECSC.

P3 : Scénario intermédiaire selon lequel le développement sociétal comme le développement technologique suivent des schémas habituels. La réduction des émissions s'obtient principalement par une modification de la façon dont l'énergie et les produits sont obtenus et, dans une moindre mesure, par une réduction de la demande.

P4 : Scénario à forte intensité de ressources et d'énergie selon lequel la croissance économique et la mondialisation aboutissent à l'adoption à grande échelle de modes de vie à forte intensité de GES, y compris une forte demande de carburants et de produits de l'élevage. La réduction des émissions s'obtient principalement par des moyens technologiques qui font un usage intensif de l'EDC au moyen de la BECSC.

Indicateurs mondiaux	P1	P2	P3	P4	**Intervalle interquartile**
Types de trajectoires	Sans dépassement ou avec dépassement minime	Sans dépassement ou avec dépassement minime	Sans dépassement ou avec dépassement minime	Dépassement marqué	Sans dépassement ou avec dépassement minime
Évolution des émissions de CO_2 en 2030 (% vs 2010)	-58	-47	-41	-4	(-58;-40)
↳ en 2050 (% vs 2010)	-93	-95	-91	-97	(-107;-94)
Émissions de GES – Prot. de Kyoto en 2030 (% vs 2010)*	-50	-49	-35	-2	(-51;-39)
↳ en 2050 (% vs 2010)	-82	-89	-78	-80	(-93;-81)
*Demande finale en matière d'énergie** en 2030 (% vs 2010)*	-15	-5	17	39	(-12;7)
↳ en 2050 (% vs 2010)	-32	2	21	44	(-11;22)
Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité en 2030 (%)	60	58	48		(47;65)
↳ en 2050 (%)	77	81	63	70	(69;86)
Énergie primaire issue du charbon en 2030 (% vs 2010)	-78	-61	-75	-59	(-78;-59)
↳ en 2050 (% vs 2010)	-97	-77	-73	-97	(-95;-74)
du pétrole en 2030 (% vs 2010)	-37	-13	-3	86	(-34;3)
↳ en 2050 (% vs 2010)	-87	-50	-81	-32	(-78;-31)
du gaz en 2030 (% vs 2010)	-25	-20	33	37	(-26;21)
↳ en 2050 (% vs 2010)	-74	-53	21	-48	(-56;6)
du nucléaire en 2030 (% vs 2010)	59	83	98	106	(44;102)
↳ en 2050 (% vs 2010)	150	98	501	468	(91;190)
de la biomasse en 2030 (% vs 2010)	-11	0	36	-1	(29;80)
↳ en 2050 (% vs 2010)	-16	49	121	418	(123;261)
d'énergies renouvelables non issues de la biomasse en 2030 (% vs 2010)	430	470	315	110	(245;436)
↳ en 2050 (% vs 2010)	833	1 327	878	1 137	(576;1 279)
CSC cumulé jusqu'en 2100 ($GtCO_2$)	0	348	687	1 218	(550;1 017)
↳ dont BECSC ($GtCO_2$)	0	151	414	1 191	(364;662)
Superficie des cultures bioénergétiques en 2050 (millions de km^2)	0,2	0,9	2,8	7,2	(1,5;3,2)
Émissions agricoles de CH_4 en 2030 (% vs 2010)	-24	-48	1	14	(-30;-11)
↳ en 2050 (% vs 2010)	-33	-69	-23	2	(-47;-24)
Émissions agricoles de N_2O en 2030 (% vs 2010)	5	-26	15	3	(-21;-3)
↳ en 2050 (% vs 2010)	6	-26	0	39	(-26;1)

NOTE: Les indicateurs ont été choisis de façon à refléter les tendances mondiales définies dans l'évaluation du Chapitre 2. Les caractéristiques nationales et sectorielles peuvent s'écarter considérablement des tendances mondiales indiquées ici.

* Les émissions de gaz définis dans le Protocole de Kyoto sont fondées sur les valeurs du potentiel de réchauffement planétaire sur 100 ans figurant dans le deuxième Rapport d'évaluation du GIEC (SAR GWP-100).

** L'évolution de la demande en matière d'énergie est associée à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à des changements de comportement.

Figure RID.3b | Exemples détaillés de quatre trajectoires modélisées par rapport au réchauffement planétaire de 1,5 °C parmi l'ensemble présenté dans la figure RID.3a. Ces trajectoires, qui ont été choisies de façon à représenter un éventail de mesures d'atténuation susceptibles d'être mises en œuvre, varient nettement en ce qui concerne les projections relatives à l'énergie et à l'utilisation des terres, ainsi que les hypothèses concernant les développements socio-économiques futurs, y compris la croissance économique et démographique, l'équité et la durabilité. Les émissions mondiales nettes de CO_2 d'origine humaine ont été ventilées selon trois origines : combustibles fossiles et industrie, agriculture foresterie et autres utilisations de terres (AFAUT) et bioénergie avec captage et stockage du CO_2 (BECSC). Les estimations relatives à l'AFAUT données ici ne sont pas nécessairement comparables à celles effectuées pays par pays. D'autres caractéristiques relatives à chacune de ces trajectoires sont présentées en dessous. Ces trajectoires soulignent les grandes différences relatives des stratégies d'atténuation, mais ne représentent ni des estimations centrales ni des stratégies nationales. En outre, ils n'indiquent pas de critères d'exigence. À titre de comparaison, les intervalles interquartiles des trajectoires sans dépassement ou avec un dépassement minime de 1,5 °C sont indiqués dans la colonne de droite. Les trajectoires dénommées P1, P2, P3 et P4, correspondent aux trajectoires d'émissions mondiales évaluées dans le chapitre 2 sous la terminologie LED, S1, S2, et S5. (figure RID.3a) {2.2.1, 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.4.1, 2.4.2, 2.4.4, 2.5.3, figure 2.5, figure 2.6, figure 2.9, figure 2.10, figure 2.11, figure 2.14, figure 2.15, figure 2.16, figure 2.17, figure 2.24, figure 2.25, tableau 2.4, tableau 2.6, tableau 2.7, tableau 2.9, tableau 4.1}

C.2 Les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime exigeraient des transitions rapides et radicales dans les domaines de l'énergie, de l'aménagement des terres, de l'urbanisme, des infrastructures (y compris transports et bâtiments) et des systèmes industriels (*degré de confiance élevé*). Ces transitions systémiques sont sans précédent pour ce qui est de leur ampleur, mais pas nécessairement de leur rythme, et supposent des réductions considérables des émissions dans tous les secteurs, un large éventail d'options en matière d'atténuation et une hausse nette des investissements dans ces options (*degré de confiance moyen*). {2.3, 2.4, 2.5, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5}

C.2.1 Les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime font ressortir des changements de systèmes plus rapides et plus prononcés au cours des deux prochaines décennies que les trajectoires limitant le réchauffement planétaire à 2 °C (*degré de confiance élevé*). Le rythme des changements de systèmes associés à une limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime a été observé par le passé dans certains secteurs et contextes et pour des technologies spécifiques, mais il n'existe pas de données historiques quant à leur ampleur (*degré de confiance moyen*). {2.3.3, 2.3.4, 2.4, 2.5, 4.2.1, 4.2.2, encadré interchapitres 11 du chapitre 4}

C.2.2 S'agissant des systèmes énergétiques, en règle générale, les trajectoires mondiales modélisées (étudiées dans les publications scientifiques) qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime (pour de plus amples renseignements, voir la figure RID.3b) prévoient que la demande en matière de services énergétiques sera satisfaite au moyen d'une baisse de la consommation d'énergie, notamment grâce à une meilleure efficacité énergétique, et indiquent que la part de l'électricité dans l'énergie consommée au stade final augmentera plus rapidement par rapport aux trajectoires axées sur l'objectif de 2 °C (*degré de confiance élevé*). Dans les trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime, la part des sources d'énergie à faibles émissions est, selon les projections, plus élevée, par rapport aux trajectoires axées sur l'objectif de 2 °C, en particulier à l'horizon 2050 (*degré de confiance élevé*). Dans les trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime, les énergies renouvelables représentent, selon les projections, 70 à 85 % (intervalle interquartile) de la production d'électricité en 2050 (*degré de confiance élevé*). Toujours s'agissant de la production d'électricité, la part de l'énergie nucléaire et des combustibles fossiles avec captage et stockage du CO_2 (CSC) devrait, selon les modèles, augmenter dans la plupart des trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime. Dans les trajectoires modélisées axées sur l'objectif de 1,5 °C, le recours au captage et au stockage du CO_2 permettrait de faire en sorte qu'en 2050, environ 8 % (intervalle interquartile de 3 à 11 %) de l'électricité mondiale soit produite grâce au gaz, alors que la consommation de charbon présente une nette baisse dans toutes les trajectoires et serait réduite à près de 0 % (intervalle interquartile de 0 à 2 %) de la production d'électricité (*degré de confiance élevé*). Compte tenu des enjeux, ainsi que des différences entre les options et les conjonctures nationales, la faisabilité politique, économique, sociale et technique des technologies fondées sur l'énergie solaire, l'énergie éolienne et le stockage de l'électricité a nettement augmenté ces dernières années (*degré de confiance élevé*), ce qui semble indiquer une transition systémique potentielle dans le domaine de la production d'électricité (figure RID.3b) {2.4.1, 2.4.2, figure 2.1, tableau 2.6, tableau 2.7, encadré interchapitres 6 du chapitre 3, 4.2.1, 4.3.1, 4.3.3, 4.5.2}

C.2.3 Dans les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime, les émissions de CO_2 issues du secteur industriel seront, selon les projections, inférieures d'environ 65 à 90 % (intervalle interquartile) en 2050 par rapport à 2010, comparé à une fourchette de 50 à 80 % pour un réchauffement de 2 oC (*degré de confiance moyen*). Ces baisses peuvent être accomplies grâce à un ensemble de technologies et de pratiques nouvelles ou déjà existantes, telles que l'électrification, l'hydrogène, les matières premières d'origine biologiques durables, les produits de substitution, ainsi que le captage, l'utilisation et le stockage du CO_2 (CCUS). Ces options sont éprouvées d'un point de vue technique à différentes échelles, mais leur utilisation à grande échelle peut être limitée par des contraintes de nature économique, financière, humaine et institutionnelle dans des contextes donnés, et par les caractéristiques spécifiques des installations industrielles de grande ampleur. Dans le secteur de l'industrie, la réduction des émissions grâce au renforcement de l'efficacité des systèmes énergétiques et des processus ne suffira pas, à elle seule, à limiter le réchauffement à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime (*degré de confiance élevé*). {2.4.3, 4.2.1, tableau 4.1, tableau 4.3, 4.3.3, 4.3.4, 4.5.2}

C.2.4 La transition des systèmes urbains et des infrastructures compatible avec une limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime impliquerait, par exemple, des changements de pratiques pour ce qui est de l'utilisation des terres et de l'urbanisme, ainsi que des réductions d'émissions plus importantes dans les domaines des transports et des bâtiments par rapport aux trajectoires d'émissions qui limitent le réchauffement planétaire en dessous de 2 °C (*degré de confiance moyen*). Parmi les mesures et les pratiques techniques qui permettent de réduire considérablement les émissions figurent différentes options axées sur l'efficacité énergétique. Dans les trajectoires d'émissions qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime, la part de l'électricité dans la consommation énergétique des bâtiments serait d'environ 55 à 75 % en 2050, par rapport à 50 à 70 % en 2050 pour un réchauffement de 2 °C (*degré de confiance moyen*). Dans le secteur des transports, la part de l'énergie finale à faibles émissions passerait de moins de 5 % en 2020 à environ 35 à 65 % en 2050, par rapport à 25 à 45 % pour un réchauffement de 2 °C (*degré de confiance moyen*). Des obstacles économiques, institutionnels et socio-culturels pourraient entraver ces transitions de systèmes urbains et d'infrastructures, selon les circonstances nationales, régionales et locales, les capacités et les fonds disponibles (*degré de confiance élevé*). {2.3.4, 2.4.3, 4.2.1, tableau 4.1, 4.3.3, 4.5.2}.

C.2.5 Toutes les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime prévoient des transitions dans le domaine de l'utilisation des terres à l'échelle mondiale et régionale, mais l'ampleur de ces transitions dépend de l'ensemble d'options visé en matière d'atténuation. Les trajectoires modélisées qui limitent le réchauffement à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime prévoient, selon les projections, entre une réduction de 4 millions de km^2 et une augmentation de 2,5 millions de km^2 de la surface des terres agricole autres que les pâturages destinées à des cultures vivrières et fourragères et une réduction des pâturages comprise entre 0,5 et 11 millions de km^2, et prévoient en revanche une augmentation de 0 à 6 millions de km^2 des cultures productrices de biocarburant et une évolution de la superficie des forêts selon une fourchette comprise entre -2 et +9,5 millions de km^2 à l'horizon 2050 par rapport à 2010 (*degré de confiance moyen*)[16]. S'agissant des terres émergées, des transitions de même ampleur peuvent être observées dans des trajectoires modélisées axées sur l'objectif de 2 °C (*degré de confiance moyen*). Les transitions d'une telle ampleur posent des défis de taille pour la gestion durable des terres, sous leurs différentes formes d'utilisation : établissements humains, alimentation, fourrage, fibres, bioénergie, stockage du carbone, biodiversité et autres services que rendent les écosystèmes (*degré de confiance élevé*). Parmi les options en matière d'atténuation qui limitent l'utilisation des terres figurent l'intensification durable de certains modes d'utilisation des terres, la remise en état des écosystèmes et les changements axés sur des régimes alimentaires moins consommateurs de ressources (*degré de confiance élevé*). Pour mettre en œuvre les options d'atténuation concernant les terres émergées, il faudrait surmonter des obstacles socio-économiques, institutionnels, technologiques, financiers et environnementaux qui varient selon les régions (*degré de confiance élevé*). {2.4.4, figure 2.24, 4.3.2, 4.3.7, 4.5.2, encadré interchapitres 7 du chapitre 3}

C.2.6 Dans les trajectoires qui limitent le réchauffement à 1,5 °C, par opposition à ceux qui ne résultent pas de politiques climatiques autres que celles qui existent aujourd'hui, les investissements supplémentaires dans le domaine de l'énergie, pour la période 2016-2050, sont estimés, en moyenne annuelle, à environ 830 milliards de dollars É.-U. de 2010 (fourchette allant de 150 à 1 700 milliards de dollars de 2010 pour six modèles[17]). Pour cette même période et les mêmes trajectoires, le total des investissements annuels moyens est de 1 460 à 3 510 milliards de dollars É.-U. de 2010 pour ce qui est de l'offre en matière d'énergie et de 640 à 910 milliards de dollars É.-U. de 2010 pour ce qui est de la demande en matière d'énergie. Les investissements totaux liés à l'énergie augmentent d'environ 12 % (de 3 % à 24 %) dans les trajectoires d'émissions axées sur l'objectif de 1,5 °C par rapport aux trajectoires d'émissions axées sur l'objectif de 2 °C. Les investissements annuels dans les technologies à faibles émissions de carbone et dans l'efficacité énergétique seront multipliés approximativement par six (facteurs de 4 à 10) à l'horizon 2050 par rapport à 2015 (*degré de confiance moyen*). {2.5.2, encadré 4.8, figure 2.27}

C.2.7 Les trajectoires modélisées qui limitent le réchauffement à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime prévoient un large éventail de coûts marginaux moyens actualisés de dépollution à l'échelle du globe au cours du XXI^e siècle. Ces coûts sont de 3 à 4 fois supérieurs aux coûts des trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 2 °C au plus (*degré de confiance élevé*). Les publications des économistes font la distinction entre les coûts de dépollution marginaux et les coûts totaux d'atténuation dans l'économie. Les publications portant sur les coûts totaux d'atténuation associés aux trajectoires axées sur des mesures d'atténuation avec l'objectif de 1,5 °C sont rares et n'ont pas été analysées dans le présent rapport. Les connaissances sont encore lacunaires en ce qui concerne l'évaluation intégrée des coûts et bénéfices des mesures d'atténuation à l'échelle de l'économie, dans le cadre des trajectoires d'émissions qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C. {2.5.2 ; 2.6 ; figure 2.26}

16 Les changements d'affectation des terres anticipés qui sont évoqués ne sont pas tous simultanément mis en œuvre selon leurs limites supérieures dans une seule trajectoire.

17 Deux trajectoires qui limitent le réchauffement à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime et quatre trajectoires avec dépassement marqué.

C.3 Toutes les trajectoires d'émissions qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime prévoient l'élimination d'environ 100 à 1 000 $GtCO_2$ de CO_2 au cours du XXIe siècle. L'élimination du CO_2 serait utilisée pour compenser les émissions résiduelles et, dans la plupart des cas, pour atteindre des émissions nettes négatives afin de revenir à un réchauffement de 1,5 °C à la suite d'un pic (*degré de confiance élevé*). L'élimination de plusieurs centaines de $GtCO_2$ est entravée par de nombreux obstacles en termes de faisabilité et de durabilité (*degré de confiance élevé*). La réduction des émissions nettes à court terme et la mise en œuvre de mesures visant à diminuer la consommation d'énergie et l'utilisation des terres peuvent limiter l'élimination du CO_2 à quelques centaines de $GtCO_2$ sans avoir recours à la bioénergie avec captage et stockage du CO_2 (*degré de confiance élevé*). {2.3, 2.4, 3.6.2, 4.3, 5.4}

C.3.1 Parmi les mesures actuelles et potentielles visant l'élimination du CO_2 figurent le boisement et le reboisement, la remise en état des sols, la bioénergie avec captage et stockage du CO_2 (BECSC), le captage direct dans l'air et le stockage du CO_2 (DACCS), l'altération accélérée des roches calcaires et l'alcalinisation des océans. Ces techniques varient nettement de par leur maturité, leurs potentiels, leurs coûts, ainsi que les risques, les co-avantages et les compromis qui y sont associés (*degré de confiance élevé*). À l'heure actuelle, seules quelques trajectoires d'émissions modélisées ayant fait l'objet d'une publication incluent des mesures d'élimination du CO_2 autres que le boisement et la bioénergie avec captage et stockage du CO_2. {2.3.4, 3.6.2, 4.3.2, 4.3.7}

C.3.2 Dans les trajectoires d'émissions qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime, la bioénergie avec captage et stockage du CO_2 porte sur 0 à 1, 0 à 8 et 0 à 16 $GtCO_2$ an^{-1} en 2030, 2050 et 2100, respectivement, alors que les mesures d'élimination du CO_2 axées sur l'agriculture, la foresterie et les autres utilisations des terres (AFAUT) devraient permettre d'éliminer 0 à 5, 1 à 11 et 1 à 5 $GtCO_2$ an^{-1} pendant la même période (*degré de confiance moyen*). Au milieu du siècle, selon les dernières publications scientifiques, les limites supérieures de ces fourchettes sont supérieures au potentiel de la BECSC, dont la limite supérieure est de 5 $GtCO_2$ an^{-1}, et au potentiel du boisement, dont la limite supérieure est de 3,6 $GtCO_2$ an^{-1} (*degré de confiance moyen*). Certaines trajectoires d'émissions évitent entièrement le recours à la BECSC grâce à des mesures axées sur la demande et une plus grande dépendance vis-à-vis de mesures d'élimination du CO_2 (EDC) liées à l'agriculture, à la foresterie et aux autres utilisations des terres (*degré de confiance moyen*). Le recours à la bioénergie peut être aussi élevé, voire supérieur lorsque la BECSC est exclue, en raison des capacités de cette technologie à remplacer les combustibles fossiles dans tous les secteurs (*degré de confiance élevé*). (figure RID.3b) {2.3.3, 2.3.4, 2.4.2, 3.6.2, 4.3.1, 4.2.3, 4.3.2, 4.3.7, 4.4.3, tableau 2.4}

C.3.3 Les trajectoires d'émissions qui prévoient un dépassement de 1,5 °C du réchauffement planétaire partent de l'hypothèse que l'élimination du CO_2 sera supérieure aux émissions résiduelles de CO_2 plus tard au cours du siècle, ce qui permettra de revenir en dessous de 1,5 °C en 2100 au plus tard, l'élimination de volumes plus importants de CO_2 étant nécessaire pour les dépassements plus importants (figure RID.3b). (*degré de confiance élevé*). Par conséquent, les facteurs qui ont une influence sur la vitesse, l'ampleur et l'acceptabilité par la société de l'élimination du CO_2 déterminent la capacité à revenir à un réchauffement inférieur à 1,5 °C après un dépassement. Nos connaissances concernant le cycle du carbone et le système climatique sont encore limitées quant à la capacité des émissions nettes négatives à faire baisser la température après un pic de réchauffement (*degré de confiance élevé*). {2.2, 2.3.4, 2.3.5, 2.6, 4.3.7, 4.5.2, Tableau 4.11}

C.3.4 La plupart des mesures actuelles et potentielles d'élimination du CO_2 pourraient avoir des impacts considérables sur les terres émergées, l'eau ou les nutriments si elles étaient mises en œuvre à grande échelle (*degré de confiance élevé*). Le boisement et la bioénergie peuvent concurrencer d'autres utilisations des terres et avoir des impacts importants sur les systèmes agricoles et alimentaires, la biodiversité et d'autres fonctions et services écosystémiques (*degré de confiance élevé*). Une gouvernance efficace s'avère nécessaire pour limiter ces compromis et garantir le maintien du carbone dans les réservoirs terrestres, géologiques et océaniques (*degré de confiance élevé*). La faisabilité et la pérennité des techniques d'élimination du CO_2 pourraient être renforcées grâce à un éventail d'options mises en œuvre à des échelles importantes, mais moins grandes, et non par le biais d'une option unique appliquée à très grande échelle (*degré de confiance élevé*) (figure RID.3b). {2.3.4, 2.4.4, 2.5.3, 2.6, 3.6.2, 4.3.2, 4.3.7, 4.5.2, 5.4.1, 5.4.2 ; encadrés interchapitres 7 et 8 du chapitre 3, tableau 4.11, tableau 5.3, figure 5.3}

C.3.5 Certaines mesures d'élimination du CO_2 liées à l'agriculture, à la foresterie et aux autres utilisations des terres (AFAUT), telles que la remise en état des écosystèmes naturels et le piégeage du carbone dans le sol, pourraient s'accompagner de co-avantages, tels qu'une amélioration de la biodiversité, de la qualité des sols et de la sécurité alimentaire locale. Si elles sont mises en œuvre à grande échelle, ces mesures devraient pouvoir s'appuyer sur des systèmes de gouvernance favorisant la gestion durable des terres, afin de préserver et de protéger les stocks terrestres de carbone et les autre fonctions et services écosystémiques (*degré de confiance moyen*). (figure RID.4) {2.3.3, 2.3.4, 2.4.2, 2.4.4, 3.6.2, 5.4.1, encadrés interchapitres 3 du chapitre 1 et 7 du chapitre 3, 4.3.2, 4.3.7, 4.4.1, 4.5.2, tableau 2.4}

D. Renforcement de la parade mondiale dans le cadre du développement durable et de la lutte contre la pauvreté

D.1 Selon les estimations, les mesures d'atténuation annoncées par les pays au titre de l'Accord de Paris entraîneraient des émissions mondiales de gaz à effet de serre[18] de 52 – 58 GtéqCO$_2$ an^{-1} en 2030 (*degré de confiance moyen*). Les trajectoires qui tiennent compte de ces mesures annoncées ne parviendraient pas à limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C, même si elles prenaient également en considération une augmentation, très difficile à tenir, de l'ampleur des réductions d'émissions et des mesures annoncées en la matière après 2030 (*degré de confiance élevé*). Il ne sera possible d'éviter les dépassements et la dépendance vis-à-vis de l'élimination à grande échelle du CO$_2$ que si les émissions mondiales de CO$_2$ commencent à décliner bien avant 2030 (*degré de confiance élevé*). {1.2, 2.3, 3.3, 3.4, 4.2, 4.4, encadré interchapitres 11 du chapitre 4}

D.1.1 Les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime prévoient des réductions manifestes des émissions à l'horizon 2030 (*degré de confiance élevé*). À une exception près, toutes les trajectoires indiquent que les émissions mondiales de gaz à effet de serre passent en dessous de 35 GtéqCO$_2$ an^{-1} à l'horizon 2030, et la moitié d'entre eux situent ces valeurs dans l'intervalle de 25 à 30 GtéqCO$_2$ an^{-1} (intervalle interquartile), soit une baisse de 40 à 50 % par rapport aux niveaux de 2010 (degré de confiance élevé). Les trajectoires qui tiennent compte des mesures annoncées par les pays en matière d'atténuation jusqu'en 2030 sont dans l'ensemble compatibles avec les trajectoires à moindres coûts qui prévoient un réchauffement planétaire d'environ 3 °C en 2100, ce réchauffement se poursuivant ensuite (*degré de confiance moyen*). {2.3.3, 2.3.5, encadré interchapitres 11 du chapitre 4, 5.5.3.2}

D.1.2 Les conséquences et les problèmes associés aux trajectoires avec dépassement sont plus marqués que pour trajectoires qui limitent le réchauffement à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime (*degré de confiance élevé*). Pour inverser le réchauffement après un dépassement de 0,2 °C ou plus au cours de ce siècle, il faudrait que les mesures d'élimination du CO$_2$ soient amplifiées et appliquées à des rythmes et avec une ampleur susceptibles de ne pas pouvoir être atteints, en raison des défis considérables liés à leur mise en œuvre (*degré de confiance moyen*). {1.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.5.1, 3.3, 4.3.7, encadré interchapitres 8 du chapitre 3, encadré interchapitres 11 du chapitre 4}

D.1.3 Plus les émissions seront basses en 2030, moins il sera difficile de limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C après 2030 sans dépassement ou avec un dépassement minime (*degré de confiance élevé*). Parmi les problèmes qui apparaîtront si rien n'est fait rapidement pour réduire les émissions de gaz à effet de serre figurent la hausse des coûts, le fait d'être tributaire des infrastructures qui émettent du carbone, les actifs irrécupérables et une flexibilité moindre des options à moyen et à long terme (*degré de confiance élevé*), ce qui peut accentuer la répartition inégale des impacts entre les pays à différents stades de développement (degré de confiance moyen). {2.3.5, 4.4.5, 5.4.2}

D.2 Il serait possible d'éviter un plus grand nombre d'impacts du changement climatique sur le développement durable, l'éradication de la pauvreté et la réduction des inégalités si le réchauffement planétaire était limité à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C, en tirant profit au maximum des synergies en matière d'atténuation et d'adaptation et en réduisant autant que possible les risques d'effets indésirables (degré de confiance élevé). {1.1, 1.4, 2.5, 3.3, 3.4, 5.2, tableau 5.1}

D.2.1 Les impacts du changement climatique et les réponses qui sont apportées sont étroitement liés au développement durable, qui concilie bien-être social, prospérité économique et protection de l'environnement. Les objectifs de développement durable adoptés en 2015 par les Nations Unies établissent un cadre pour l'évaluation des corrélations entre un réchauffement planétaire de 1,5 °C ou 2 °C et les objectifs de développement, lesquels visent notamment l'éradication de la pauvreté, la réduction des inégalités et la lutte contre les changements climatiques (*degré de confiance élevé*) {encadré interchapitres 4 du chapitre 1, 1.4, 5.1}

D.2.2 La prise en compte de l'éthique et de l'équité peut aider à faire face à la répartition inégale des effets négatifs associés à une hausse de 1,5 °C et plus, ainsi qu'aux conséquences des mesures d'atténuation et d'adaptation, en particulier pour les populations pauvres et désavantagées et ce, dans toutes les sociétés (*degré de confiance élevé*). {1.1.1, 1.1.2, 1.4.3, 2.5.3, 3.4.10, 5.1, 5.2, 5.3. 5.4, encadré interchapitres 4 du chapitre 1, encadrés interchapitres 6 et 8 du chapitre 3, et encadré interchapitres 12 du chapitre 5}

D.2.3 Les mesures d'atténuation et d'adaptation compatibles avec une limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C reposent sur des conditions propices, lesquelles ont été évaluées dans le présent rapport pour tous les aspects géophysiques, environnementaux-

18 Les émissions de gaz à effet de serre ont été regroupées avec les valeurs du potentiel de réchauffement planétaire sur 100 ans figurant dans le deuxième Rapport d'évaluation du GIEC.

écologiques, technologiques, économiques, socio-culturels et institutionnels de la faisabilité. Le renforcement de la gouvernance multi-niveaux, les capacités institutionnelles, les instruments de gouvernance, l'innovation et le transfert technologique, la mobilisation de financements, ainsi que l'évolution des comportements et des modes de vie sont autant de conditions propices qui renforcent la faisabilité des options en matière d'atténuation et d'adaptation pour les transitions systémiques compatibles avec l'objectif de 1,5 °C. (*degré de confiance élevé*) {1.4, encadré interchapitres 3 du chapitre 1, 2.5.1, 4.4, 4.5, 5.6}

D.3 Si elles sont choisies avec soin et si elles bénéficient d'un environnement favorable, les options en matière d'adaptation spécifiques à des contextes donnés auront des répercussions positives sur le développement durable et la lutte contre la pauvreté dans le cas d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C, même s'il est possible que des compromis soient nécessaires (*degré de confiance élevé*). {1.4, 4.3, 4.5}

D.3.1 Si leur mise en œuvre est bien maîtrisée, les options en matière d'adaptation qui visent à réduire la vulnérabilité des systèmes humains et naturels présentent de nombreuses synergies avec le développement durable, telles que la garantie de la sécurité alimentaire et la sécurité de l'approvisinnement en eau, la prévention des catastrophes, l'amélioration des conditions sanitaires, le maintien des services écosystémiques et la réduction de la pauvreté et des inégalités (*degré de confiance élevé*). Il est essentiel, pour créer un environnement favorable, d'augmenter les investissements dans les infrastructures matérielles et sociales de façon à renforcer la résilience et les capacités d'adaptation des sociétés. Ces effets positifs peuvent être ressentis dans la plupart des régions grâce à des mesures d'adaptation à un réchauffement planétaire de 1,5 °C (*degré de confiance élevé*). {1.4.3, 4.2.2, 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.5, 4.4.1, 4.4.3, 4.5.3, 5.3.1, 5.3.2}

D.3.2 L'adaptation à un réchauffement planétaire de 1,5 °C peut également entraîner des risques d'effets indésirables ou des inadaptations qui auront des effets négatifs sur le développement durable. Par exemple, si leur conception ou leur mise en œuvre présente des défauts, dans de nombreux secteurs, les projets d'adaptation peuvent augmenter les émissions de gaz à effet de serre et l'utilisation de l'eau, exacerber les inégalités sociales et les différences entre les hommes et les femmes, détériorer les conditions sanitaires et porter atteinte aux écosystèmes naturels (degré de confiance élevé). Ces risques peuvent être réduits grâce à des mesures d'adaptation qui tiennent compte de la pauvreté et du développement durable (*degré de confiance élevé*). {4.3.2, 4.3.3, 4.5.4, 5.3.2 ; encadrés interchapitres 6 et 7 du chapitre 3}

D.3.3 Un mélange d'options axées sur l'adaptation et l'atténuation visant à limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C et mises en œuvre de manière participative et intégrée peut favoriser des transitions systémiques rapides dans les zones urbaines comme rurales (*degré de confiance élevé*). Ces options sont particulièrement efficaces lorsqu'elles sont mises en œuvre dans un contexte de développement économique et durable, et lorsque les autorités et les décideurs à l'échelle locale et régionale sont appuyés par les gouvernements nationaux (*degré de confiance moyen*) {4.3.2, 4.3.3, 4.4.1, 4.4.2}

D.3.4 Les options en matière d'adaptation qui permettent également de réduire les émissions peuvent présenter des synergies et entraîner des économies dans la plupart des secteurs et pour la plupart des transitions systémiques, par exemple lorsque la gestion des terres permet de réduire les émissions et les risques de catastrophe, ou lorsque des bâtiments à faibles émissions de carbone sont également conçus pour être efficaces en matière de refroidissement. Lorsque le réchauffement planétaire est limité à 1,5 °C, les compromis entre l'atténuation et l'adaptation, par exemple lorsque des cultures bioénergétiques, le reboisement ou le boisement empiètent sur les terres nécessaires à l'adaptation agricole, peuvent porter atteinte à la sécurité alimentaire, aux moyens d'existence, aux fonctions des écosystèmes et services écosystémiques, et à d'autres aspects du développement durable. (*degré de confiance élevé*) {3.4.3, 4.3.2, 4.3.4, 4.4.1, 4.5.2, 4.5.3, 4.5.4}

D.4 Les options en matière d'atténuation compatibles avec les trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C sont associées à un grand nombre de synergies et de compromis relativement aux objectifs de développement durable. Le nombre total de synergies possibles est supérieur à celui des compromis, mais leur effet net sera fonction du rythme et de l'ampleur des changements, de la composition de l'ensemble d'options en matière d'atténuation et de la façon dont sera gérée la transition (*degré de confiance élevé*) (figure RID.4) {2.5, 4.5, 5.4}

D.4.1 Les trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C présentent des synergies importantes notamment avec les objectifs de développement durable 3 (santé), 7 (énergie propre), 11 (villes et communautés), 12 (modes de consommation et de production durables) et 14 (océans) (*degré de confiance très élevé*). En matière d'atténuation, certaines de ces trajectoires peuvent nécessiter l'établissement de compromis relativement aux objectifs de développement durable 1 (pauvreté), 2 (faim), 6 (eau) et 7 (accès à l'énergie) en cas de mise en œuvre mal maîtrisée (*degré de confiance élevé*) (figure RID.4). {5.4.2 ; figure 5.4, encadrés interchapitres 7 et 8 du chapitre 3}

Liens indicatifs entre les options d'atténuation et le développement durable à l'aune des objectifs de développement durable (les coûts et les avantages ne sont pas indiqués)

Les options en matière d'atténuation mises en œuvre dans chaque secteur peuvent être associées, avec effets positifs (synergies) ou négatifs (compromis) potentiels, aux objectifs de développement durable (ODD). Le degré de concrétisation de ce potentiel est fonction de l'éventail des options choisies en matière d'atténuation, du type de politiques d'atténuation, des spécificités locales et du contexte. Dans le secteur de la demande en matière d'énergie, en particulier, les synergies potentielles sont supérieures aux compromis potentiels. Les barres regroupent les options évaluées séparément par degré de confiance et tiennent compte de la force relative des relations entre les options d'atténuation évaluées et les ODD.

La largeur indique la force de la relation



La **taille de la barre colorée** indique le **potentiel relatif** de synergies et de compromis entre les options d'atténuation des secteurs et les ODD.

Intensités de couleur = degré de confiance



L'intensité de la couleur indique le degré de confiance associé au potentiel de compromis et de synergie évalué.

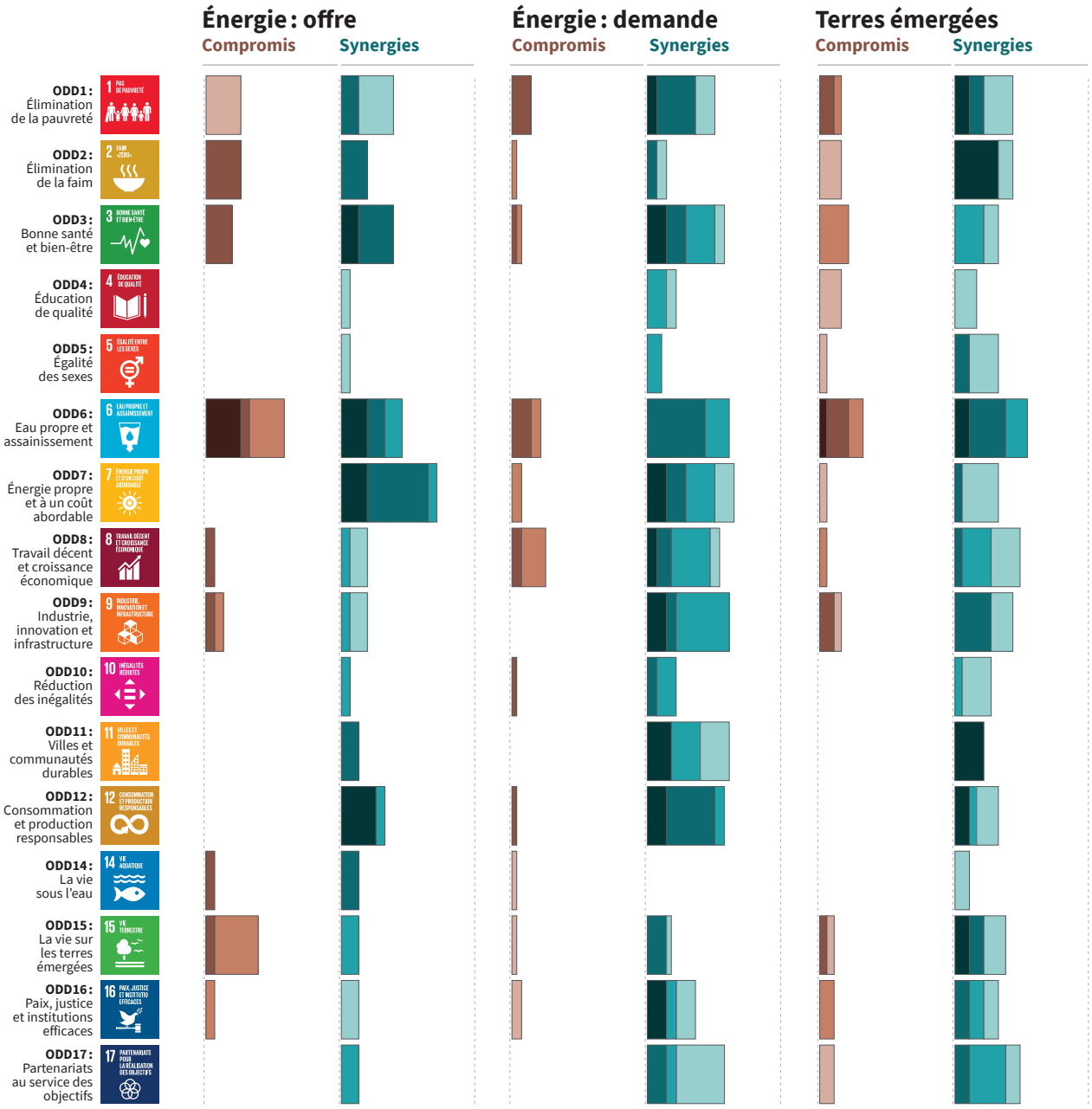


Figure RID.4 | Synergies et risques d'effets indésirables ou compromis entre les options sectorielles en matière d'atténuation du changement climatique et les objectifs de développement durable (ODD). Les ODD servent de cadre à l'évaluation des différentes dimensions du développement durable, qui va au-delà de l'échéance des cibles de 2030 qui leur ont été associées. L'évaluation est fondée sur les publications consacrés aux options d'atténuation estimées pertinentes pour le seuil de 1,5 °C. L'intensité des interactions avec les ODD a été déterminée après évaluation qualitative et quantitative de chaque option d'atténuation présentée au tableau 5.2. Pour chacune de ces options, l'intensité du lien avec les ODD, ainsi que le degré de confiance associé dans les articles analysés (différentes nuances de vert et de rouge) ont été évalués. L'intensité des liens positifs (synergies) et négatifs (compromis ou effet indésirable) pour chaque option d'un secteur (voir tableau 5.2) apparaît sous forme de potentiel par secteur pour l'ensemble des options d'atténuation. Les zones (blanches) en dehors des barres colorées, qui indiquent l'absence d'interactions, sont assorties d'un *degré de confiance faible* en raison de l'incertitude et du petit nombre d'études ayant porté sur les effets indirects. L'intensité de l'interaction ne porte que sur l'effet d'atténuation et non sur les avantages liés aux impacts qui ont été évités. L'objectif de développement durable 13 (Lutte contre les changements climatiques) n'apparaît pas dans cette liste, car l'atténuation est considérée en termes d'interactions avec les ODD et non *vice versa*. Les barres colorées indiquent la force de la connexion et ne tiennent pas compte de l'intensité des impacts sur les ODD. Le secteur de la demande en matière d'énergie englobe les réponses comportementales, le changement de carburant et les options d'efficience accrue dans les domaines du transport, de l'industrie et de la construction, ainsi que des options de piégeage du carbone dans le secteur industriel. Parmi les options évaluées dans le secteur de l'approvisionnement énergétique figurent les énergies renouvelables axées ou non sur la biomasse, l'énergie nucléaire, le captage et le stockage du CO_2 (CSC) avec bioénergie et le CSC avec des combustibles fossiles. Dans le domaine des terres émergées, les options englobent l'agriculture et les forêts, les régimes alimentaires durables et la réduction du gaspillage des denrées alimentaires, le piégeage dans le sol, la gestion du bétail et des effluents d'élevage, la diminution du déboisement, le boisement et le reboisement, et les approvisionnements responsables. Outre ce graphique, des options relatives à l'océan sont étudiées dans le rapport. {5.4, tableau 5.2, figure 5.2}

Il n'existe pas d'informations relatives aux impacts nets de l'atténuation sur le développement durable dans le contexte des trajectoires de 1,5 °C que pour un petit nombre d'objectifs de développement durable et d'options d'atténuation. Seules quelques études ont évalué les avantages découlant de l'absence d'impacts du changement climatique dans le cadre de trajectoires axées sur 1,5 °C pour les objectifs de développement durable, et les effets secondaires de l'adaptation pour l'atténuation et les objectifs de développement durable. L'évaluation des potentiels d'atténuation indicatifs à la figure RID.4 est un pas de plus, par rapport au cinquième rapport d'évaluation, vers une évaluation plus exhaustive et intégrée à l'avenir.

D.4.2 Les trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C qui prévoient une faible demande en énergie (par ex., voir la trajectoire P1 dans les figures RID.3a et RID.3b), une faible consommation de biens matériels et une faible consommation de denrées alimentaires à fort dégagement de gaz à effet de serre donnent lieu aux plus grandes synergies et au plus faible nombre de compromis en ce qui concerne le développement durable et les objectifs de développement durable (*degré de confiance élevé*). Ces trajectoires réduiraient la dépendance vis-à-vis des techniques d'élimination du CO_2. Dans les trajectoiress modélisées, le développement durable, l'éradication de la pauvreté et la réduction des inégalités peuvent contribuer à limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C. (*degré de confiance élevé*) (figure RID.3b, figure RID.4) {2.4.3, 2.5.1, 2.5.3, figure 2.4, figure 2.28, 5.4.1, 5.4.2, figure 5.4}

D.4.3 Souvent, les trajectoires modélisées axées sur les objectifs de 1,5 °C et de 2 °C dépendent de la mise en œuvre de mesures à grande échelle liées à l'utilisation des terres, telles que le boisement et l'approvisionnement en bioénergie, qui, si elles sont mal gérées, peuvent concurrencer la production alimentaire et, par conséquent, entraîner des problèmes de sécurité alimentaire (*degré de confiance élevé*). Les effets des options liées à l'élimination du CO_2 sur les objectifs de développement durable dépendent du type d'options et de l'ampleur de leur mise en œuvre (*degré de confiance élevé*). Si cette mise en œuvre est mal gérée, les options liées à l'élimination du CO_2, telles que la bioénergie avec captage et stockage du CO_2 (BECSC) et les mesures liées à l'agriculture, la foresterie et les autres utilisations des terres (AFAUT) conduiraient à des effets indésirables. Pour que leur conception et leur mise en œuvre soient adaptées au contexte, il faut tenir compte des besoins des populations, de la biodiversité et d'autres aspects du développement durable (*degré de confiance très élevé*). (figure RID.4) {5.4.1.3, encadré interchapitres 7 du chapitre 3}

D.4.4 Les mesures d'atténuation relevant des trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C peuvent menacer le développement durable dans les régions qui dépendent fortement des combustibles fossiles pour la création de revenus et d'emplois (degré de confiance élevé). Les politiques qui favorisent la diversification de l'économie et du secteur de l'énergie peuvent permettre de faire face aux enjeux associés (*degré de confiance élevé*). {5.4.1.2, encadré 5.2}

D.4.5 Les politiques de redistribution vers l'ensemble des secteurs et des populations, qui protègent les populations les plus pauvres et les plus vulnérables peuvent éliminer les effets indésirables pour plusieurs objectifs de développement durable, notamment ceux qui concernent la faim, la pauvreté et l'accès à l'énergie. Les investissements nécessaires à de telles politiques complémentaires ne représentent qu'une petite fraction du total des investissements en matière d'atténuation dans le cas des trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C. (*degré de confiance élevé*) {2.4.3, 5.4.2, figure 5.5}

D.5 La limitation des risques liés à un réchauffement planétaire de 1,5 °C dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté implique des transitions systémiques, lesquelles peuvent être stimulées par une hausse des investissements dans les mesures d'adaptation et d'atténuation, la mise en place d'instruments de gouvernance, l'accélération des innovations technologiques et l'évolution des comportements (*degré de confiance élevé*). {2.3, 2.4, 2.5, 3.2, 4.2, 4.4, 4.5, 5.2, 5.5, 5.6}

D.5.1 En orientant les financements vers des investissements dans les infrastructures d'atténuation et d'adaptation, il pourrait être possible d'obtenir des ressources supplémentaires, telles que la mobilisation de financements privés par des investisseurs institutionnels, des gestionnaires d'actifs et des banques de développement ou d'investissement, ainsi que le déblocage de fonds publics. L'action gouvernementale visant à réduire le risque associé aux investissements axés sur les basses émissions et sur l'adaptation peut stimuler la mobilisation de financements privés et renforcer l'efficacité d'autres politiques gouvernementales. Plusieurs enjeux se dégagent des études, dont l'accès aux financements et la mobilisation de fonds (*degré de confiance élevé*) {2.5.1, 2.5.2, 4.4.5}

D.5.2 Il est difficile de quantifier les financements de l'adaptation compatibles avec un réchauffement planétaire de 1,5 °C et de les comparer à un scénario à 2 °C. Faute de données complètes, il n'est pas possible de dissocier les investissements spécifiquement axés sur le renforcement de la résilience face au changement climatique de ceux liés à une infrastructure de base pour laquelle les financements font actuellement défaut. Les estimations des coûts de l'adaptation pourraient être moindres pour un réchauffement de 1,5 °C que pour un réchauffement de 2 °C. En matière d'adaptation, les mesures sont, en règle générale, financées par des sources publiques, telles que les budgets nationaux et infranationaux, et les pays en développement reçoivent, parallèlement, une aide au développement et le soutien des banques de développement multilatéral et de mécanismes liés à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (*degré de confiance moyen*). Grâce aux études les plus récentes, on comprend de mieux en mieux l'ampleur et l'augmentation du financement des organisations non gouvernementales et du financement privé dans certaines régions (*degré de confiance moyen*). Parmi les obstacles figurent l'ampleur du financement de l'adaptation, les capacités limitées et l'accès au financement de l'adaptation (*degré de confiance moyen*). {4.4.5, 4.6}

D.5.3 Selon les projections, les trajectoires mondiales modélisées qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C impliquent des besoins annuels en matière d'investissements moyens dans le système énergétique d'environ 2400 milliards de dollars É.-U. de 2010 entre 2016 et 2035, soit environ 2,5 % du PIB mondial (*degré de confiance moyen*). {4.4.5, encadré 4.8}

D.5.4 Des ressources marginales peuvent être mobilisées grâce à des mécanismes d'intervention, notamment en réorientant l'épargne et les investissements mondiaux, en utilisant des instruments fondés ou non sur les marchés, en accompagnant les mesures de façon à garantir l'équité lors de la transition, tout en tenant compte des défis liés à la mise en œuvre, notamment les coûts de l'énergie, la dévalorisation des actifs et les impacts sur la concurrence internationale, et en tirant profit au maximum des avantages (*degré de confiance élevé*) {1.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.5.1, 2.5.2, encadré interchapitre 8 du chapitre 3 et encadré interchapitres 11 du chapitre 4, 4.4.5, 5.5.2}

D.5.5 Les transitions systémiques compatibles avec une limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C et permettant une adaptation s'accompagnent notamment de l'adoption généralisée de technologies et pratiques nouvelles, éventuellement perturbatrices, et d'innovations axées sur le climat, ce qui implique un renforcement des capacités d'innovation technologique, notamment dans les secteurs de l'industrie et des finances. Les politiques nationales d'innovation et la coopération internationale peuvent contribuer au développement, à la commercialisation et à l'adoption généralisée de technologies axées sur l'atténuation et l'adaptation. Les politiques d'innovation peuvent gagner en efficacité si elles mettent en parralèle un soutien public à la recherche et au développement et des panoplies de mesures stimulant la diffusion des technologies. (*degré de confiance élevé*) {4.4.4, 4.4.5}.

D.5.6 L'éducation, l'information et les approches communautaires, y compris celles qui sont fondées sur les savoirs autochtones et locaux, peuvent accélérer l'évolution des comportements à grande échelle dans la perspective d'une limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C et d'une adaptation à ce réchauffement. Ces approches gagnent en efficacité si elles sont associées à d'autres politiques générales et spécialement adaptées aux motivations, aux capacités et aux ressources des acteurs et des contextes concernés (*degré de confiance élevé*). L'acceptabilité publique peut faciliter ou entraver la mise en œuvre des politiques et des mesures destinées à limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C et à assurer une adaptation appropriée aux impacts du réchauffement. Elle dépend de l'évaluation, par la personne concernée, des conséquences anticipées de ces politiques, de l'équité, telle qu'elle est perçue, de la répartition des conséquences et de la perception que les processus de décision sont équitables (*degré de confiance élevé*). {1.1, 1.5, 4.3.5, 4.4.1, 4.4.3, encadré 4.3, 5.5.3, 5.6.5}

D.6 Le développement durable appuie, voire favorise souvent, les transitions et les transformations fondamentales de la société et des systèmes qui contribuent à limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C. Ces changements facilitent la mise en œuvre de trajectoires de développement favorisant la résilience face au changement climatique qui parviennent à mettre en oeuvre des stratégies ambitieuses d'atténuation et d'adaptation parallèlement à l'éradication de la pauvreté et les efforts visant à réduire les inégalités (*degré de confiance élevé*). {encadré 1.1, 1.4.3, figure 5.1, 5.5.3, encadré 5.3}

D.6.1 La justice sociale et l'équité sont des éléments centraux des trajectoires de développement favorisant la résilience face au changement climatique qui visent à limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C, car elles permettent de faire face à des défis et à des compromis inévitables, augmentent les oppportunités, et garantissent que les options, les perspectives d'avenir et les valeurs font l'objet de délibérations entre les pays et communautés et au sein d'entre eux, en faisant attention à ne pas dégrader la situation des populations démunies et désavantagées (*degré de confiance élevé*). {5.5.2, 5.5.3, encadré 5.3, figure 5.1, figure 5.6, encadrés interchapitres 12 et 13 du chapitre 5}

D.6.2 Les possibilités d'établir des trajectoires de développement favorisant la résilience face au changement climatique varient selon les régions et les pays, et au sein d'entre eux, en raison des différences de contextes en matière de développement et de la vulnérabilité systémique (*degré de confiance très élevé*). Les efforts concernant ce type de trajectoires ont pour l'instant été limités (*degré de confiance moyen*) et il faudrait que tous les pays et tous les acteurs non étatiques renforcent leurs actions dans ce domaine et les mettent en œuvre en temps opportun (*degré de confiance élevé*). {5.5.1, 5.5.3, figure 5.1}

D.6.3 Les trajectoires qui sont compatibles avec le développement durable posent moins de défis en termes d'atténuation et d'adaptation et impliquent des coûts d'atténuation moindres. La grande majorité des études de modélisation n'ont pas été en mesure d'identifier des trajectoires caractérisées par l'absence de coopération internationale, la persistance des inégalités et de la pauvreté qui soient capables de limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C. (*degré de confiance élevé*) {2.3.1, 2.5.1, 2.5.3, 5.5.2}

D.7 Le renforcement des capacités des autorités nationales et infranationales, de la société civile, du secteur privé, des peuples autochtones et des communautés locales dans le domaine de la lutte contre les changements climatiques peut favoriser la mise en œuvre de mesures ambitieuses permettant de limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C (*degré de confiance élevé*). La coopération internationale peut créer un environnement propice pour atteindre cet objectif dans tous les pays et au bénéfice de tous, dans le contexte du développement durable. La coopération internationale est un catalyseur essentiel pour les pays en développement et les régions vulnérables (*degré de confiance élevé*). {1.4, 2.3, 2.5, 4.2, 4.4, 4.5, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5, encadré 4.1, encadré 4.2, encadré 4.7, encadré 5.3, encadré interchapitres 9 du chapitre 4, encadré interchapitres 13 du chapitre 5}

D.7.1 Les partenariats auxquels participent des acteurs publics et privés non étatiques, des investisseurs institutionnels, le système bancaire, la société civile et les institutions scientifiques, permettraient la mise en œuvre de mesures et d'actions compatibles avec une limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C (*degré de confiance très élevé*). {1.4, 4.4.1, 4.2.2, 4.4.3, 4.4.5, 4.5.3, 5.4.1, 5.6.2, encadré 5.3}

D.7.2 La participation, la transparence, le renforcement des capacités et l'apprentissage peuvent être garantis pour les différents acteurs grâce à une coopération axée sur le renforcement d'une gouvernance multi-niveaux tenue de rendre des comptes, qui inclut des acteurs non étatiques tels que le secteur industriel, la société civile et des institutions scientifiques, mais également grâce à des politiques sectorielles et transsectorielles coordonnées à différents niveaux de gouvernance, des politiques qui font une part à la problématique hommes-femmes, des financements, y compris des financements novateurs, et une coopération dans le domaine du développement et du transfert des technologies (*degré de confiance élevé*). {2.5.1, 2.5.2, 4.2.2, 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3, 4.4.4, 4.4.5, 4.5.3, encadré interchapitres 9 du chapitre 4, 5.3.1, 5.5.3, encadré interchapitres 13 du chapitre 5, 5.6.1, 5.6.3}

D.7.3 La coopération internationale est un catalyseur essentiel pour les pays en développement et les régions vulnérables, qui peuvent ainsi renforcer les mesures qu'ils prennent pour mettre en œuvre des interventions compatibles avec une limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C, y compris en améliorant l'accès aux financements et aux technologies et en renforçant les capacités nationales, tout en tenant compte de la conjoncture et des besoins nationaux et locaux (*degré de confiance élevé*). {2.3.1, 2.5.1, 4.4.1, 4.4.2, 4.4.4, 4.4.5, 5.4.1 5.5.3, 5.6.1, encadré 4.1, encadré 4.2, encadré 4.7}.

D.7.4 Les efforts collectifs, déployés à tous les niveaux, qui prennent en considération les différences de circonstances et de capacités, et visent à limiter le réchauffement planétaire à 1,5 oC en tenant compte de l'équité et de l'efficacité, peuvent aider la communauté internationale à mettre en œuvre des interventions plus dynamiques pour faire face aux changements climatiques, garantir un développement durable et éradiquer la pauvreté (*degré de confiance élevé*). {1.4.2, 2.3.1, 2.5.1, 2.5.2, 4.2.2, 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3, 4.4.4, 4.4.5, 4.5.3, 5.3.1, 5.4.1, 5.5.3, 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3}

Encadré RID.1 : Notions essentielles

Température moyenne à la surface du globe : Estimation de la moyenne mondiale de la température de l'air près de la surface au-dessus des terres émergées et de la glace de mer, et de la température de surface de la mer dans les régions où l'océan est libre de glaces, les variations étant généralement exprimées en tant qu'écarts par rapport à une valeur pour une période de référence donnée. Lors de l'estimation des variations de la température moyenne à la surface du globe, la température de l'air près de la surface des terres émergées et de l'océan est également utilisée[19]. {1.2.1.1}

Préindustriel : Caractérise la période pluriséculaire antérieure à celle marquant le début du développement industriel à grande échelle vers 1750. La période de référence de 1850-1900 sert ici à estimer la température moyenne à la surface du globe pour la période préindustrielle. {1.2.1.2}

Réchauffement planétaire : Estimation de la hausse de la température moyenne à la surface du globe au cours d'une période de 30 ans ou de la période de 30 ans centrée sur une année ou une décennie donnée, exprimée par rapport aux niveaux préindustriels, sauf indication contraire. Pour les périodes de trente ans couvrant des années passées et futures, il est assumé que la tendance multidécennale au réchauffement observée actuellement se maintiendra. {1.2.1}

Émissions nettes de CO_2 égales à zéro : Les émissions nettes de dioxyde de carbone (CO_2) sont égales à zéro lorsque les émissions anthropiques de CO_2 sont compensées à l'échelle du globe par l'élimination anthropique de CO_2 pendant une période donnée.

Élimination du dioxyde de carbone (EDC) : Activités anthropiques qui permettent d'éliminer le CO_2 de l'atmosphère et de le stocker, de manière durable, dans des réservoirs géologiques, terrestres ou océaniques, ou dans des produits. Sont comprises dans ces activités la valorisation anthropique, qu'elle soit actuelle ou potentielle, des puits biologiques ou géochimiques et le captage direct dans l'air et le stockage, mais en sont exclues le piégeage naturel de CO_2 qui n'est pas causé directement par des activités humaines.

Budget carbone total : Estimation des émissions mondiales nettes cumulées anthropiques de CO_2, depuis la période préindustrielle jusqu'au moment où ces émissions deviennent égales à zéro, qui permettraient, avec une certaine probabilité, de limiter le réchauffement planétaire à un niveau donné, compte tenu des impacts des autres émissions anthropiques. {2.2.2}

Budget carbone restant : Estimation des émissions mondiales nettes cumulées anthropiques de CO_2, depuis une date donnée jusqu'au moment où ces émissions deviennent égales à zéro, qui permettraient, avec une certaine probabilité, de limiter le réchauffement planétaire à un niveau déterminé, compte tenu des impacts des autres émissions anthropiques. {2.2.2}

Dépassement de température : Dépassement temporaire d'un niveau donné de réchauffement planétaire.

Trajectoires d'émissions : Dans le présent *Résumé à l'intention des décideurs*, il est entendu par « trajectoires d'émissions » les trajectoires modélisées des émissions mondiales anthropiques au cours du XXIe siècle. Les trajectoires d'émissions sont classées selon leur trajectoire de température au cours du XXIe siècle : les trajectoires qui prévoient, sur la base des connaissances actuelles, une probabilité d'au moins 50 % de limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C au plus sont des les trajectoires « sans dépassement » ; celles qui prévoient une limitation du réchauffement à 1,6 °C au plus, suivie d'un retour à un réchauffement de 1,5 °C en 2100 au plus tard sont les trajectoires à « dépassement minime au-dessus de 1,5 °C » ; alors que celles qui prévoient un réchauffement supérieur à 1,6 °C, mais qui revient à 1,5 °C à 2100 au plus tard sont les trajectoires à « dépassement marqué ».

Impacts : Effets du changement climatique sur les systèmes naturels et humains. Les impacts peuvent avoir des répercussions positives ou négatives sur les moyens de subsistance, la santé et le bien-être, les écosystèmes et les espèces, les services, les infrastructures, ainsi que les biens économiques, sociaux et culturels.

Risque : Conséquences néfastes éventuelles d'un aléa d'origine climatique sur des systèmes humains ou naturels, dues à la nature de l'aléa considéré, ainsi qu'à la vulnérabilité et au degré d'exposition du système concerné. La probabilité d'exposition à un aléa et l'ampleur de ses effets sont des éléments constitutifs du risque. Par risque, on entend également les conséquences néfastes éventuelles des mesures d'adaptation ou d'atténuation prises pour faire face au changement climatique.

Trajectoires de développement favorisant la résilience face au changement climatique : Trajectoires qui consolident le développement durable à diverses échelles et amplifient la lutte contre la pauvreté grâce à des transitions et des transformations équitables de la société et des systèmes, tout en réduisant la menace que représente le changement climatique grâce à la mise en place de mesures ambitieuses d'atténuation et d'adaptation et au renforcement de la résilience face au changement climatique.

19 Dans les rapports précédents du GIEC, à l'image des publications dont ils s'inspiraient, un ensemble varié de paramètres quasi équivalents avaient été utilisés pour la variation de la température moyenne à la surface du globe.

giec

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR l'évolution du climat

Changement climatique et terres émergées

Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres

Résumé à l'intention des décideurs



GT I GT II GT III

OMM PNUE

Changement climatique et terres émergées

Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres

Résumé à l'intention des décideurs

Publié sous la direction de

Valérie Masson-Delmotte
Coprésidente du Groupe de travail I

Panmao Zhai
Coprésident du Groupe de travail I

Hans-Otto Pörtner
Coprésident du Groupe de travail II

Debra Roberts
Coprésidente du Groupe de travail II

Jim Skea
Coprésident du Groupe de travail III

Eduardo Calvo Buendía
Coprésident de l'Équipe spéciale du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (TFI)

Priyadarshi R. Shukla
Coprésident du Groupe de travail III

Raphael Slade
Chef de l'Unité d'appui technique (science)

Sarah Connors
Administratrice scientifique principale

Renée van Diemen
Scientifique

Marion Ferrat
Cheffe de la communication

Eamon Haughey
Scientifique principal

Sigourney Luz
Responsable de la communication

Suvadip Neogi
Scientifique

Minal Pathak
Scientifique principale

Jan Petzold
Administratreur scientifique

Joana Portugal Pereira
Scientifique principale

Purvi Vyas
Administratrice scientifique

Elizabeth Huntley
Cheffe de l'Unité d'appui technique (opérations)

Katie Kissick
Cheffe de l'Unité d'appui technique (opérations)

Malek Belkacemi
Responsable informatique/Web

Juliette Malley
Administratrice principale

Photo de couverture: Paysage agricole entre Ankara et Hattousa, en Anatolie (Turquie) (40°00'N–33°35'E)
www.yannarthusbertrand.org | www.goodplanet.org. ©Yann Arthus-Bertrand

© 2020 Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
Il est possible de se procurer des exemplaires électroniques du présent Résumé à l'intention des décideurs sur le site Web du GIEC
www.ipcc.ch

ISBN 978-92-9169-254-5

Résumé à l'intention des Décideurs

RID

Résumé à l'intention des décideurs

Rédaction :
Almut Arneth (Allemagne), Humberto Barbosa (Brésil), Tim Benton (Royaume-Uni), Katherine Calvin (États-Unis d'Amérique), Eduardo Calvo Buendía (Pérou), Sarah Connors (Royaume-Uni), Annette Cowie (Australie), Edouard Davin (France/Suisse), Fatima Denton (Gambie), Renée van Diemen (Pays-Bas/Royaume-Uni), Fatima Driouech (Maroc), Aziz Elbehri (Maroc), Jason Evans (Australie), Marion Ferrat (France), Jordan Harold (Royaume-Uni), Eamon Haughey (Irlande), Mario Herrero (Australie/Costa Rica), Joanna House (Royaume-Uni), Mark Howden (Australie), Margot Hurlbert (Canada), Gensuo Jia (Chine), Tom Gabriel Johansen (Norvège), Jagdish Krishnaswamy (Inde), Werner Kurz (Canada), Christopher Lennard (Afrique du Sud), Soojeong Myeong (République de Corée), Nagmeldin Mahmoud (Soudan), Valérie Masson-Delmotte (France), Cheikh Mbow (Sénégal), Pamela McElwee (États-Unis d'Amérique), Alisher Mirzabaev (Allemagne/Ouzbékistan), Angela Morelli (Norvège/Italie), Wilfran Moufouma-Okia (France), Dalila Nedjraoui (Algérie), Suvadip Neogi (Inde), Johnson Nkem (Cameroun), Nathalie De Noblet-Ducoudré (France), Lennart Olsson (Suède), Minal Pathak (Inde), Jan Petzold (Allemagne), Ramón Pichs-Madruga (Cuba), Elvira Poloczanska (Royaume-Uni/Australie), Alexander Popp (Allemagne), Hans-Otto Pörtner (Allemagne), Joana Portugal Pereira (Royaume-Uni), Prajal Pradhan (Népal/Allemagne), Andy Reisinger (Nouvelle-Zélande), Debra C. Roberts (Afrique du Sud), Cynthia Rosenzweig (États-Unis d'Amérique), Mark Rounsevell (Royaume-Uni/Allemagne), Elena Shevliakova (États-Unis d'Amérique), Priyadarshi R. Shukla (Inde), Jim Skea (Royaume-Uni), Raphael Slade (Royaume-Uni), Pete Smith (Royaume-Uni), Youba Sokona (Mali), Denis Jean Sonwa (Cameroun), Jean-Francois Soussana (France), Francesco Tubiello (États-Unis d'Amérique/Italie), Louis Verchot (États-Unis d'Amérique/Colombie), Koko Warner (États-Unis d'Amérique/Allemagne), Nora M. Weyer (Allemagne), Jianguo Wu (Chine), Noureddine Yassaa (Algérie), Panmao Zhai (Chine), Zinta Zommers (Lettonie).

Résumé à référencer comme suit :

GIEC, 2019 : Résumé à l'intention des décideurs, Changement climatique et terres émergées : rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (dir. publ.)]. Sous presse

Remerciements

Le Rapport spécial sur le changement climatique et les terres émergées est une grande première pour le GIEC. En effet, c'est la première fois qu'un rapport est élaboré par les trois groupes de travail du GIEC, en collaboration avec l'Équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (TFI), et la première fois que les auteurs issus de pays en développement dépassent en nombre ceux des pays développés. L'élaboration du rapport a été marquée par un niveau exemplaire de collaboration et d'interdisciplinarité, qui témoigne de l'ampleur du mandat confié aux auteurs par le GIEC. Elle a rassemblé des auteurs non seulement des communautés scientifiques avec lesquelles le GIEC travaille habituellement, mais également de celles d'organismes apparentés des Nations Unies, tels que la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), l'Interface science-politique de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

Nous tenons à rendre hommage au 107 auteurs coordonnateurs principaux, auteurs principaux et éditeurs-réviseurs, issus de 52 pays, sans qui le rapport n'aurait pu voir le jour. Ils ont travaillé bénévolement, sans compter les heures, et participé à quatre réunions des auteurs principaux organisées aux quatre coins du monde. Les interactions constructives entre les auteurs, responsables de la rédaction du rapport, et les éditeurs-réviseurs, chargés de faire en sorte que toutes les observations soient prises en compte, ont grandement contribué au bon déroulement du processus. Du début à la fin, tous et toutes ont fait preuve d'une grande rigueur scientifique assortie d'un véritable esprit de collaboration, sans pour autant se départir de leur bonne humeur. Et ce, alors qu'ils étaient tenus par des délais particulièrement serrés, même s'ils ont pu compter sur les contributions de 96 auteurs collaborateurs.

Nous remercions, en particulier, les scientifiques en début de carrière qui ont pris le temps d'apporter leur pierre aux différents chapitres du rapport. Tous nos remerciements vont à Yuping Bai, Aliyu Barau, Erik Contreras, Abdoul Aziz Diouf, Baldur Janz, Frances Manning, Dorothy Nampanzira, Chuck Chuan Ng, Helen Paulos, Xiyan Xu et Thobekile Zikhali. Nous espérons que cette expérience leur servira de tremplin et que le rôle essentiel qu'ils ont joué sera reconnu à sa juste valeur.

L'élaboration du rapport a été dirigée par un Comité de direction composé de membres du Bureau du GIEC. Nous remercions les collègues qui ont fait partie de ce comité : les co-présidents des groupes de travail et de l'Équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre : Priyadarshi Shukla, Jim Skea, Valérie Masson-Delmotte, Panmao Zhai, Hans-Otto Pörtner, Debra Roberts, Eduardo Calvo Buendía ; les vice-présidents des groupes de travail : Mark Howden, Nagmeldin Mahmoud, Ramón Pichs-Madruga, Andy Reisinger, Noureddine Yassaa ; et Youba Sokona, Vice-Président du GIEC. Les conseils avisés de Youba Sokona, fer de lance du rapport, ont été appréciés par tous. Les membres du Bureau du GIEC ont également apporté leur soutien : Edvin Aldrian, Fatima Driouech, Gregory Flato, Jan Fuglestvedt, Muhammad Tariq et Carolina Vera (Groupe de travail I) ; Andreas Fischlin, Carlos Méndez, Joy Jacqueline Pereira, Roberto A. Sánchez-Rodríguez, Sergey Semenov, Pius Yanda et Taha M. Zatari (Groupe de travail II) ; Amjad Abdulla, Carlo Carraro, Diriba Korecha Dadi et Diana Ürge-Vorsatz (Groupe de travail III).

Plusieurs gouvernements et autres entités ont accueilli et soutenu la réunion préparatoire sur la portée et les grandes lignes du rapport, les quatre réunions des auteurs principaux et la session plénière finale du GIEC : le Gouvernement norvégien et l'Agence norvégienne pour l'environnement, le Gouvernement néo-zélandais et l'Université de Canterbury, le Gouvernement irlandais et l'Agence irlandaise de protection de l'environnement, le Gouvernement colombien et le Centre international d'agriculture tropicale (CIAT), le Gouvernement suisse et l'Organisation météorologique mondiale.

Nous remercions le personnel du Secrétariat du GIEC à Genève, qui a fourni un large éventail de services de soutien : Abdalah Mokssit, Secrétaire du GIEC et ses collègues : Kerstin Stendahl, Jonathan Lynn, Sophie Schlingemann, Jesbin Baidya, Laura Biagioni, Annie Courtin, Oksana Ekzarkho, Judith Ewa, Joelle Fernandez, Andrea Papucides Bach, Nina Peeva, Mxolisi Shongwe et Werani Zabula. Nos remerciements également à Elhousseine Gouaini, qui a rempli les fonctions de responsable des conférences lors de la 50ème session du GIEC.

Plusieurs personnes ont contribué à l'élaboration des éléments visuels du rapport et à la diffusion de ce dernier, notamment Jordan Harold, de l'Université de l'East Anglia, Susan Escott, d'Escott Hunt Ltd, Angela Morelli et Tom Gabriel Johansen, d'Info Design Lab, ainsi que Polly Jackson, Ian Blenkinsop, Autumn Forecast, Francesca Romano et Alice Woodward, de Soapbox Communications Ltd.

La mise au point du rapport a été supervisée par l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III du GIEC, qui bénéficie du généreux soutien financier du Conseil de recherche britannique dans le domaine de l'ingénierie et des sciences physiques (EPSRC) et du Gouvernement britannique, par l'intermédiaire du Ministère britannique des affaires, de l'énergie et des stratégies industrielles (BEIS). En outre, l'Agence irlandaise de protection de l'environnement (EPA) a financé le détachement de deux personnes à l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III, et l'Agence norvégienne pour l'environnement a facilité un grand nombre d'activités de communication. Sans le soutien de tous ces partenaires, ce rapport n'aurait pu prendre forme.

Nous voudrions en particulier exprimer notre reconnaissance aux unités d'appui technique des groupes de travail, dont le dévouement inlassable, le professionnalisme et l'enthousiasme ont permis de mener ce processus à terme. Ce rapport n'aurait pu être élaboré sans l'engagement des membres de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III, pour qui il s'agissait de la première collaboration avec le GIEC, et qui ont relevé le défi sans précédent du sixième Rapport d'évaluation en jouant un rôle central à toutes les étapes de la mise au point du rapport : Raphael Slade, Lizzie Huntley, Katie Kissick, Malek Belkacemi, Renée van Diemen, Marion Ferrat, Eamon Haughey, Bhushan Kankal, Géninha Lisboa, Sigourney Luz, Juliette Malley, Suvadip Neogi, Minal Pathak, Joana Portugal Pereira et Purvi Vyas. Nos remerciements les plus chaleureux vont aussi à Sarah Connors, Melissa Gomis, Robin Matthews, Wilfran Moufouma-Okia, Clotilde Péan, Roz Pidcock, Anna Pirani, Tim Waterfield et Baiquan Zhou de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail I, ainsi qu'à Jan Petzold, Bard Rama, Maike Nicolai, Elvira Poloczanska, Melinda Tignor et Nora Weyer de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail II, pour leur soutien collectif et leur collaboration.

Enfin, nos plus profonds remerciements vont à nos familles et amis qui ont contribué indirectement aux travaux en tolérant les longues périodes d'absence des auteurs et le nombre incalculable d'heures que ces derniers ont consacrées à l'élaboration du rapport, qui accaparait pourtant toute leur attention.

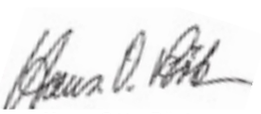
SIGNÉ



Valérie Masson-Delmotte
Coprésidente du Groupe de travail I



Panmao Zhai
Coprésident du Groupe de travail I



Hans-Otto Pörtner
Coprésident du Groupe de travail II



Debra Roberts
Coprésidente du Groupe de travail II



Jim Skea
Coprésident du Groupe de travail III



Eduardo Calvo Buendía
Coprésident de l'Équipe spéciale du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (TFI)



Priyadarshi R. Shukla
Coprésident du Groupe de travail III

Introduction

Ce rapport spécial sur le changement climatique et les terres émergées[1] fait suite à la décision prise par le GIEC en 2016 de publier trois rapports spéciaux[2] pendant le sixième cycle d'évaluation, en tenant compte des propositions des gouvernements et des organisations ayant statut d'observateur[3]. Ce rapport porte sur les flux de gaz à effet de serre (GES) dans les écosystèmes terrestres, l'utilisation et la gestion durable des terres[4] en relation avec l'adaptation et l'atténuation, la désertification[5], la dégradation des terres[6] et la sécurité alimentaire[7]. Ce rapport s'inscrit dans une série de publications récentes, dont le *Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C* (SR15), l'évaluation thématique de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) portant sur la dégradation et la restauration des terres (*Assessment Report on Land Degradation and Restoration*), le rapport de l'IPBES portant sur l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques (*Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services)* et le rapport sur les perspectives mondiales des terres (*Global Land Outlook*) de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD). Le présent rapport fournit une évaluation actualisée de l'état des connaissances[8], tout en veillant à la cohérence et à la complémentarité avec les autres rapports récents.

Ce Résumé à l'intention des décideurs (RID) comprend quatre parties : A) Populations humaines, terres émergées et conditions climatiques dans un monde qui se réchauffe ; B) Mesures d'adaptation et d'atténuation ; C) Conditions propices à la mise en œuvre des options de réponse ; D) Actions à court terme.

Le degré de confiance associé à chacune des principales conclusions est précisé à l'aide du langage « calibré » du GIEC[9] ; les fondements scientifiques de chaque conclusion se trouvent dans les sections du rapport mentionnées en référence.

---

1 Partie terrestre de la biosphère qui comprend les ressources naturelles (le sol, l'air à proximité de la surface, la végétation et les autres biotes, l'eau), les processus écologiques, la topographie et les habitats et infrastructures humaines qui opèrent au sein de ce système.

2 Les trois rapports spéciaux sont : *« Réchauffement planétaire de 1,5 °C. Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté »* ; *« Le changement climatique et les terres émergées : un rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des terres, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres »* ; *« Les océans et la cryosphère dans le contexte du changement climatique »*.

3 Les propositions concernées étaient : le changement climatique et la désertification ; les aspects régionaux de la désertification ; la dégradation des terres – une évaluation des liens et des stratégies intégrées d'atténuation et d'adaptation ; l'agriculture, les forêts et les autres usages des terres ; l'alimentation et l'agriculture ; la sécurité alimentaire et le changement climatique.

4 La gestion durable des terres est définie dans ce rapport comme « la gestion responsable et l'utilisation des ressources terrestres, y compris les sols, l'eau, les animaux et les végétaux, en vue de faire face à l'évolution des besoins humains, tout en assurant simultanément le potentiel productif à long terme de ces ressources et le maintien de leurs fonctions environnementales. »

5 La désertification est définie dans ce rapport comme « la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches résultant de nombreux facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ».

6 La dégradation des terres est définie dans ce rapport comme « une tendance négative de l'état des terres, causée par des processus directs ou indirects induits par les activités humaines, y compris le changement climatique d'origine anthropique, et qui se traduit par une réduction à long-terme et une perte d'au moins un des éléments suivants : productivité biologique, intégrité écologique ou valeur pour les êtres humains ».

7 La sécurité alimentaire est définie dans ce rapport comme « une situation dans laquelle tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique, social et économique garanti à une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie saine et active ».

8 L'évaluation porte sur la littérature scientifique dont la publication a été acceptée avant le 7 avril 2019.

9 Chaque conclusion se fonde sur une évaluation des éléments probants et de la concordance entre eux. Cinq qualificatifs sont utilisés pour exprimer le degré de confiance (très faible, faible, moyen, élevé et très élevé), qui apparaît en italique : *degré de confiance moyen*, par exemple. Les qualificatifs ci-après indiquent la probabilité évaluée d'un résultat : quasiment certain (probabilité de 99 à 100 %), *très probable* (90 à 100 %), probable (66 à 100 %), à peu près aussi probable qu'improbable (33 à 66 %), improbable (0 à 33 %), très improbable (0 à 10 %), exceptionnellement improbable (0 à 1 %). D'autres qualificatifs peuvent être employés le cas échéant : extrêmement probable (95 à 100 %), plus probable qu'improbable (> 50 à 100 %), plus improbable que probable (0 à < 50 %) et extrêmement improbable (0 à 5 %). La probabilité apparaît en italique : par exemple *très probable*. Cette pratique est conforme aux règles suivies dans le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC.

A. Populations humaines, terres émergées et conditions climatiques dans un monde qui se réchauffe

A.1 Les terres émergées constituent la base principale des moyens de subsistance et du bien-être des êtres humains, incluant l'approvisionnement en nourriture, eau douce et en de multiples autres services écosystémiques, ainsi que la biodiversité. Les activités humaines affectent directement plus de 70 % (fourchette *probable* 69 à 76 %) de toute la surface terrestre libre de glace (*degré de confiance élevé*). Les terres émergées jouent également un rôle important dans le système climatique. {1.1, 1.2, 2.3, 2.4, figure RID.1}

A.1.1 Les populations humaines utilisent actuellement un quart à un tiers de la production primaire nette potentielle des terres[10] sous la forme de denrées alimentaires, d'aliments pour animaux, de fibres, de bois ou d'énergie. Les terres émergées fournissent la base de nombreux autres fonctions et services écosystémiques[11], y compris les services culturels et les services de régulation, qui sont essentiels à l'humanité (*degré de confiance élevé*). Dans une approche économique, les services écosystémiques terrestres mondiaux ont été évalués sur une base annuelle comme étant approximativement équivalent au produit intérieur brut annuel mondial[12] (*degré de confiance moyen*). {1.1, 1.2, 3.2, 4.1, 5.1, 5.5, figure RID.1}

A.1.2 Les terres émergées sont à la fois une source et un puits de gaz à effet de serre (GES) et jouent un rôle clef dans les échanges d'énergie, d'eau et d'aérosols entre la surface et l'atmosphère. À des degrés divers, les écosystèmes et la biodiversité terrestres sont vulnérables au changement climatique en cours et aux conditions météorologiques et climatiques extrêmes. La gestion durable des terres peut contribuer à réduire les effets néfastes que plusieurs facteurs de stress, dont le changement climatique, ont sur les écosystèmes et les sociétés (*degré de confiance élevé*). {1.1, 1.2, 3.2, 4.1, 5.1, 5.5, figure RID.1}

A.1.3 Les données disponibles depuis 1961[13] montrent que l'accroissement démographique mondial et l'évolution de la consommation par habitant de denrées alimentaires, d'aliments pour animaux, de fibres, de bois et d'énergie ont entraîné un taux sans précédent d'utilisation des terres et de l'eau douce (*degré de confiance très élevé*), l'agriculture contribuant aujourd'hui pour environ 70 % de l'utilisation mondiale d'eau douce (*degré de confiance moyen*). L'expansion des superficies dédiées à l'agriculture et à la sylviculture, y compris à des fins commerciales, et les productivités accrues des terres agricoles et forestières ont favorisé la consommation et l'accès à la nourriture d'une population croissante *(degré de confiance élevé)*. Avec de grandes variations régionales, ces changements ont contribué à l'augmentation des émissions nettes de GES (*degré de confiance très élevé*), à la perte d'écosystèmes naturels (par exemple de forêts, de savanes, de prairies naturelles et de zones humides) et au déclin de la biodiversité (*degré de confiance élevé*). {1.1, 1.3, 5.1, 5.5, figure RID.1}

A.1.4 Les données disponibles depuis 1961 montrent que l'approvisionnement en huiles végétales et viande par habitant a plus que doublé et l'apport de calories alimentaires par habitant a augmenté d'un tiers environ (*degré de confiance élevé*). Actuellement, 25 à 30 % de la production alimentaire totale est perdue ou gaspillée (*degré de confiance moyen*). Ces facteurs s'accompagnent d'émissions supplémentaires de GES (*degré de confiance élevé*). Les changements dans les modes de consommation ont contribué au surpoids ou à l'obésité d'environ 2 milliards d'adultes (*degré de confiance élevé*). Environ 821 millions de personnes sont encore sous-alimentées (*degré de confiance élevé*). {1.1, 1.3, 5.1, 5.5, figure RID.1}

A.1.5 Environ un quart de la surface terrestre libre de glace subit une dégradation induite par les activités humaines (*degré de confiance moyen*). La vitesse d'érosion des sols dans les terrains agricoles excéderait actuellement de 10 à 20 fois (sans labour) à plus de 100 fois (avec labour classique) le rythme auquel se forment les sols (*degré de confiance moyen*). Le changement climatique aggrave la dégradation des terres, particulièrement dans les zones côtières de basse altitude, les deltas fluviaux, les zones arides et les zones de pergélisol (*degré de confiance élevé*). Au cours de la période 1961-2013, la proportion moyenne de zones arides touchées par la sécheresse a augmenté d'un peu plus de 1 % par an, avec une grande variabilité interannuelle. En 2015, environ 500 (380-620) millions de personnes vivaient dans des zones qui ont subi une désertification entre les années 1980 et les années 2000. Les populations les plus touchées sont en Asie du Sud et de l'Est, autour du Sahara dans une région incluant l'Afrique du Nord, et au Moyen-Orient en incluant la péninsule arabique (*degré de confiance faible*). D'autres zones arides ont également souffert de désertification. Les populations vivant dans des zones déjà dégradées ou désertifiées sont de plus en plus durement éprouvées par le changement climatique (*degré de confiance élevé*). {1.1, 1.2, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3, figure RID.1}

---

10 La production primaire nette potentielle des terres est définie dans ce rapport comme la quantité de carbone accumulée par photosynthèse moins la quantité perdue par la respiration des plantes pendant une période de temps déterminée, qui prévaudrait en l'absence d'usage des terres.

11 Dans son cadre conceptuel, l'IPBES utilise « les contributions apportées par la nature aux populations », dans lesquelles elle inclut les biens et les services fournis par les écosystèmes.

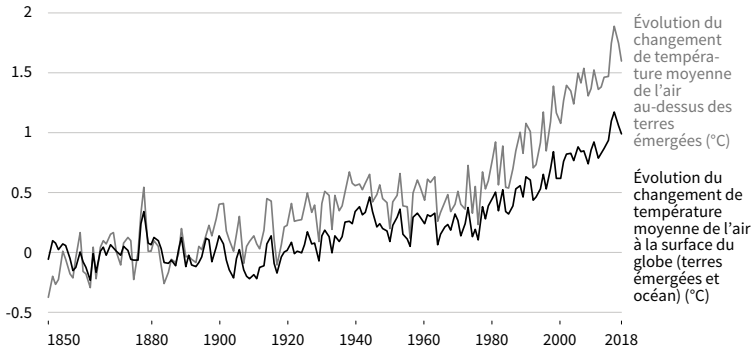
12 Montant évalué à 75 000 milliards de dollars en 2011, sur la base de la valeur du dollar américains de 2007.

13 Cette constatation est basée sur les données de statistiques nationales les plus complètes disponibles dans la base de données FAOSTAT, qui débute en 1961. Cela ne signifie pas que les changements mentionnés ont commencé en 1961. Les changements d'utilisation des terres ont débuté bien avant la période préindustrielle et se poursuivent encore aujourd'hui.

Usages des terres et changement climatique observé

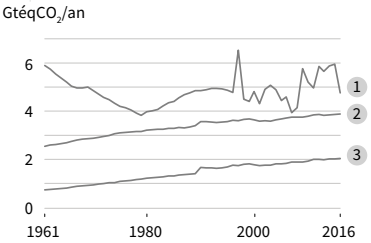
A. Évolution observée de la température par rapport à 1850-1900
Depuis la période préindustrielle (1850-1900), la température moyenne de l'air à la surface des terres émergées a augmenté considérablement plus que la température moyenne à la surface du globe (terres émergées et océan).

ÉVOLUTION du changement de température par rapport à 1850-1900 (°C)

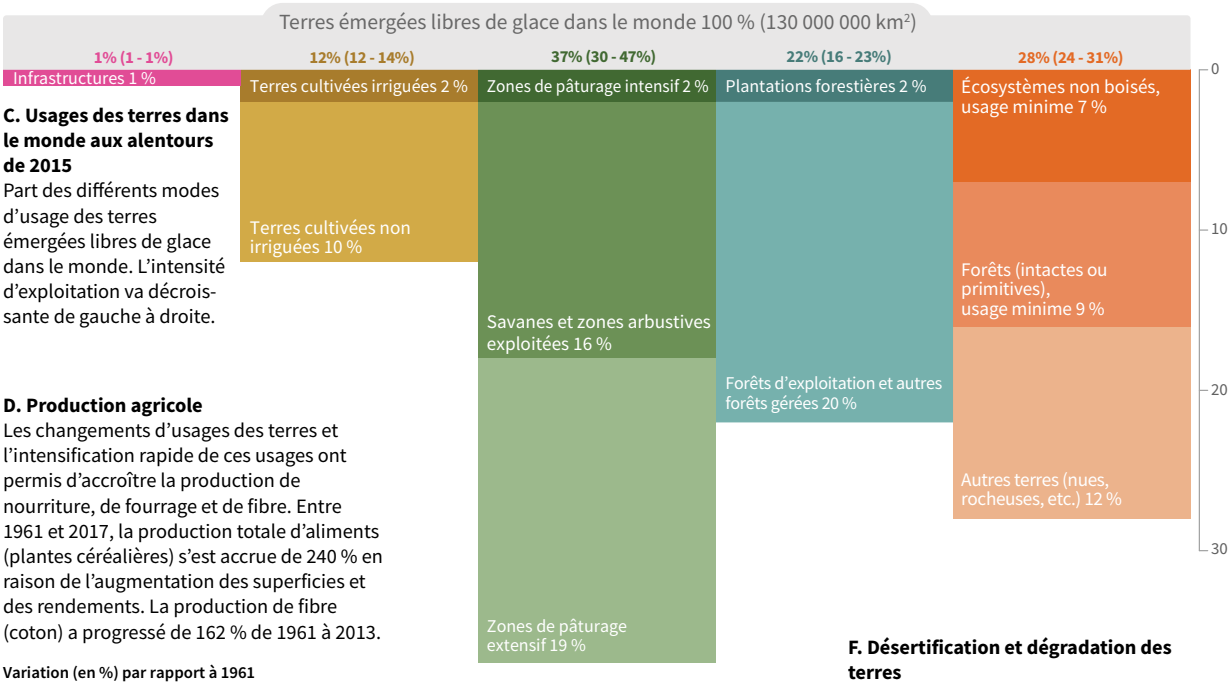


B. Émissions de GES
Le secteur AFOLU (agriculture, foresterie et autres usages des terres) est à l'origine d'environ 23 % de toutes les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (de 2007 à 2016).

ÉVOLUTION des changements d'émissions par rapport à 1961
1. Émissions nettes de CO_2 par le secteur FOLU ($GtCO_2$/an)
2. Émissions de CH_4 par le secteur agricole ($GtéqCO_2$/an)
3. Émissions de N_2O par le secteur agricole ($GtéqCO_2$/an)

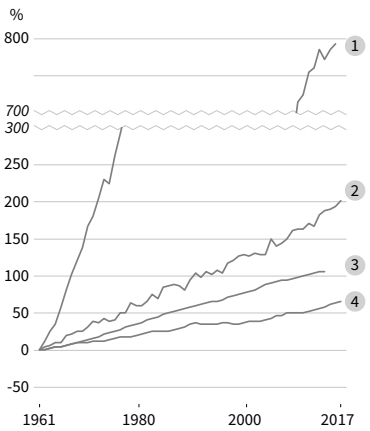


C. Usages des terres dans le monde aux alentours de 2015
Part des différents modes d'usage des terres émergées libres de glace dans le monde. L'intensité d'exploitation va décroissante de gauche à droite.



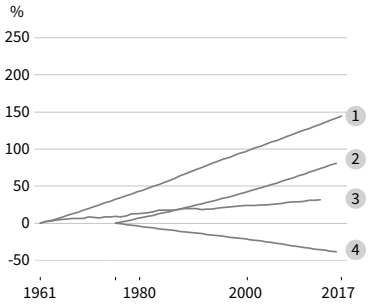
D. Production agricole
Les changements d'usages des terres et l'intensification rapide de ces usages ont permis d'accroître la production de nourriture, de fourrage et de fibre. Entre 1961 et 2017, la production totale d'aliments (plantes céréalières) s'est accrue de 240 % en raison de l'augmentation des superficies et des rendements. La production de fibre (coton) a progressé de 162 % de 1961 à 2013.

Variation (en %) par rapport à 1961
1. Emploi d'engrais azotés inorganiques
2. Rendements céréaliers
3. Volume d'eau d'irrigation
4. Nombre de têtes de bétail (ruminants)



E. Demande en denrées alimentaires
La hausse de la production est liée à l'évolution de la consommation.

Variation (en %) par rapport à 1961 et 1975
1. Population
2. Prévalence de surcharge pondérale et d'obésité
3. Nombre total de calories par habitant
4. Prévalence d'insuffisance pondérale



F. Désertification et dégradation des terres
Le changement d'usage des terres, l'intensification de l'exploitation et l'évolution du climat ont contribué à la désertification et à la dégradation des terres.

Variation (en %) par rapport à 1961 et 1970
1. Population dans des zones touchées par la désertification
2. Zones arides souffrant de sécheresse annuelle
3. Étendue des zones humides intérieures

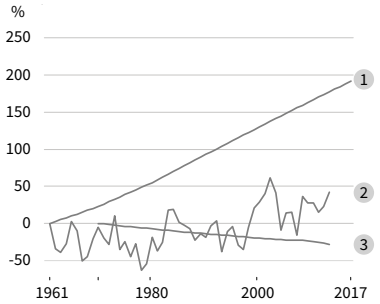


Figure RID.1 Usages des terres et changement climatique observé | Une représentation de l'utilisation des terres et du changement climatique observé traités dans ce rapport. Les parties A à F décrivent l'état et les tendances de certaines variables liées aux usages des terres et au climat qui correspondent à plusieurs points essentiels abordés par ce rapport. Les séries temporelles annuelles présentées dans les parties B et D à F reposent sur les données disponibles les plus complètes issues des statistiques nationales, la plupart provenant de la base de données FAOSTAT, qui débute en 1961. Dans les parties D à F, les valeurs en ordonnée sont exprimées de manière relative aux valeurs de l'année de départ des séries temporelles (ramenées à zéro). Sources des données et notes : **A :** Les courbes de réchauffement correspondent à la moyenne de quatre jeux de données. {2.1 ; figure 2.2 ; tableau 2.1} **B :** Les émissions de N_2O et de CH_4 issues du secteur agricole proviennent de FAOSTAT ; les émissions nettes de CO_2 par le secteur FOLU (foresterie et autres usages des terres) correspondent à la moyenne de deux modèles globaux de comptabilisation (incluant les émissions issues des feux de tourbières depuis 1997). Tous les chiffres sont exprimés en éqCO_2 et s'appuient sur les valeurs de potentiel de réchauffement planétaire à 100 ans du cinquième Rapport d'évaluation, sans rétroaction climat-carbone (N_2O = 265 ; CH_4 = 28). {voir tableau RID.1, 1.1, 2.3} **C :** Représente les fractions des différents usages des terres libres de glace dans le monde aux alentours de 2015, ordonnées selon un gradient d'intensité d'usage des terres décroissant de gauche à droite. Chaque barre du diagramme représente une grande catégorie d'occupation des terres ; les nombres notés au-dessus précisent la proportion de la superficie totale libre de glace, avec les plages d'incertitude entre parenthèses. Un pâturage intensif correspond à une densité du cheptel supérieur à 100 têtes/km^2. La superficie des « forêts gérées pour le bois d'œuvre et d'autres usages » a été obtenue en soustrayant de la superficie forestière totale la superficie des « forêts intactes ou primaires ». {1.2, tableau 1.1, figure 1.3} **D :** Noter les deux sections de l'axe utilisé pour représenter l'utilisation d'engrais. Le pourcentage d'augmentation important de l'utilisation d'engrais s'explique par le faible niveau d'utilisation d'engrais en 1961 et traduit à la fois, une hausse des apports d'engrais par unité de surface et une expansion des cultures et des prairies fertilisées pour accroître la production alimentaire. {1.1, figure 1.3} **E :** Les populations en surpoids sont définies comme celles ayant un indice de masse corporelle supérieur à 25 kg m^{-2}, celles en insuffisance pondérale comme celles ayant un indice inférieur à18,5 kg m^{-2}. {5.1, 5.2} **F :** La superficie des zones arides a été estimée à partir des données TerraClimate de précipitation et d'évapotranspiration potentielle (entre 1980 et 2015) afin d'identifier les zones présentant un indice d'aridité inférieur à 0,65. Les données démographiques proviennent de la base de données HYDE3.2. Les zones de sécheresse sont basées sur l'indice de sécheresse du Centre mondial de climatologie des précipitations (GPCC) agrégé sur 12 mois. L'étendue des zones humides intérieures (tourbières comprises) repose sur les données agrégées de plus de 2 000 séries chronologiques donnant la variation au cours du temps de la superficie des zones humides locales. {3.1, 4.2, 4.6}

A.2 Depuis la période préindustrielle, la température de l'air à la surface des terres émergées a augmenté près de deux fois plus que la température moyenne mondiale (*degré de confiance élevé*). Le changement climatique, y compris l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, a eu un impact négatif sur la sécurité alimentaire et sur les écosystèmes terrestres et a contribué à la désertification et à la dégradation des terres dans de nombreuses régions (*degré de confiance élevé*). {2.2, 3.2, 4.2, 4.3, 4.4, 5.1, 5.2, résumé du chapitre 7, 7.2}

A.2.1 Depuis la période préindustrielle (1850-1900), la hausse de la température moyenne de l'air observée à la surface des terres émergées a été considérablement plus marquée que celle de la température moyenne à la surface de la planète (terres et océans) (GMST) (*degré de confiance élevé*). Entre la période 1850-1900 et la période 2006-2015, la température moyenne de l'air à la surface des terres émergées a augmenté de 1,53 °C (fourchette très probable : 1,38 °C à 1,68 °C), alors que la GMST s'est élevée de 0,87 °C (fourchette probable : 0,75 °C à 0,99 °C). {2.2.1, figure RID.1}

A.2.2 Le réchauffement a entraîné une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des événements chauds, par exemple les vagues de chaleur[14], dans la plupart des régions terrestres (*degré de confiance élevé*). La fréquence et l'intensité des sécheresses ont augmenté dans certaines régions (dont la Méditerranée, l'Asie de l'Ouest, de nombreuses parties de l'Amérique du Sud, une grande part de l'Afrique, et l'Asie du Nord-Est) (*degré de confiance moyen*) et il y a eu une augmentation de l'intensité des épisodes de fortes précipitations à l'échelle mondiale (*degré de confiance moyen*). {2.2.5, 4.2.3, 5.2}

A.2.3 Les observations par satellite[15] montrent un verdissement de la végétation[16] au cours des trois dernières décennies dans certaines régions d'Asie, d'Europe, d'Amérique du Sud, du centre de l'Amérique du Nord et du sud-ouest de l'Australie. Ce verdissement résulte à la fois d'un allongement de la saison de croissance, des dépôts d'azote, de la fertilisation par le CO_2[17] et de la gestion des terres (*degré de confiance élevé*). Un brunissement de la végétation[18] a été observé dans certaines régions, dont le nord de l'Eurasie, certaines parties de l'Amérique du Nord, de l'Asie centrale et du bassin du Congo, sous l'effet principalement de stress hydriques (*degré de confiance moyen*). À l'échelle mondiale, la superficie des régions touchées par le verdissement excède celle des régions touchées par le brunissement de la végétation (*degré de confiance élevé*). {2.2.3, encadré 2.3, 2.2.4, 3.2.1, 3.2.2, 4.3.1, 4.3.2, 4.6.2, 5.2.2}

A.2.4 La fréquence et l'intensité des tempêtes de poussière ont augmenté au cours des dernières décennies du fait des changements d'usage et d'affectation des terres et de facteurs liés au climat dans beaucoup de zones arides ; ce qui a eu des impacts négatifs croissants sur la santé humaine dans des régions telles que la Péninsule arabique, autour du Moyen-Orient, et en Asie centrale (*degré de confiance élevé*)[19]. {2.4.1, 3.4.2}

A.2.5 Dans certaines zones arides, l'augmentation de la température à la surface des terres et de l'évapotranspiration et la diminution du volume des précipitations, en interaction avec la variabilité du climat et les activités humaines, ont contribué à la désertification. Ces zones arides comprennent l'Afrique subsaharienne, des parties de l'Asie de l'Est et de l'Asie centrale, ainsi que l'Australie. (*Degré de confiance moyen*) {2.2, 3.2.2, 4.4.1}

---

[14] Une vague de chaleur est définie dans ce rapport comme « une période de conditions atmosphériques anormalement chaudes ». Vagues de chaleur ou canicules (*heatwaves*) et épisodes chauds (*warm spells*) ont des définitions variables et qui, parfois, se recoupent.

[15] L'interprétation des observations par satellite peut être affectée par des insuffisances de validation au sol et d'étalonnage des capteurs. En outre, leur résolution spatiale peut rendre difficile la détermination de changements à petite échelle.

[16] Le verdissement de la végétation est défini dans ce rapport comme une augmentation de la biomasse végétale photosynthétiquement active, et déduite des observations par satellite.

[17] La fertilisation par le CO_2 est définie dans ce rapport comme l'intensification de la croissance des végétaux due à l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone (CO_2). L'ampleur de la fertilisation dépend de la disponibilité en eau et nutriments.

[18] Le brunissement de la végétation est défini dans ce rapport comme la diminution de la biomasse végétale photosynthétiquement active, et déduite des observations par satellite.

[19] Les éléments probants relatifs à de telles tendances pour les tempêtes de poussière et leurs impacts sanitaires sont limités pour d'autres régions dans la littérature scientifique évaluée dans le présent rapport.

A.2.6 Le réchauffement planétaire a provoqué des déplacements de zones climatiques dans de nombreuses régions du monde dont l'expansion des zones de climat aride et la contraction des zones de climat polaire (*degré de confiance élevé*). En conséquence, de nombreuses espèces végétales et animales ont connu des changements dans leur aire de répartition, leur abondance et des modifications dans leurs activités saisonnières (*degré de confiance élevé*). {2.2, 3.2.2, 4.4.1}

A.2.7 Le changement climatique peut exacerber les processus de dégradation des terres (*degré de confiance élevé*), notamment par l'augmentation de l'intensité des précipitations, des inondations, de la fréquence et de la gravité des sécheresses, des stress thermiques, des périodes de sécheresse, du vent, de l'élévation du niveau de la mer et de l'action des vagues, du dégel du pergélisol ; la gestion des terres en module les effets. L'érosion continue des zones côtières s'intensifie et s'étend, l'élévation du niveau de la mer s'ajoutant aux pressions causées par l'usage des terres dans certaines régions (*degré de confiance moyen*). {4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.4.1, 4.4.2, 4.9.6, tableau 4.1, 7.2.1, 7.2.2}

A.2.8 Le changement climatique a déjà affecté la sécurité alimentaire du fait du réchauffement, de la modification des régimes de précipitations et de la fréquence accrue de certains phénomènes extrêmes (*degré de confiance élevé*). Dans de nombreuses régions des basses latitudes, les rendements de certaines cultures (par exemple, le maïs et le blé) ont diminué, tandis que dans de nombreuses régions des latitudes plus élevées, les rendements de certains cultures (par exemple, le maïs, le blé et la betterave sucrière) ont augmenté ces dernières décennies *(degré de confiance élevé)*. Le changement climatique a entraîné une baisse des taux de croissance des animaux et de leur productivité dans les systèmes pastoraux en Afrique (*degré de confiance élevé)*. Il existe des preuves solides que les ravageurs et les maladies agricoles ont déjà réagi au changement climatique entraînant à la fois des augmentations et des diminutions des infestations (*degré de confiance élevé*). Sur la base des connaissances autochtones et locales, le changement climatique affecte la sécurité alimentaire dans les zones arides, en particulier en Afrique, et dans les régions de haute montagne en Asie et en Amérique du Sud[20]. {5.2.1, 5.2.2, 7.2.2}

A.3 Le secteur AFOLU (agriculture, foresterie et autres usages des terres) a été à l'origine d'environ 13 % des émissions de CO_2, 44 % des émissions de méthane (CH_4) et 82 % des émissions de protoxyde d'azote (N_2O) rejetées par les activités humaines au niveau mondial entre 2007 et 2016, soit 23 % (12,0 ± 3,0 Gt$éqCO_2$ an^{-1}) du total net des émissions anthropiques de GES[21] (*degré de confiance moyen*). La réaction naturelle des terres aux changements environnementaux induits par les activités humaines a provoqué un puits net de quelque 11,2 GtCO_2 an^{-1} pendant la période 2007-2016 (équivalant à 29 % des émissions totales de CO_2) (*degré de confiance moyen*) ; la persistance de ce puits est incertaine du fait du changement climatique (*degré de confiance élevé*). Si les émissions associées aux activités de pré- et de post-production dans le système alimentaire mondial[22] sont incluses, les émissions se situeraient entre 21 et 37 % du total net des émissions anthropiques de GES (*degré de confiance moyen*). {2.3, tableau 2.2, 5.4}

A.3.1 Les terres émergées sont à la fois une source et un puits de CO_2 en raison de facteurs anthropiques et naturels, d'où la difficulté de séparer les flux d'origine anthropique de ceux d'origine naturelle (*degré de confiance très élevé*). Les modèles globaux estiment à 5,2 ± 2,6 GtCO_2 an^{-1} (fourchette *probable*) les émissions nettes de CO_2 dues aux usages et aux changements d'affectation des terres entre 2007 et 2016. Ces émissions nettes sont en grande partie dues à la déforestation, partiellement compensée par le boisement/reboisement, et aux émissions et absorptions dues à d'autres activités d'usage des terres (*degré de confiance très élevé*) (tableau RID.1)[23]. Il n'y a pas de tendance claire dans les émissions annuelles depuis 1990 (*degré de confiance moyen*) (figure RID.1). {1.1, 2.3, tableau 2.2, tableau 2.3}

A.3.2 La réaction naturelle des terres émergées aux changements environnementaux induits par les activités humaines, tels que l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2, les dépôts d'azote et le changement climatique, est une absorption nette de 11,2 ± 2,6 GtCO_2 an^{-1} de CO_2 (fourchette *probable*) au niveau mondial entre 2007 et 2016 (tableau RID.1). Lorsque l'on ajoute cette absorption nette aux émissions nettes provenant du secteur AFOLU, le résultat est une absorption nette de CO_2 par les terres émergées de 6,0 ± 2,6 GtCO_2 an^{-1} au cours de la période 2007 à 2016 (fourchette *probable*). Les projections montrent que l'augmentation nette future des émissions de CO_2 par la végétation et les sols en réponse au changement climatique contrecarrera l'augmentation des absorptions dues à la fertilisation par le CO_2 et à l'allongement des saisons de croissance (*degré de confiance élevé*). L'équilibre entre ces processus est une source majeure d'incertitude pour déterminer le devenir du puits de carbone terrestre. Le dégel projeté du pergélisol devrait accentuer la perte de carbone des sols (*degré de confiance élevé*). Au cours du XXI^{e} siècle, la croissance de la végétation dans ces zones pourrait compenser en partie cette perte (*degré de confiance faible*). {Encadré 2.3, 2.3.1, 2.5.3, 2.7 ; tableau 2.3}

---

[20] L'évaluation a porté sur une littérature scientifique dont les méthodologies comportaient des entretiens et des enquêtes auprès des populations autochtones et des communautés locales.

[21] Cette évaluation porte uniquement sur le CO_2, le CH_4 et le N_2O.

[22] Le système alimentaire mondial est défini dans ce rapport comme « tous les éléments (environnement, populations, intrants, processus, infrastructures, institutions, etc.) et activités liés à la production, à la transformation, à la distribution, à la préparation et à la consommation de denrées alimentaires, ainsi que les résultats de ces activités, y compris les résultats socio-économiques et environnementaux au niveau mondial ». Les émissions ne sont pas directement comparables aux inventaires nationaux préparés conformément aux *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*.

[23] Les flux anthropiques nets de CO_2 fournis par les modèles d'inventaire ou de comptabilisation du carbone comprennent deux flux bruts opposés : les émissions brutes (environ 20 GtCO_2 an^{-1}) issues de la déforestation, la culture des sols et l'oxydation des produits du bois, d'une part, et les absorptions brutes (environ 14 GtCO_2 an^{-1}) dues surtout à la croissance des forêts après récolte de bois et déprise agricole, d'autre part (*degré de confiance moyen*).

A.3.3 Les modèles globaux et les inventaires nationaux de GES utilisent des méthodes différentes pour estimer les émissions anthropiques et les absorptions de CO_2 dans le secteur des terres. Leurs estimations concordent étroitement pour les changements d'affectation des terres impliquant des forêts (par exemple, les déforestations, les boisements), mais diffèrent dans le cas des forêts gérées. Pour les modèles globaux, toute terre sujette à des récoltes de bois est considérée comme une forêt gérée, tandis que les inventaires nationaux de GES définissent les forêts gérées de façon plus large, conformément aux lignes directrices du GIEC. Sur ces superficies plus larges, les inventaires peuvent aussi considérer implicitement la réaction naturelle des terres aux changements environnementaux induits par les activités humaines comme anthropique, tandis que l'approche par les modèles globaux traite cette réaction comme faisant partie du puits non anthropique {tableau RID.1}. À titre d'illustration : entre 2005 et 2014, la somme des estimations des émissions nettes dans les inventaires nationaux de GES est de 0,1 ± 1,0 $GtCO_2$ an^{-1}, alors que la moyenne des résultats de deux modèles globaux de comptabilisation est de 5,1 ± 2,6 $GtCO_2$ an^{-1} (fourchette *probable*). La prise en compte des différences dans les méthodes peut améliorer la compréhension des estimations des émissions nettes du secteur des terres et leurs applications.

Émissions anthropiques nettes dues au secteur AFOLU (agriculture, foresterie et autres usages des terres) et hors AFOLU (partie 1), et dues au système alimentaire mondial (moyenne 2007-2016)[1] (partie 2). Une valeur positive représente des émissions, une valeur négative des absorptions.

		Émissions anthropiques directes							
Gaz	Unités	Émissions anthropiques nettes dues au secteur AFOLU (agriculture, foresterie et autres usages des terres)			Émissions anthropiques de GES hors AFOLU[6]	Émissions anthropiques nettes totales (AFOLU + hors AFOLU) par gaz	AFOLU en % des émissions anthropiques totales nettes par gaz	Réponse naturelle des terres aux changements environnementaux[7] induits par les activités humaines	Flux net entre les terres et l'atmosphère, toutes terres confondues
Partie 1 : Contribution du secteur AFOLU									
		FOLU	Agriculture	Total					
		A	B	C = B + A	D	**E = C + D**	F = (C/E) ×100	G	A + G
CO_2[2]									
	$GtCO_2$ an^{-1}	5,2 ± 2,6	–[11]	5,2 ± 2,6	33,9 ± 1,8	**39,1 ± 3,2**	~13 %	-11,2 ± 2,6	-6,0 ± 2,0
CH_4[3,8]	Mt CH_4 an^{-1}	19 ± 6	142 ± 43	162 ± 48,6	201 ± 100	**363 ± 111**			
	$GtéqCO_2$ an^{-1}	0,5 ± 0,2	4,0 ± 1,2	4,5 ± 1,4	5,6 ± 2,8	**10,1 ± 3,1**	~44 %		
N_2O[3,8]	Mt N_2O an^{-1}	0,3 ± 0,1	8 ±2	8,3 ± 2,5	2,0 ± 1,0	**10,4 ± 2,7**			
	$GtéqCO_2$ an^{-1}	0,09 ± 0,03	2,2 ± 0,7	2,3 ± 0,7	0,5 ± 0,3	**2,8 ± 0,7**	~82 %		
Total (GHS)	**$GtéqCO_2$ an^{-1}**	**5,8 ± 2,6**	**6,2 ± 1,4**	**12,0 ± 3,0**	**40,0 ± 3,4**	**52,0 ± 4,5**	**~23 %**		
Partie 2 : Contribution du système alimentaire mondial									
		Changement d'affectation des terres	Agriculture		Autres secteurs hors AFOLU[5], de la pré- à la post-production	Émissions totales du système alimentaire mondial			
CO_2[4] changements d'affectation des terres	$GtCO_2$ an^{-1}	4,9 ± 2,5							
CH_4[3,8,9] Agriculture	$GtéqCO_2$ an^{-1}		4,0 ± 1,2						
N_2O[3,8,9] Agriculture	$GtéqCO_2$ an^{-1}		2,2 ± 0,7						
CO_2autres secteurs	$GtCO_2$ an^{-1}				2,4 – 4,8				
Total ($éqCO_2$)[10]	**$GtéqCO_2$ an^{-1}**	**4,9 ± 2,5**	**6,2 ± 1,4**		**2,4 – 4,8**	**10,7 – 19,1**			

Tableau RID.1. | Sources des données et notes :

[1] Les estimations ne sont données que jusqu'en 2016 car il s'agit de la dernière date à laquelle les données sont disponibles pour tous les gaz.

[2] Flux nets anthropiques de CO_2 dus aux changements d'occupation des terres tels que les déboisements et les boisements, à la gestion des terres y compris les récoltes de bois et les repousses, ainsi que le brûlage de tourbières, selon deux modèles de comptabilisation employés dans le 'Global Carbon Budget' et pour le cinquième Rapport du GIEC. Les changements de stocks de carbone dans les sols agricoles sans changement d'usages des terres ne sont pas pris en compte par ces modèles. {2.3.1.2.1, tableau 2.2, encadré 2.2}

[3] Les estimations montrent la moyenne et l'incertitude évaluée à partir de deux bases de données, FAOSTAT et USEPA 2012. {2.3 ; tableau 2.2}

[4] D'après FAOSTAT. Les catégories incluses dans cette valeur sont la « conversion nette de forêts » (déforestation nette), le drainage des sols organiques (terres cultivées et prairies), le brûlage de biomasse (forêts tropicales humides, autres forêts, sols organiques). Sont exclues les terres forestières (gestion des forêts plus expansion nette des forêts), qui sont essentiellement des puits du fait des boisements. Note : les émissions totales dues au secteur FOLU d'après FAOSTAT sont de 2,8 (± 1,4) $GtCO_2$ an^{-1} pour la période 2007-2016. {tableau 2.2, tableau 5.4}

[5] Émissions de CO_2 induites par des activités non incluses dans le secteur AFOLU, principalement les composantes des systèmes alimentaires correspondant à l'énergie (par exemple, le séchage des céréales), aux transports (par exemple, le commerce international.) et à l'industrie (par exemple la synthèse d'engrais inorganiques), y compris les activités de production agricole (par exemple, le chauffage des serres), la pré-production (par exemple, la fabrication des intrants agricoles) et la post-production (par exemple, la transformation agroalimentaire). Cette estimation est basée sur les terres et exclut par conséquent les émissions dues aux pêcheries. Elle inclut les émissions dues aux fibres et à d'autres produits agricoles non alimentaires, ces derniers n'étant pas séparés de l'usage alimentaire dans les bases de données. Les émissions de CO_2 dues au système alimentaire à l'extérieur du secteur AFOLU représentent 6 à 13 % du total des émissions anthropiques de CO_2. Ces émissions sont généralement faibles dans les petites exploitations de subsistance. Une fois ajoutée aux émissions du secteur AFOLU, la part des systèmes alimentaires dans les émissions anthropiques mondiales est estimée entre 21 et 37 %. {5.4.5, tableau 5.4}

[6] Les émissions totales hors AFOLU ont été calculées comme la somme des valeurs des émissions totales d'$éqCO_2$ pour l'énergie, les sources industrielles, les déchets et les autres émissions extraites du 'Global Carbon Project' (GCP) pour le CO_2, y compris l'aviation et le transport maritime internationaux, et extraites de la base de données PRIMAP pour le CH_4 et le N_2O moyennées sur 2007-2014 uniquement car c'était la période sur laquelle les données étaient disponibles {2.3 ; tableau 2.2}.

[7] La réaction naturelle des terres aux changements environnementaux induits par les activités humaines désigne la réaction de la végétation et des sols à des changements environnementaux tels que la hausse de la concentration atmosphérique en CO_2, les dépôts d'azote et le changement climatique. L'estimation fournie représente la moyenne de modèles dynamiques globaux de végétation (DGVM). {2.3.1.2.4, encadré 2.2, tableau 2.3}

[8] Toutes les valeurs exprimées en $éqCO_2$ sont basées sur les valeurs du potentiel de réchauffement planétaire (PRP) à 100 ans du cinquième Rapport d'évaluation, sans rétroaction climat-carbone (N_2O = 265 ; CH_4 = 28). À noter que le PRP a été employée pour les combustibles fossiles et les sources biogéniques de méthane. En prenant un PRP plus élevé pour le CH_4 des combustibles fossiles (30 d'après l'AR_5), les émissions anthropiques totales de CH_4 exprimées en équivalent CO_2 sont alors supérieures de 2 %.

[9] Cette estimation est basée sur les terres et exclut par conséquent les émissions dues aux pêcheries et à l'aquaculture (sauf les émissions dues à la production sur terre d'aliments pour animaux destinés à l'aquaculture). Elle inclut les utilisations non alimentaires (fibres et bioénergie, par exemple), puisque ces utilisations ne sont pas séparées des utilisations alimentaires dans les bases de données. Elle exclut les émissions de gaz autres que le CO_2 associées aux changements d'usage des terres (catégorie FOLU) puisque ces dernières proviennent des feux de forêts et de tourbières.

[10] Les émissions associées aux pertes et aux gaspillages alimentaires sont inclues de manière implicite puisque les émissions du système alimentaire sont liées aux denrées alimentaires produites, incluant les denrées consommées pour se nourrir et les denrées perdues ou gaspillées. Ces dernières sont estimées à 8 à 10 % des émissions anthropiques totales d'équivalent CO_2. {5.5.2.5}

[11] Aucune donnée au niveau mondial n'est disponible pour les émissions agricoles de CO_2.

A.3.4 Les émissions mondiales de méthane du secteur AFOLU au cours de la période 2007-2016 ont été de 162 ± 49 Mt CH_4 an^{-1} (4,5 ± 1,4 $GtéqCO_2$ an^{-1}) (*degré de confiance moyen*). La concentration atmosphérique moyenne mondiale de méthane a augmenté régulièrement entre le milieu des années 1980 et le début des années 1990, a connu une croissance plus lente jusqu'en 1999, puis une période sans croissance entre 1999 et 2006, suivie d'une reprise de sa croissance à partir de 2007 (*degré de confiance élevé*). Les sources biogéniques représentent une proportion des émissions plus grande qu'avant 2000 (*degré de confiance élevé*). L'élevage des ruminants et l'expansion de la riziculture sont des contributeurs importants à l'augmentation de cette concentration (*degré de confiance élevé*). {Tableau 2.2, 2.3.2, 5.4.2, 5.4.3, figure RID.1}.

A.3.5 Les émissions anthropiques de N_2O par le secteur AFOLU sont en hausse et ont été de 8,3 ± 2,5 Mt N_2O an^{-1} (2,3 ± 0,7 $GtéqCO_2$ an^{-1}) pendant la période 2007-2016. Les émissions anthropiques de N_2O (figure RID.1, tableau RID.1) issues des sols sont principalement dues à l'épandage d'azote, y compris à ses inefficacités (épandage excessif ou mal synchronisé avec les besoins des cultures) (*degré de confiance élevé*). Les sols des terres cultivées ont émis environ 3 Mt N_2O an^{-1} (795 $MtéqCO_2$ an^{-1} environ) pendant la période 2007-2016 (*degré de confiance moyen*). Il y a eu une croissance importante des émissions provenant des pâturages gérés en raison de l'augmentation des épandages de fumier (*degré de confiance moyen*). L'élevage sur les pâturages gérés et les pâturages extensifs représentait plus de la moitié des émissions anthropiques totales de N_2O issues de l'agriculture en 2014 (*degré de confiance moyen*). {Tableau 2.1, 2.3.3, 5.4.2, 5.4.3}

A.3.6 Les émissions nettes totales de GES issues du secteur AFOLU représentaient 12,0 ± 3,0 $GtéqCO_2$ an^{-1} entre 2007 et 2016. Cela correspond à 23 % du total net des émissions anthropiques[24] (tableau RID.1). D'autres approches, comme le système alimentaire mondial, incluent les émissions agricoles et le changement d'usage des terres (c'est à dire la déforestation et la dégradation des tourbières), ainsi que les émissions à l'extérieur des exploitations agricoles, issues des secteurs de l'énergie, des transports et de l'industrie pour la production alimentaire. Les émissions à l'intérieur des exploitations agricoles et issues de l'expansion des terres agricoles contribuant au système alimentaire mondial constituent 16 à 27 % des émissions anthropiques totales (*degré de confiance moyen*). Les émissions à l'extérieur des exploitations agricoles constituent 5 à 10 % des émissions anthropiques totales (*degré de confiance moyen*). Étant donnée la diversité des systèmes alimentaires, il existe de grandes différences régionales dans les contributions des différentes composantes du système alimentaire (*degré de confiance très élevé*). Il est prévu une augmentation des émissions associées à la production agricole (*degré de confiance élevé*) en réponse à l'augmentation de la population et des revenus, et aux changements des modes de consommation (*degré de confiance moyen*). {5.5, tableau 5.4}

[24] Cette évaluation concerne uniquement le CO_2, le CH_4 et le N_2O.

A.4 Tout changement de condition des terres[25], qu'il soit dû à l'usage des terres ou au changement climatique, a une incidence sur le climat mondial et régional (*degré de confiance élevé*). À l'échelle régionale, un changement de condition des terres peut réduire ou accentuer le réchauffement et affecter l'intensité, la fréquence et la durée des événements extrêmes. L'ampleur et le sens de ces changements varient selon l'endroit et la saison (*degré de confiance élevé*). {Résumé du chapitre 2, 2.3, 2.4, 2.5, 3.3}

A.4.1 Depuis la période pré-industrielle, les changements d'occupation des terres dus aux activités humaines ont conduit à la fois à un relargage net de CO_2 favorisant le réchauffement planétaire (*degré de confiance élevé*) et à une hausse de l'albédo[26] terrestre entraînant un refroidissement de la surface (*degré de confiance moyen*). Au cours de la période historique, l'effet net sur la température moyenne à la surface de la Terre est estimé comme étant faible (*degré de confiance moyen*). {2.4, 2.6.1, 2.6.2}

A.4.2 La probabilité, l'intensité et la durée de nombreux événements extrêmes peuvent être modifiées de manière significative par des changements de condition des terres, y compris des événements chauds tels que les vagues de chaleur (*degré de confiance élevé*) et les épisodes de fortes précipitations (*degré de confiance moyen*). Les changements de condition des terres peuvent avoir une incidence sur la température et les précipitations dans des régions aussi éloignées qu'à des centaines de kilomètres de distance (*degré de confiance élevé*). {2.5.1, 2.5.2, 2.5.4, 3.3 ; encadré thématique 4 du chapitre 2}

A.4.3 Le changement climatique modifie l'état des terres ce qui en retour affecte le climat régional. En zone boréale, dans les régions où la limite forestière migrera vers le nord et/ou la saison de croissance s'allongera, le réchauffement hivernal sera accru en raison de la diminution de la couverture neigeuse et de l'albédo, tandis que le réchauffement sera réduit pendant la saison de croissance en raison de la hausse de l'évapotranspiration (*degré de confiance élevé*). En zone tropicale, dans les régions où une augmentation des précipitations est projetée, une croissance accrue de la végétation réduira le réchauffement régional (*degré de confiance moyen*). Des conditions de sol plus sèches résultant du changement climatique peuvent accroître la sévérité des vagues de chaleur, tandis que des conditions de sol plus humides ont l'effet contraire (*degré de confiance élevé*). {2.5.2, 2.5.3}

A.4.4 La désertification amplifie le réchauffement planétaire par le relargage de CO_2 résultant de la diminution du couvert végétal (*degré de confiance élevé*). Cette diminution tend à augmenter l'albédo local, provoquant un refroidissement de surface (*degré de confiance élevé*). {3.3}

A.4.5 Les changements de couverture forestière, issus par exemple du boisement, de la déforestation ou du reboisement, affectent directement les températures de surface au niveau régional par le biais des échanges d'eau et d'énergie[27] (*degré de confiance élevé*). Là où la couverture forestière augmente dans les régions tropicales, un refroidissement résulte d'une évapotranspiration accrue (*degré de confiance élevé*). Une évapotranspiration accrue peut entraîner des journées plus fraîches pendant la saison de croissance (*degré de confiance élevé*) et peut réduire l'amplitude des événements chauds (*degré de confiance moyen*). Dans les régions soumises à une couverture neigeuse saisonnière, telles que les régions boréales et certaines régions tempérées, l'augmentation du couvert d'arbres ou d'arbustes tend à réchauffer les hivers du fait de la baisse de l'albédo de surface[28] (*degré de confiance élevé*). {2.3, 2.4.3, 2.5.1, 2.5.2, 2.5.4}

A.4.6 Tant le réchauffement planétaire que l'urbanisation peuvent accentuer le réchauffement dans les villes et leurs environs (effet d'îlot de chaleur), en particulier lors d'événements chauds, comme les vagues de chaleur (*degré de confiance élevé*). Cet effet est plus marqué sur les températures nocturnes que sur les températures diurnes (*degré de confiance élevé*). Une urbanisation accrue peut aussi intensifier les épisodes de précipitations extrêmes sur les villes ou sous le vent des zones urbaines (*degré de confiance moyen*). {2.5.1, 2.5.2, 2.5.3, 4.9.1, encadré thématique 4 du chapitre 2}

---

[25] Les conditions des terres comprennent les changements dans l'occupation des terres (par exemple, déforestation, boisement, urbanisation), dans l'usage des terres (par exemple, l'irrigation) et dans l'état des terres (par exemple, degré d'humidité, degré de verdissement, quantité de neige, quantité de pergélisol).

[26] Les terres à albédo élevé réfléchissent plus de rayonnement solaire entrant que les terres à albédo faible.

[27] La littérature scientifique indique que les changements de couvert forestier peuvent aussi affecter le climat à travers des changements d'émission de gaz et d'aérosols réactifs {2.4, 2.5}.

[28] Des publications récentes montrent que les aérosols associés aux forêts boréales pourraient contrecarrer, au moins en partie, l'effet de réchauffement lié à l'albédo de surface {2.4.3}.

Encadré RID.1 | Trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP)

Dans ce rapport, les implications du développement socio-économique futur sur l'atténuation du changement climatique, l'adaptation et l'usage des terres sont explorées en utilisant des trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP). Les SSP couvrent tout un éventail de défis en matière d'atténuation du changement climatique et d'adaptation à ce dernier.

- La trajectoire SSP1 comprend un pic suivi d'un déclin de la population (~7 milliards en 2100), des revenus élevés et des inégalités réduites, une réglementation efficace de l'usage des terres, une consommation moins intensive en ressources, y compris une production alimentaire effectuée à partir de systèmes faiblement émetteurs de GES et moins de gaspillage alimentaire, le libre-échange et des technologies et modes de vie respectueux de l'environnement. Par rapport aux autres trajectoires, la trajectoire SSP1 présente peu de défis en matière d'atténuation et d'adaptation (c'est à dire, une forte capacité d'adaptation).

- La trajectoire SSP2 comprend un accroissement moyen de la population (~9 milliards en 2100), des revenus moyens, des progrès technologiques, des modes de production et de consommation dans le prolongement des tendances passées, et une réduction progressive des inégalités. Par rapport aux autres trajectoires, la trajectoire SSP2 présente des défis moyens en matière d'atténuation et d'adaptation (c'est à dire, une capacité moyenne d'adaptation).

- La trajectoire SSP3 comprend une population importante (~13 milliards en 2100), de faibles revenus et des inégalités persistantes, une consommation conséquente et une production utilisant beaucoup d'intrants, des obstacles au commerce, et une progression lente des progrès technologiques. Par rapport aux autres trajectoires, la trajectoire SSP3 présente des défis élevés en matière d'atténuation et d'adaptation (c'est à dire, une faible capacité d'adaptation).

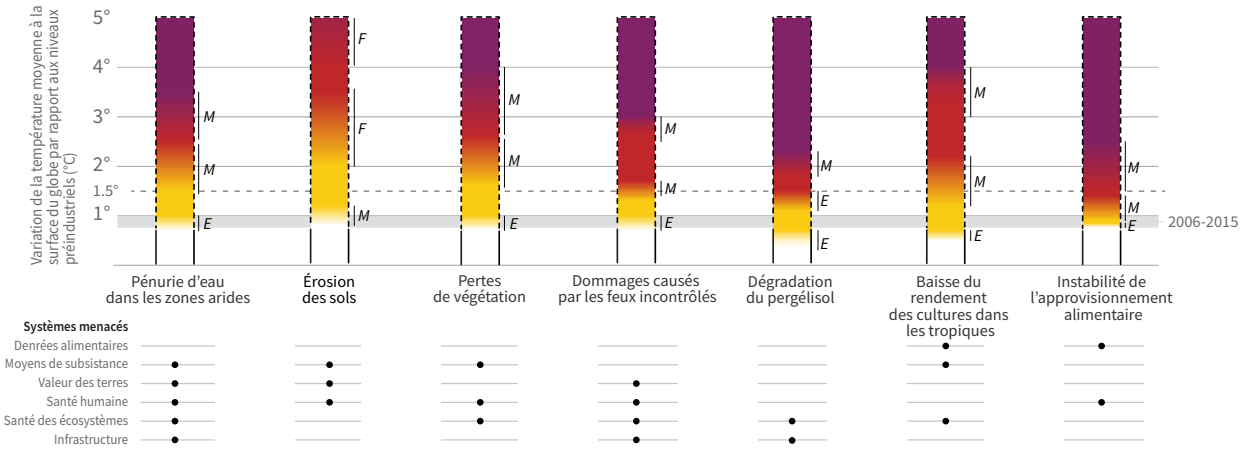
- La trajectoire SSP4 comprend un accroissement moyen de la population (~9 milliards en 2100), des revenus moyens, mais des inégalités significatives au sein des régions comme entre les régions. Par rapport aux autres trajectoires, la trajectoire SSP4 présente peu de défis en matière d'atténuation, mais des défis élevés en matière d'adaptation (c'est à dire, une faible capacité d'adaptation).

- La trajectoire SSP5 comprend un pic suivi d'un déclin de la population (~7 milliards en 2100), des revenus élevés, des inégalités réduites, et le libre-échange. Cette trajectoire comprend une production, une consommation et des modes de vie très consommateurs en ressources. Par rapport aux autres trajectoires, la SSP5 présente des défis élevés en matière d'atténuation, mais peu de défis en matière d'adaptation (c'est à dire, une forte capacité d'adaptation).

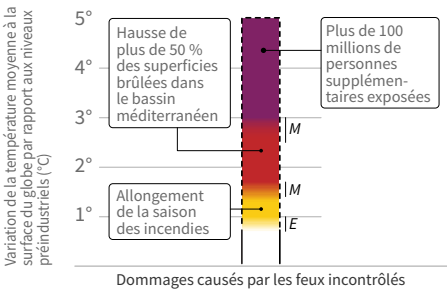
- Les SSPs peuvent être combinées avec les trajectoires représentatives de concentration (RCP) qui impliquent différents niveaux d'atténuation, avec des implications pour l'adaptation. Ainsi, les SSPs peuvent être compatibles avec différents niveaux d'augmentation de la température moyenne à la surface de la planète, tels que projetées par différentes combinaisons SSP-RCP. Toutefois, certaines combinaisons ne sont pas possibles ; ainsi, le scénario RCP2.6 et les niveaux les plus bas d'augmentation future de la température moyenne à la surface de la planète (1,5 °C par exemple) ne sont pas possibles avec la SSP3 dans les trajectoires modélisées. {1.2.2, encadré thématique 1 du chapitre 1, 6.1.4, encadré thématique 9 du chapitre 6}

A. Risques pour les populations humaines et les écosystèmes posés par les effets du changement climatique sur les processus terrestres

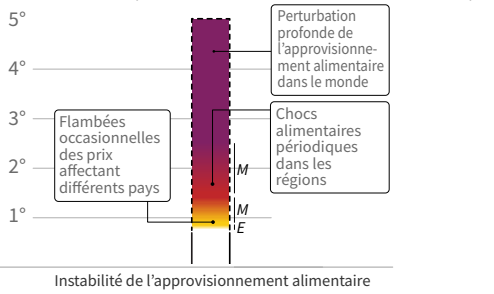
L'élévation de la température moyenne à la surface du globe par rapport aux niveaux préindustriels affecte les processus liés à la **désertification** (pénurie d'eau), la **dégradation des terres** (érosion des sols, recul de la végétation, feux incontrôlés, dégel du pergélisol) et la **sécurité alimentaire** (variation du rendement des cultures, instabilité de l'approvisionnement alimentaire). Il en découle des risques pour les systèmes alimentaires, les moyens de subsistance, l'infrastructure, la valeur des terres et la santé des populations humaines et des écosystèmes. La modification d'un processus (incendies ou pénurie d'eau, par exemple) peut donner lieu à des risques combinés. Les risques sont propres à l'emplacement et diffèrent selon la région.



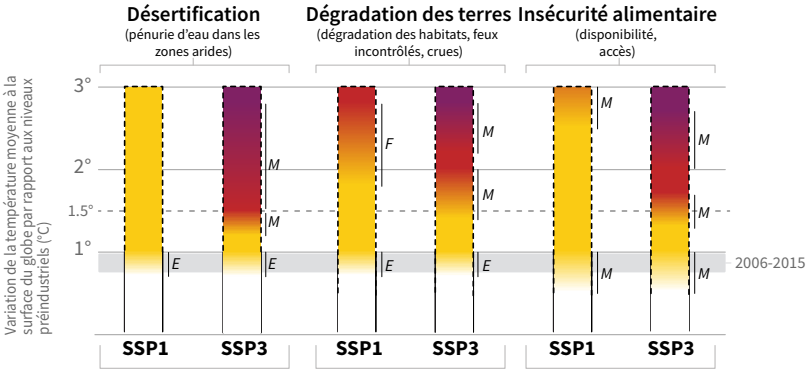
Exemple indicatif de transitions entre les niveaux de risque



Exemple indicatif de transitions entre les niveaux de risque

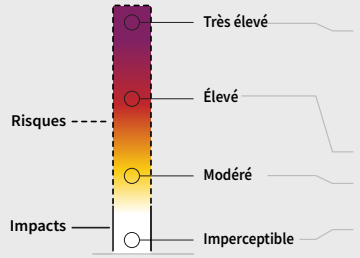


B. Niveau de risques liés au changement climatique pour différentes trajectoires socio-économiques



Les choix socio-économiques peuvent limiter ou exacerber les risques liés au climat et agir sur la vitesse du réchauffement. Dans la trajectoire **SSP1**, la population mondiale croît lentement, les revenus sont élevés et les inégalités réduites, la production de denrées alimentaires entraîne peu d'émissions de GES, l'usage des terres fait l'objet d'une réglementation efficace et la capacité d'adaptation est forte. La trajectoire **SSP3** présente des tendances opposées. Pour un même niveau de réchauffement global, les risques sont plus faibles pour la trajectoire SSP1 que pour la trajectoire SSP3.

Légende: **Niveau de risque/impact**



Violet: Probabilité très élevée de risques/impacts graves et présence d'irréversibilité importante ou persistance des aléas climatiques, combinée à une capacité d'adaptation limitée vu la nature des aléas ou des risques/impacts.
Rouge: Risques/impacts graves et généralisés.
Jaune: Risques/impacts perceptibles et imputables au changement climatique avec un niveau de confiance au minimum moyen.
Blanc: Risques/impacts imperceptibles.

Légende: **Niveau de confiance associé à la transition (de niveau de risque)**

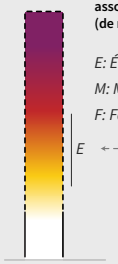


Figure RID.2 Risques pour les systèmes humains liés aux terres émergées et pour les écosystèmes terrestres résultants du changement climatique, des développements socio-économiques et des choix d'atténuation *via* les écosystèmes terrestres | Comme dans les rapports précédents du GIEC, la littérature scientifique a été utilisée pour formuler des avis d'experts pour estimer les niveaux de réchauffement planétaire auxquels les niveaux de risque sont indétectables, modérés, élevés ou très élevés, comme décrit au chapitre 7 et dans les autres parties du rapport sous-jacent. La figure indique les risques évalués pour des plages approximatives de niveau de réchauffement global qui peuvent être influencés par une gamme de facteurs, y compris les mesures d'adaptation. L'évaluation prend en considération la capacité d'adaptation cohérente avec les trajectoires SSP (trajectoires communes d'évolution socio-économique), selon la description ci-dessous. **Partie A :** Risques qui pèsent sur une sélection de systèmes terrestres en fonction de l'augmentation de la température moyenne à la surface de la planète {2.1 ; encadré 2.1 ; 3.5 ; 3.7.1.1 ; 4.4.1.1 ; 4.4.1.2 ; 4.4.1.3 ; 5.2.2 ; 5.2.3 ; 5.2.4 ; 5.2.5 ; 7.2 ; 7.3, tableau 7.1 du complément d'information}. Les liens avec des systèmes plus intégrateurs sont illustratifs, sans souci d'exhaustivité. Les niveaux de risque sont estimés en faisant l'hypothèse d'une exposition et une vulnérabilité moyennes induites par une évolution modérée des conditions socio-économiques globalement compatibles avec la trajectoire SSP2. {Tableau 7.4 du complément d'information}. **Partie B :** Risques associés à la désertification, à la dégradation des terres et à la sécurité alimentaire en réponse au changement climatique et aux trajectoires de développement socio-économique. Les risques croissants liés à la désertification comprennent les populations exposées et leur vulnérabilité à la raréfaction de la ressource en eau dans les zones arides. Les risques liés à la dégradation des terres comprennent l'évolution de la dégradation des habitats, l'exposition des populations aux feux de forêt et aux inondations et les coûts des inondations. Les risques liés à la sécurité alimentaire comprennent la disponibilité et l'accès aux denrées alimentaires, y compris une quantification des populations exposées au risque de famine, la hausse du prix des aliments et l'évolution des années de vie corrigées du facteur d'invalidité imputables à l'insuffisance pondérale infantile. Les risques sont évalués pour deux trajectoires socio-économique contrastées (SSP1 et SSP3 {RID encadré 1}), en excluant les effets de politiques ciblées d'atténuation {3.5 ; 4.2.1.2 ; 5.2.2 ; 5.2.3 ; 5.2.4 ; 5.2.5 ; 6.1.4 ; 7.2, tableau 7.5 du complément d'information}. Les risques ne sont pas indiqués au-delà de 3 °C car la trajectoire SSP1 ne va pas au-delà de ce niveau de changement de température. **Toutes les parties** : Dans le cadre de l'évaluation, la littérature scientifique a été compilée et les données ont été extraites sous la forme d'un tableau récapitulatif. Un protocole formel d'élicitation des experts (fondé sur la technique Delphi modifiée et le cadre d'élicitation de Sheffield) a été suivi pour déterminer les seuils de transition des risques. Ceci a inclut un processus d'élicitation à plusieurs tours comportant deux cycles d'appréciation anonyme et indépendante des seuils, et une discussion finale pour atteindre un consensus. De plus amples informations sur les méthodes et la littérature sous-jacente se trouvent dans les compléments d'information du chapitre 7.

A.5 Le changement climatique exerce sur les terres émergées une pression supplémentaire qui accentue les menaces sur les moyens de subsistance, la biodiversité, la santé des populations humaines et des écosystèmes, les infrastructures et les systèmes alimentaires (*degré de confiance élevé*). Les impacts augmentent sur les terres quel que soit le scénario d'émissions futur de GES (*degré de confiance élevé*). Certaines régions seront soumises à des risques plus élevés, tandis que d'autres seront confrontées à des risques qui n'avaient pas été anticipés auparavant (*degré de confiance élevé*). Les risques en cascade ayant des impacts sur de nombreux systèmes et secteurs varient eux aussi d'une région à l'autre (*degré de confiance élevé*). {2.2, 3.5, 4.2, 4.4, 4.7, 5.1, 5.2, 5.8, 6.1, 7.2, 7.3, encadré thématique 9 du chapitre 6, figure RID.2}

A.5.1 Avec l'augmentation du réchauffement, la fréquence, l'intensité et la durée des événements chauds, comme par exemple les vagues de chaleur, continueront d'augmenter au cours du XXIe siècle (*degré de confiance élevé*). La fréquence et l'intensité des sécheresses continueront d'augmenter, en particulier dans le bassin méditerranéen et en Afrique australe (*degré de confiance moyen*). La fréquence et l'intensité des épisodes de précipitations extrêmes augmenteront dans de nombreuses régions (*degré de confiance élevé*). {2.2.5, 3.5.1, 4.2.3, 5.2}

A.5.2 Avec l'augmentation du réchauffement, les zones climatiques continueront de migrer vers les pôles aux latitudes moyennes et élevées (*degré de confiance élevé*). Dans les zones de hautes latitudes, les forêts boréales subiront des perturbations accrues, notamment des sécheresses, des feux de forêt et des invasions de parasites (*degré de confiance élevé*). Dans les régions tropicales et en réponse à des scénarios moyens et élevés d'émissions de GES, le réchauffement climatique entraînera l'apparition de conditions climatiques sans précédent[29] au milieu ou à la fin du XXIe siècle (*degré de confiance moyen*). {2.2.4, 2.2.5, 2.5.3, 4.3.2}

A.5.3 Les niveaux actuels de réchauffement planétaire sont associés à des risques modérés d'aggravation de la rareté de la ressource en eau dans les zones arides, d'érosion des sols, de pertes de végétation, de dégâts causés par les feux de forêt, de dégel du pergélisol, de dégradation du littoral et de baisse du rendement des cultures tropicales (*degré de confiance élevé*). Les risques, y compris les risques en cascade, augmenteront avec une sévérité croissante avec l'augmentation des températures. Avec un réchauffement planétaire d'environ 1,5 °C, les risques de rareté de la ressource en eau dans les zones arides, de dégâts causés par les feux de forêt, de dégradation du pergélisol et d'instabilité de l'approvisionnement alimentaire seront élevés (*degré de confiance moyen*). À 2 °C environ, les risques de dégradation du pergélisol et d'instabilité de l'approvisionnement alimentaire seront très élevés (*degré de confiance moyen*). Dans un monde encore plus chaud, à 3 °C environ, les risques de perte de végétation, de dégâts causés par les feux de forêt et de rareté de la ressource en eau dans les zones arides seront très élevés (*degré de confiance moyen*). Les risques posés par la sécheresse, le stress hydrique, les événements chauds comme les vagues de chaleur et la dégradation des habitats augmenteront simultanément entre 1,5 °C et 3 °C de réchauffement (*degré de confiance faible*). {Figure RID.2, 7.2.2, encadré thématique 9 du chapitre 6, compléments d'information du chapitre 7}

A.5.4 La stabilité de l'approvisionnement alimentaire[30] diminuera à mesure qu'augmenteront l'ampleur et la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes qui perturbent les chaînes de production alimentaire (*degré de confiance élevé*). Une augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère peut aussi conduire à une diminution de la qualité nutritionnelle des productions (*degré de confiance élevé*). Une trajectoire SSP2 conduira à une hausse médiane de 7,6 % (fourchette de 1 à 23 %) du prix des céréales en 2050, selon les modèles globaux d'agriculture et d'économie, en réponse au changement climatique (RCP6.0) ; cela entraînera une hausse des

[29] Des conditions climatiques sans précédent sont définies dans ce rapport comme n'étant survenues nulle part au cours du XXe siècle. Elles se caractérisent par des températures élevées avec une forte saisonnalité et des modifications dans les précipitations. Dans la littérature scientifique évaluée, l'effet des variables climatiques autres que la température et les précipitations n'a pas été pris en compte.

[30] L'approvisionnement alimentaire est défini dans ce rapport comme englobant la disponibilité et l'accès (y compris les prix). L'instabilité de l'approvisionnement alimentaire fait référence à la variabilité qui influe sur la sécurité alimentaire en réduisant l'accès à l'alimentation.

prix des denrées alimentaires et une augmentation du risque d'insécurité alimentaire et de famine (*degré de confiance moyen*). Les personnes les plus démunies seront les plus durement touchées (*degré de confiance élevé*). {5.2.3, 5.2.4, 5.2.5, 5.8.1, 7.2.2.2, 7.3.1}

A.5.5 Dans les zones arides, le changement climatique et la désertification entraîneront des baisses de productivité de l'agriculture et de l'élevage (*degré de confiance élevé*), modifieront la composition des espèces végétales et appauvriront la biodiversité (*degré de confiance moyen*). Dans une trajectoire SSP2, le nombre d'habitants des zones arides vulnérables aux stress hydriques, à l'intensité des sécheresses et à la dégradation des habitats atteindrait 178 millions en 2050 avec un réchauffement de 1,5 °C, augmentant à 220 millions avec un réchauffement de 2 °C et à 277 millions avec un réchauffement de 3 °C (*degré de confiance faible*). {3.5.1, 3.5.2, 3.7.3}

A.5.6 L'Asie et l'Afrique[31] compteront le plus grand nombre de personnes vulnérables à l'augmentation de la désertification. L'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud, la Méditerranée, l'Afrique australe et l'Asie centrale pourraient être de plus en plus affectées par les feux de forêt. Les régions tropicales et subtropicales seront les plus vulnérables à la baisse des rendements agricoles. La dégradation des terres résultant de la combinaison de l'élévation du niveau de la mer et de l'intensification des cyclones menacera les personnes et les moyens de subsistance dans les zones exposées aux cyclones (*degré de confiance très élevé*). Au sein des populations, les femmes, les très jeunes enfants, les personnes âgées et les pauvres seront les plus menacés (*degré de confiance élevé*). {3.5.1, 3.5.2, 4.4, tableau 4.1, 5.2.2, 7.2.2, encadré thématique 3 du chapitre 2}

A.5.7 Le changement climatique est susceptible d'amplifier les mouvements migratoires induits par les perturbations de l'environnement, tant à l'intérieur des pays qu'à travers les frontières (*degré de confiance moyen*), reflétant les multiples déterminants de la mobilité et les mesures d'adaptation disponibles (*degré de confiance élevé*). Les événements météorologiques et climatiques extrêmes ou les événements à progression lente pourraient entraîner une augmentation des déplacements, une perturbation des chaînes alimentaires, et des menaces sur les moyens de subsistance (*degré de confiance élevé*) et contribuer à exacerber les tensions menant aux conflits (*degré de confiance moyen*). {3.4.2, 4.7.3, 5.2.3, 5.2.4, 5.2.5, 5.8.2, 7.2.2, 7.3.1}

A.5.8 La gestion non durable des terres a eu des impacts économiques négatifs (*degré de confiance élevé*). Le changement climatique accentuera ces impacts économiques négatifs (*degré de confiance élevé*). {4.3.1, 4.4.1, 4.7, 4.8.5, 4.8.6, 4.9.6, 4.9.7, 4.9.8, 5.2, 5.8.1, 7.3.4, 7.6.1, encadré thématique 10 du chapitre 7}

A.6 Le niveau de risque posé par le changement climatique dépend à la fois du niveau de réchauffement et de la façon dont évoluent les populations, la consommation, la production, le développement technologique et les modes de gestion des terres (*degré de confiance élevé*). Les trajectoires caractérisées par une demande plus élevée en denrées alimentaires, en aliments pour animaux et en eau, par une consommation et une production exigeant un usage plus intensif des ressources, et par des améliorations technologiques influant sur les rendements agricoles plus limitées, entraînent des risques accrus résultant de la rareté de la ressource en eau dans les zones arides, de la dégradation des terres et de l'insécurité alimentaire (*degré de confiance élevé*). {5.1.4, 5.2.3, 6.1.4, 7.2, encadré thématique 9 du chapitre 6, figure RID.2b}

A.6.1 Les augmentations projetées de populations et de revenus, conjuguées aux changements dans les modes de consommation, entraînent une augmentation de la demande en denrées alimentaires, en aliments pour animaux et en eau en 2050 dans toutes les SSPs (*degré de confiance élevé*). Ces changements, combinés aux pratiques de gestion des terres, ont des répercussions sur le changement d'affectation et d'usages des terres, sur l'insécurité alimentaire, sur la rareté de la ressource en eau, sur les émissions terrestres de GES, sur le potentiel de séquestration du carbone et sur la biodiversité (*degré de confiance élevé*). Les trajectoires de développement dans lesquelles les revenus augmentent et la demande en conversion des terres est réduite, du fait d'une diminution de la demande agricole ou d'une meilleure productivité, peuvent conduire à une réduction de l'insécurité alimentaire (*degré de confiance élevé*). Toutes les trajectoires d'évolution socio-économique futures évaluées mènent à une augmentation de la demande en eau et de la rareté de cette ressource (*degré de confiance élevé*). Les SSPs qui induisent une plus grande expansion des superficies cultivées conduisent à plus de déclin de la biodiversité (*degré de confiance élevé*). {6.1.4}

A.6.2 Les risques relatifs à la rareté de la ressource en eau dans les zones arides sont moindres dans les trajectoires comprenant un faible accroissement démographique, une moindre progression de la demande d'eau et une forte capacité d'adaptation, comme dans la trajectoire SSP1 (voir encadré RID.1). Dans ces scénarios, le risque relatif à la rareté de la ressource en eau dans les zones arides est modéré même avec un réchauffement planétaire de 3 °C (*degré de confiance faible*). À l'inverse, les risques liés à la rareté de la ressource en eau dans les zones arides sont plus grands dans les trajectoires comprenant un fort accroissement démographique, une vulnérabilité élevée, une plus grande demande en eau et une faible capacité d'adaptation, comme dans la trajectoire SSP3. Dans cette dernière, le passage d'un risque modéré à un risque élevé se produit entre 1,2 et 1,5 °C (*degré de confiance moyen*). {7.2, figure RID.2b, encadré RID.1}

A.6.3 Les risques relatifs à la dégradation des terres due au changement climatique sont plus grands dans les trajectoires comprenant une plus forte population, des changements d'affectation des terres plus importants, une faible capacité d'adaptation et d'autres obstacles à l'adaptation (par exemple, la trajectoire SSP3). Ces scénarios se traduisent par une augmentation du nombre de personnes exposées à la dégradation des écosystèmes, aux incendies et aux inondations côtières (*degré de confiance moyen*). S'agissant de la dégradation des terres, le passage d'un risque modéré à un risque élevé a lieu entre 1,8 et 2,8 °C de réchauffement planétaire dans la trajectoire SSP1 (*degré de confiance faible*) et entre 1,4 et 2 °C dans la trajectoire SSP3 (*degré de confiance moyen*). Le passage d'un risque élevé à très élevé survient entre 2,2 et 2,8 °C pour la trajectoire SSP3 (*degré de confiance moyen*). {4.4, 7.2, figure RID.2b}

[31] L'Afrique de l'Ouest compte un nombre élevé de personnes vulnérables à l'aggravation de la désertification et à la baisse des rendements. L'Afrique du Nord est vulnérable à la rareté de la ressource en eau.

A.6.4 Les risques relatifs à la sécurité alimentaire sont plus grands dans les trajectoires comprenant des revenus plus faibles, une demande accrue en aliments, une hausse des prix alimentaires due à la concurrence pour les terres, des échanges commerciaux plus limités et d'autres défis à l'adaptation (par exemple, la trajectoire SSP3) (*degré de confiance élevé*). Le passage d'un risque modéré à un risque élevé pour la sécurité alimentaire se situe entre 2,5 et 3,5 °C dans la trajectoire SSP1 (*degré de confiance moyen*), entre 1,3 et 1,7 °C dans la trajectoire SSP3 (*degré de confiance moyen*). Le passage d'un risque élevé à très élevé a lieu entre 2 et 2,7 °C pour la trajectoire SSP3 (*degré de confiance moyen*). {7.2, figure RID.2b}

A.6.5 L'expansion urbaine entraînera une conversion des terres cultivées provoquant des pertes de production alimentaire (*degré de confiance élevé*). Ceci pourra entraîner des risques supplémentaires pour les systèmes alimentaires. Les stratégies de réduction de ces impacts peuvent inclure la production d'aliments en milieu urbain et péri-urbain et la gestion de l'expansion urbaine, ainsi que des infrastructures urbaines vertes qui peuvent réduire les risques climatiques dans les villes[32] (*degré de confiance élevé*). {4.9.1, 5.5, 5.6, 6.3, 6.4, 7.5.6} (figure RID.3)

[32] Les systèmes des terres considérés dans ce rapport n'incluent pas la dynamique des écosystèmes urbains en détail. Les zones urbaines, l'expansion urbaine et d'autres processus urbains, tout comme leurs relations avec les processus liés aux terres, sont vastes, dynamiques et complexes. Plusieurs points examinés dans ce rapport tels que l'évolution de la population, la croissance, les revenus, la production et la consommation alimentaires, la sécurité alimentaire, et les régimes alimentaires ont des relations étroites avec ces processus urbains. Les zones urbaines sont également le cadre de nombreux processus reliés aux dynamiques de changement d'affectation des terres, y compris la perte de fonctions et de services écosystémiques, qui sont susceptibles d'amplifier les risques de catastrophe. Certains sujets spécifiques urbains sont évalués dans ce rapport.

B. Les options de réponse pour l'adaptation et l'atténuation

B.1 Nombre d'options de réponse pour l'atténuation du changement climatique et l'adaptation permettent aussi de combattre la désertification et la dégradation des terres et d'améliorer la sécurité alimentaire. Le potentiel de mise en œuvre de ces options de réponse et l'importance relative accordée à l'adaptation et à l'atténuation dépendent du contexte, par exemple des capacités d'adaptation des communautés et des régions. Bien que les actions dans le domaine des terres puissent apporter une contribution importante à l'adaptation et à l'atténuation, il existe des barrières à l'adaptation et des limites à leur contribution à l'atténuation au niveau mondial. (*Degré de confiance très élevé*) {2.6, 4.8, 5.6, 6.1, 6.3, 6.4, figure RID.3}

B.1.1 Certaines actions dans le secteur des terres ont déjà été mises en œuvre pour contribuer à l'atténuation du changement climatique, à l'adaptation et au développement durable. Les différentes options de réponse ont été évaluées pour l'adaptation, l'atténuation, la lutte contre la désertification et la dégradation des terres, la sécurité alimentaire et le développement durable, et quelques-unes de ces options ont une action positive sur l'ensemble de ces enjeux. Elles comprennent, entre autres, une production alimentaire durable, une gestion améliorée et durable des forêts, la gestion du carbone organique du sol, la conservation des écosystèmes et la restauration des terres, la réduction de la déforestation et de la dégradation, la diminution des pertes et du gaspillage alimentaires (*degré de confiance élevé*). Ces options de réponse nécessitent l'intégration de facteurs clés notamment biophysiques et socio-économiques. {6.3, 6.4.5 ; encadré thématique 10 du chapitre 7}

B.1.2 Tandis que certaines options de réponse ont un impact immédiat, d'autres n'ont d'effet mesurable qu'après plusieurs décennies. Les exemples d'options de réponse à impact immédiat incluent la conservation d'écosystèmes riches en carbone comme les tourbières, les zones humides, les pâturages extensifs, les mangroves et les forêts. Les exemples d'options qui procurent de multiples services et fonctions écosystémiques, mais qui prennent plus de temps à donner des résultats, incluent le boisement et le reboisement ainsi que la restauration d'écosystèmes riches en carbone, l'agroforesterie et la remise en état de sols dégradés (*degré de confiance élevé*). {6.4.5 ; encadré thématique 10 du chapitre 7}

B.1.3 La réussite de la mise en œuvre des options de réponse dépend de la prise en compte des conditions environnementales et socio-économiques locales. Certaines options comme la gestion du carbone du sol sont potentiellement applicables à un large éventail d'usages des terres, alors que l'efficacité des pratiques de gestion des terres sur des sols organiques, des tourbières et des zones humides ou liées aux ressources en eau douce dépendent des conditions agro-écologiques spécifiques (*degré de confiance élevé*). Etant donné le caractère local des impacts du changement climatique sur les différents maillons du système alimentaire, et compte tenu de la grande diversité des agro-écosystèmes, les options d'adaptation et d'atténuation comme les obstacles à leur mise en oeuvre sont liées au contexte environnemental et culturel, aux niveaux régional et local (*degré de confiance élevé*). Atteindre la neutralité en matière de dégradation des terres dépend de l'intégration de multiples réponses à l'échelle locale, régionale et nationale et à travers plusieurs secteurs dont l'agriculture, le pastoralisme, la gestion des forêts et de l'eau (*degré de confiance élevé*). {4.8, 6.2, 6.3, 6.4.4}

B.1.4 Les solutions qui permettent une séquestration de carbone dans le sol ou la végétation, comme le boisement, le reboisement, l'agroforesterie, la gestion du carbone dans les sols minéraux ou le stockage de carbone dans les produits ligneux récoltés, ne continuent pas à séquestrer du carbone indéfiniment (*degré de confiance élevé*). Les tourbières, en revanche, peuvent continuer à séquestrer du carbone pendant des siècles (*degré de confiance élevé*). Lorsque la végétation parvient à maturité ou lorsque les réservoirs de carbone dans les plantes ou les sols atteignent la saturation, l'absorption annuelle de CO_2 atmosphérique tend vers zéro, alors que les stocks de carbone peuvent être maintenus (*degré de confiance élevé*). Cependant, il y a un risque de perte ultérieure du carbone accumulé dans les végétaux et les sols (ou d'inversion du puits) sous l'effet de perturbations telles que les inondations, sécheresses, incendies, attaques de ravageurs, ou de mauvaise gestion (*degré de confiance élevé*). {6.4.1}

B.2 La plupart des options de réponse évaluées contribuent favorablement au développement durable et à d'autres objectifs sociétaux (*degré de confiance élevé*). Beaucoup de solutions peuvent être appliquées sans compétition sur les terres et ont le potentiel d'engendrer de multiples co-bénéfices (*degré de confiance élevé*). Un autre jeu d'options de réponse a le potentiel de réduire la demande en terres, favorisant ainsi la mise en œuvre de solutions permettant l'atténuation du changement climatique et l'adaptation, la lutte contre la désertification et la dégradation des terres et l'amélioration de la sécurité alimentaire (*degré de confiance élevé*). {4.8, 6.2, 6.3.6, 6.4.3 ; figure RID.3}

B.2.1 Plusieurs options de gestion des terres, comme une meilleure gestion des zones cultivées et des pâturages, une gestion des forêts améliorée et durable, et un accroissement de la teneur du sol en carbone organique, ne nécessitent pas de modifier l'affectation des sols et ne créent pas de demande pour plus de conversion des terres (*degré de confiance élevé*). En outre, certaines options de réponse comme l'augmentation de la productivité alimentaire, les préférences alimentaires, la diminution des pertes et gaspillages alimentaires et la réduction des déchets peuvent réduire la demande de conversion des terres, et donc potentiellement libérer des terres permettant ainsi une mise en œuvre plus importante d'autres options de réponse (*degré de confiance élevé*). Il existe des

mesures qui réduisent la concurrence pour les terres. De telles mesures sont applicables à différentes échelles, de la ferme à la région (*degré de confiance élevé*). {4.8, 6.3.6, 6.4 ; figure RID.3}

B.2.2 Un large éventail de mesures d'adaptation et d'atténuation peut apporter une contribution positive au développement durable, au renforcement des fonctions et services écosystémiques et à l'atteinte d'autres objectifs sociétaux (*degré de confiance moyen*). Il s'agit par exemple de la protection et la restauration d'écosystèmes naturels tels que les tourbières, les zones côtières et les forêts, de la sauvegarde de la biodiversité, la réduction de la compétition pour les terres, la gestion des incendies, la gestion des sols et la plupart des méthodes de gestion des risques (comme l'usage de semences locales, la gestion des risques de catastrophes et les instruments de mutualisation des risques). Dans certains contextes, les mesures d'adaptation fondées sur les écosystèmes peuvent promouvoir la préservation de la nature tout en réduisant la pauvreté, et même procurer des avantages connexes en éliminant les gaz à effet de serre et en protégeant les moyens de subsistance (par exemple, les mangroves) (*degré de confiance moyen*). {6.4.3, 7.4.6.2}

B.2.3 La plupart des solutions qui n'accroissent pas la concurrence sur les terres, et presque toutes les options fondées sur la gestion des chaînes de valeur (par exemple les choix alimentaires, la réduction des pertes après récolte, la réduction du gaspillage alimentaire) et la gestion des risques, peuvent contribuer à éradiquer la pauvreté et éliminer la faim tout en favorisant la santé et le bien-être, l'accès à l'eau potable et l'assainissement, les mesures en faveur du climat et de la biodiversité terrestre (*degré de confiance moyen*). {6.4.3}

B.3 Bien que la plupart des options de réponse puissent être mises en œuvre sans faire concurrence aux terres disponibles, certaines peuvent accroître la demande en conversion de terres (*degré de confiance élevé*). A l'échelle requise pour atteindre un niveau de capture de carbone de plusieurs $GtCO_2$ an^{-1}, cette demande accrue en conversion pourrait avoir des effets secondaires indésirables sur l'adaptation, la désertification, la dégradation des terres et la sécurité alimentaire (*degré de confiance élevé*). Si ces interventions sont mises en œuvre sur une fraction limitée des terres émergées, et si elles sont intégrées dans des paysages gérés de façon durable, les effets secondaires indésirables seront moindres et cela permettra de bénéficier d'avantages connexes (*degré de confiance élevé*). {4.5, 6.2, 6.4 ; encadré thématique 7 du chapitre 6 ; figure RID.3}

B.3.1 S'ils sont appliqués à l'échelle nécessaire pour éliminer plusieurs $GtCO_2$ par an de l'atmosphère, le boisement, le reboisement ou l'utilisation des terres pour produire la matière première pour la bioénergie (avec ou sans capture et stockage du dioxyde de carbone), ou pour du biochar, pourraient considérablement accroître la demande en conversion des terres (*degré de confiance élevé*). L'intégration de ces pratiques dans des paysages gérés de façon durable, à des échelles appropriées, peut en atténuer les effets indésirables (*degré de confiance moyen*). La diminution de la conversion de prairies en terres cultivées, la restauration des tourbières et la réduction de leur conversion, ainsi que la restauration des zones humides côtières et la réduction de leur conversion affectent des superficies moindres au niveau mondial, et les impacts de ces options sur les changements d'affectation des terres sont plus faibles ou plus variables (*degré de confiance élevé*). {Encadré thématique 7 du chapitre 6 ; 6.4 ; figure RID.3}

B.3.2 Si les terres peuvent apporter une contribution appréciable à l'atténuation du changement climatique, il existe des limites au déploiement de mesures comme la bioénergie ou le boisement. Un déploiement sur plusieurs millions de kilomètres carrés pourrait accroitre les risques de désertification, de dégradation des terres, et menacer la sécurité alimentaire et le développement durable (*degré de confiance moyen*). Appliquées sur une fraction restreinte des terres émergées, les mesures d'atténuation qui déplacent d'autres usages des terres ont moins d'effets secondaires indésirables et peuvent avoir des retombées positives dans les domaines de l'adaptation, la désertification, la dégradation des terres ou la sécurité alimentaire (*degré de confiance élevé*) {4.2, 4.5, 6.4 ; encadré thématique 7 du chapitre 6, figure RID.3}

B.3.3 La production et l'utilisation de biomasse pour de la bioénergie peuvent générer des co-bénéfices, mais aussi des effets secondaires indésirables et représenter des risques pour la dégradation des terres, la sécurité alimentaire, les émissions de GES et d'autres objectifs environnementaux et de développement durable (*degré de confiance élevé*). Ces impacts sont propres au contexte et dépendent de l'ampleur du déploiement, de l'usage initial des terres, du type de terre, des matières premières pour la bioénergie, des stocks initiaux de carbone, du climat de la région et du système de gestion ; d'autres mesures qui exigent elles aussi des terres peuvent avoir un éventail de conséquences similaire (*degré de confiance élevé*). L'utilisation de résidus et de déchets organiques comme matière première pour la bioénergie peut atténuer les pressions en matière de changement d'affectation des sols associé à l'utilisation de bioénergie, mais le volume de ces matières est limité et le prélèvement de résidus qui aurait été autrement laissé à la surface du sol pourrait entraîner une dégradation de ces sols (*degré de confiance élevé*). {2.6.1.5 ; encadré thématique 7 du chapitre 6 ; figure RID.3}

B.3.4 Dans les trajectoires d'évolution socio-économique avec une faible croissance de la population, une réglementation efficace de l'usage des terres, une production alimentaire par des systèmes faiblement émetteurs de GES et une réduction des pertes et du gaspillage alimentaires (SSP1), la transition d'un risque faible à un risque modéré pour la sécurité alimentaire, la dégradation des terres et la rareté de la ressource en eau dans les zones arides se produit pour une superficie de 1 à 4 millions de kilomètres carrés utilisée pour la bioénergie ou BECCS (*degré de confiance moyen*). En revanche, dans les trajectoires avec une augmentation forte de la population, des revenus faibles et une évolution technologique lente (SSP3), la transition d'un risque faible à modéré survient dès l'utilisation d'une superficie de 0,1 à 1 million de kilomètres carrés (*degré de confiance moyen*). {6.4 ; encadré thématique 7 du chapitre 6 ; tableau 7.6 du complément d'information ; encadré RID.1}

B.4 Nombre d'activités de lutte contre la désertification peuvent contribuer à l'adaptation au changement climatique tout en favorisant l'atténuation, et à enrayer la perte de biodiversité avec des co-bénéfices pour la société en matière de développement durable (*degré de confiance élevé*). Eviter, réduire et inverser la désertification améliorerait la fertilité des sols, accroîtrait le stockage de carbone dans les sols et la biomasse, tout en favorisant la productivité agricole et la sécurité alimentaire (*degré de confiance élevé*). Il est préférable de prévenir la désertification que de tenter de restaurer les terres dégradées, étant donné les risques résiduels et les conséquences d'une éventuelle maladaptation (*degré de confiance élevé*). {3.6.1, 3.6.2, 3.6.3, 3.6.4, 3.7.1, 3.7.2}

B.4.1 Les solutions qui permettent l'adaptation au changement climatique et l'atténuation tout en contribuant à la lutte contre la désertification sont spécifiques à chaque région et comprennent, entre autres, la récolte de l'eau et la micro-irrigation, la restauration des terres dégradées au moyen de plantes résistantes à la sécheresse et écologiquement viables, l'agroforesterie et d'autres pratiques agroécologiques et mesures d'adaptation fondées sur les écosystèmes (*degré de confiance élevé*). {3.3, 3.6.1, 3.7.2, 3.7.5, 5.2, 5.6}

B.4.2 Réduire les tempêtes de sable et de poussière et le mouvement des dunes de sable peut amoindrir les effets préjudiciables de l'érosion éolienne et améliorer la qualité de l'air et la santé (*degré de confiance élevé*). Selon les ressources en eau et les conditions du sol, les programmes de boisement, de plantation d'arbres et de restauration d'écosystèmes qui ont pour objectif de créer des brise-vent sous forme de « murs verts » ou « barrages verts » à l'aide d'espèces d'arbres indigènes et autres résilientes au climat, peu exigeantes en eau, peuvent diminuer les tempêtes de sable, prévenir l'érosion éolienne et contribuer aux puits de carbone, tout en améliorant les micro-climats, les propriétés nutritives du sol et la rétention d'eau (*degré de confiance élevé*). {3.3, 3.6.1, 3.7.2, 3.7.5}

B.4.3 Les mesures destinées à combattre la désertification peuvent favoriser la séquestration de carbone dans le sol (*degré de confiance élevé*). La restauration de la végétation naturelle et la plantation d'arbres sur des terres dégradées enrichit, sur le long terme, le carbone présent dans la couche superficielle du sol et la couche profonde (*degré de confiance moyen*). Après l'adoption de pratiques agricoles de conservation dans les zones arides, les taux de séquestration du carbone, obtenus par modélisation, dépendent des conditions locales (*degré de confiance moyen*). En cas de perte de carbone dans les sols, la reconstitution des stocks de carbone peut prendre beaucoup de temps. {3.1.4, 3.3, 3.6.1, 3.6.3, 3.7.1, 3.7.2}

B.4.4 Eradiquer la pauvreté et assurer la sécurité alimentaire peuvent bénéficier de la mise en place des mesures visant la neutralité en matière de dégradation des terres (y compris le fait d'éviter, de réduire et d'inverser la dégradation des terres) dans les pâturages extensifs, les terres cultivées et les forêts ; ces mesures contribuent à combattre la désertification, tout en atténuant et en s'adaptant au changement climatique dans le cadre du développement durable. De telles mesures comprennent la déforestation évitée et des pratiques adaptées aux conditions locales, dont la gestion des pâturages extensifs et des feux de forêt (*degré de confiance élevé*). {3.4.2, 3.6.1, 3.6.2, 3.6.3, 4.8.5}.

B.4.5 Actuellement, il y a un manque de connaissances sur les limites à l'adaptation et sur les risques de maladaptation aux effets conjugués du changement climatique et de la désertification. En l'absence d'options d'adaptation nouvelles ou améliorées, le potentiel de risques résiduels et de maladaptation est élevé (*degré de confiance élevé*). Même lorsque des solutions existent, leur mise en œuvre peut être obstruée par des obstacles d'ordre social, économique et institutionnel (*degré de confiance moyen*). Certaines options d'adaptation peuvent devenir maladaptées de par leurs impacts sur l'environnement, comme une irrigation qui entraîne une salinisation des sols ou dont l'excès de prélèvement provoque un épuisement des réserves d'eau souterraines (*degré de confiance moyen*). Les formes extrêmes de désertification peuvent entraîner une perte totale de productivité des terres agricoles, limitant les possibilités d'adaptation ou touchant aux limites à l'adaptation (*degré de confiance élevé*). {Résumé du chapitre 3, 3.6.4, 3.7.5, 7.4.9}

B.4.6. Développer, favoriser et promouvoir l'accès à des sources d'énergie et à des technologies plus propres peut contribuer à l'adaptation et à l'atténuation du changement climatique et à la lutte contre la désertification et la dégradation des forêts par la diminution de l'utilisation de biomasse traditionnelle à des fins énergétiques en diversifiant les sources d'énergie (*degré de confiance moyen*). Il pourrait en découler des bénéfices socio-économiques et en matière de santé, au profit notamment des femmes et des enfants (*degré de confiance élevé*). L'efficacité des installations éoliennes et solaires est reconnue ; cette efficacité peut être réduite dans certaines régions par l'effet de tempêtes de poussière et de sable (*degré de confiance élevé*). {3.5.3, 3.5.4, 4.4.4, 7.5.2, encadré thématique 12 du chapitre 7}

B.5 La gestion durable des terres[33], y compris la gestion durable des forêts[34], peut prévenir et limiter la dégradation des terres, maintenir la productivité des terres et, parfois, inverser les effets néfastes du changement climatique sur la dégradation des terres (*degré de confiance très élevé*). Elle peut également contribuer à l'atténuation et à l'adaptation (*degré de confiance élevé*). La réduction et l'inversion de la dégradation des terres, à des échelles allant de l'exploitation agricole aux bassins versants, peuvent procurer des retombées rentables, immédiates et à long-terme, aux communautés concernées et contribuer à plusieurs objectifs de développement durable (ODDs), avec des co-bénéfices en matière d'adaptation (*degré de confiance très élevé*) et d'atténuation (*degré de confiance élevé*). Même avec une mise en œuvre de gestion durable des terres, les limites à l'adaptation peuvent être dépassées dans certaines situations (*degré de confiance moyen*). {1.3.2, 4.1.5, 4.8, tableau 4.2}

B.5.1 Il est possible de faire face à la dégradation des terres dans les systèmes agricoles par une gestion durable des terres, centrée sur les aspects écologiques et socio-économiques, avec des co-bénéfices en matière d'adaptation au changement climatique. Les options de gestion qui réduisent la vulnérabilité à l'érosion et à la perte de nutriments des sols comprennent la culture d'engrais verts et de plantes de couverture, le maintien sur place des résidus de récolte, un travail du sol restreint ou l'élimination du labour, et le maintien de la couverture végétale par une gestion améliorée des pâturages (*degré de confiance très élevé*). {4.8}

B.5.2 Les options suivantes procurent également des co-bénéfices en matière d'atténuation. Les modes d'exploitation tels que l'agroforesterie, les prairies permanentes et l'utilisation de céréales vivaces peuvent réduire notablement l'érosion et le lessivage des nutriments tout en augmentant la teneur en carbone du sol (*degré de confiance élevé*). Les cultures de couverture auraient un potentiel global de séquestration de 0,44 ± 0,11 $GtCO_2$ an^{-1} si elles étaient appliquées sur 25 % des terres cultivées de la planète (*degré de confiance élevé*). L'application de certaines formes de biochar peut séquestrer du carbone (*degré de confiance élevé*) et améliorer l'état du sol dans certains types de sol / de climat (*degré de confiance moyen*). {4.8.1.1, 4.8.1.3, 4.9.2, 4.9.5, 5.5.1, 5.5.4 ; encadré thématique 6 du chapitre 5}

B.5.3 La réduction de la déforestation et de la dégradation des forêts diminue les émissions de GES (*degré de confiance élevé*), le potentiel technique d'atténuation étant estimé à 0,4–5,8 $GtCO_2$ an^{-1}. En apportant à la population des moyens de subsistance à long terme, la gestion durable des forêts peut réduire l'ampleur de la conversion des forêts à des usages non forestiers (terres cultivées, installations, etc.) (*degré de confiance élevé*). Une gestion durable des forêts visant la production de bois, de fibre, de biomasse, de ressources non ligneuses ou d'autres fonctions et services écosystémiques, peut diminuer les émissions de GES et peut contribuer à l'adaptation (*degré de confiance élevé*). {2.6.1.2, 4.1.5, 4.3.2, 4.5.3, 4.8.1.3, 4.8.3, 4.8.4}

B.5.4 La gestion durable des forêts peut maintenir ou accroître les stocks de carbone forestiers, et peut maintenir les puits de carbone forestiers, entre autres, par le transfert du carbone dans les produits du bois, remédiant ainsi au problème de la saturation des puits (*degré de confiance élevé*). Lorsque le carbone du bois est transféré dans les produits ligneux récoltés, ces derniers peuvent stocker du carbone sur le long terme et peuvent se substituer à des matériaux à forte intensité d'émissions, réduisant les émissions d'autres secteurs (*degré de confiance élevé*). Quand la biomasse est utilisée pour produire de l'énergie, par exemple dans une stratégie d'atténuation, le carbone est relâché dans l'atmosphère plus rapidement (*degré de confiance élevé*). {2.6.1, 2.7, 4.1.5, 4.8.4, 6.4.1, figure RID.3, encadré thématique 7 du chapitre 6}

B.5.5 Le changement climatique peut entraîner une dégradation des terres même avec la mise en œuvre de mesures pour éviter, réduire ou inverser la dégradation des terres (*degré de confiance élevé*). Ces limites à l'adaptation sont dynamiques, propres à chaque emplacement et déterminées par l'interaction des modifications biophysiques avec les conditions sociales et institutionnelles (*degré de confiance très élevé*). Dans certaines situations, le dépassement des limites à l'adaptation peut déclencher des pertes en cascade ou aboutir à des changements transformationnels indésirables (*degré de confiance moyen*), par exemple une migration forcée (*degré de confiance faible*), des conflits (*degré de confiance faible*) ou la pauvreté (*degré de confiance moyen*). Les exemples de dégradation des terres imputable au changement climatique qui peut franchir les limites à l'adaptation comprennent l'érosion des côtes accentuée par l'élévation du niveau de la mer où les terres disparaissent (*degré de confiance élevé*), le dégel du pergélisol qui affecte les infrastructures et les moyens de subsistance (*degré de confiance moyen*) et l'érosion extrême des sols qui cause une réduction de leur capacité de production (*degré de confiance moyen*). {4.7, 4.8.5, 4.8.6, 4.9.6, 4.9.7, 4.9.8}

B.6 Des options de réponse peuvent être déployées et appliquées à grande échelle pour l'ensemble du système alimentaire, de la production à la consommation, incluant les pertes et le gaspillage de nourriture, au profit de l'adaptation et de l'atténuation (*degré de confiance élevé*). Le potentiel technique total d'atténuation associé aux activités agricoles et d'élevage ainsi qu'à l'agroforesterie est estimé à 2,3-9,6 $GtéqCO_2$ an^{-1} d'ici 2050 (*degré de confiance moyen*). Le potentiel technique total d'atténuation des changements dans les habitudes alimentaires est estimé à 0,7-8 $GtéqCO_2$ an^{-1} d'ici 2050 (*degré de confiance moyen*). {5.3, 5.5, 5.6}

---

[33] La gestion durable des terres est définie dans ce rapport comme la gestion et l'utilisation responsables des ressources en terres, y compris les sols, l'eau, les animaux et les végétaux, en vue de faire face à l'évolution des besoins humains, tout en assurant le potentiel productif à long terme de ces ressources et le maintien de leurs fonctions environnementales. Parmi ces options figurent l'agro-écologie (dont l'agroforesterie), les pratiques agricoles et forestières de conservation, la diversité des espèces cultivées en agriculture et en forêt, les rotations appropriées en agriculture et foresterie, l'agriculture biologique, la gestion intégrée des ravageurs, la protection des pollinisateurs, la collecte de l'eau de pluie, la gestion des parcours et pâturages et les systèmes d'agriculture de précision.

[34] La gestion durable des forêts est définie dans ce rapport comme une gestion et utilisation responsables des forêts et des terrains boisés, d'une manière et à une intensité telles qu'elles maintiennent leur biodiversité, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur capacité à satisfaire, actuellement et pour le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes, aux niveaux local, national et mondial ; et qu'elles ne causent pas de préjudices à d'autres écosystèmes.

B.6.1 Les pratiques qui contribuent à l'adaptation au changement climatique et à l'atténuation pour les terres cultivées comprennent l'augmentation de la matière organique des sols, la maîtrise de l'érosion, une meilleure gestion des fertilisants, une meilleure gestion des cultures, par exemple la gestion des rizières, et l'utilisation de variétés et d'amélioration génétique pour la tolérance à la chaleur et la sécheresse. S'agissant de l'élevage, les options comprennent l'amélioration de la gestion des terres pâturées, l'amélioration de la gestion des déjections animales, une meilleure qualité de l'alimentation animale, l'utilisation d'une diversité de races et l'amélioration génétique. Différents systèmes agricoles et pastoraux peuvent réduire l'intensité des émissions liées aux produits d'élevage. Selon le système agricole ou pastoral et le niveau de développement, les réductions de l'intensité des émissions des produits d'élevage pourraient aboutir à une réduction absolue des émissions de GES (*degré de confiance moyen*). Beaucoup d'options liées à l'élevage peuvent accroître la capacité d'adaptation des communautés rurales, en particulier pour l'agriculture à petite échelle et les populations pastorales. Les synergies entre adaptation et atténuation peuvent être significatives, par exemple dans les approches de gestion durable des terres (*degré de confiance élevé*). {4.8, 5.3.3, 5.5.1, 5.6}

B.6.2 La diversification au sein du système alimentaire (par exemple, la mise en œuvre des modes de production intégrés, l'élargissement des ressources génétiques, et les habitudes alimentaires) peut réduire les risques que pose le changement climatique (*degré de confiance moyen*). Une alimentation équilibrée, qui comprend des aliments d'origine végétale comme ceux à base de céréales secondaires, de légumineuses, de fruits et légumes, de noix, de graines, et des aliments d'origine animale produits dans des systèmes résilients et durables émettant peu de GES, offrent d'excellentes possibilités sur le plan de l'adaptation et de l'atténuation et s'accompagnent de co-bénéfices notables pour la santé humaine (*degré de confiance élevé*). D'ici à 2050, une évolution des habitudes alimentaires pourrait libérer plusieurs millions de kilomètres carrés de terres (*degré de confiance moyen*) et offrir un potentiel technique d'atténuation de 0,7 à 8,0 GtéqCO_2 an^{-1} par rapport aux projections tendancielles (*degré de confiance élevé*). Les transitions vers des choix alimentaires à faibles émissions de GES pourraient être influencées par des pratiques de production locales, des obstacles techniques et financiers, et des moyens de subsistance et habitudes culturelles associés (*degré de confiance élevé*). {5.3, 5.5.2, 5.5, 5.6}

B.6.3 La diminution des pertes et du gaspillage alimentaire peuvent réduire les émissions de GES et contribuer à l'adaptation par la réduction des surfaces nécessaires à la production alimentaire (*degré de confiance moyen*). Pendant la période 2010-2016, les pertes et gaspillages alimentaires à l'échelle du globe représentaient 8 à 10 % des émissions anthropiques totales de GES (*degré de confiance moyen*). Aujourd'hui, 25 à 30 % de toute la nourriture produite est perdue ou gaspillée (*degré de confiance moyen*). Les options techniques comme l'amélioration des techniques de récolte, l'entreposage à la ferme, les infrastructures, le transport, le conditionnement, la vente au détail et l'éducation peuvent réduire les pertes et gaspillages tout le long de la chaîne d'approvisionnement. Les causes des pertes et du gaspillage alimentaire diffèrent de manière importante entre les pays développés et en développement, ainsi qu'entre régions (*degré de confiance moyen*). {5.5.2} D'ici à 2050, la réduction des pertes et du gaspillage alimentaire peut libérer plusieurs millions de kilomètres carrés de terres (*degré de confiance faible*). {6.3.6}

B.7 L'utilisation future des terres dépend, en partie, des objectifs climatiques visés et de l'éventail des solutions déployées (*degré de confiance élevé*). Tous les scénarios qui limitent le réchauffement à 1,5 °C ou nettement sous 2 °C nécessitent des mesures d'atténuation reposant sur les usages et les changements d'usages des sols, la plupart alliant dans des proportions variées reboisement, boisement, réduction de la déforestation, et bioénergie (*degré de confiance élevé*). Un petit nombre de scénarios parvient à 1,5 °C avec un taux réduit de conversion des terres (*degré de confiance élevé*), et donc des conséquences moindres en matière de désertification, de dégradation des terres et de sécurité alimentaire (*degré de confiance moyen*). {2.6, 6.4, 7.4, 7.6 ; encadré thématique 9 du chapitre 6 ; figure RID.4}

B.7.1 Les trajectoires modélisées qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C[35] s'appuient davantage sur des solutions d'atténuation basées sur l'usage des terres que les trajectoires avec un réchauffement plus élevé (*degré de confiance élevé*), mais les impacts du changement climatique sur les terres sont moins marqués dans ces trajectoires (*degré de confiance moyen*). {2.6, 6.4, 7.4, encadré thématique 9 du chapitre 6, figure RID.2, figure RID.4}

B.7.2 Les trajectoires modélisées qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C et 2 °C projettent une évolution de la superficie de forêts, entre 2010 et 2050, allant d'une baisse de 2 millions à une hausse de 12 millions de kilomètres carrés (*degré de confiance moyen*). Les trajectoires à 3 °C projettent des variations de zones forestières plus petites, allant d'une réduction de 4 millions de kilomètres carrés à une augmentation de 6 millions de kilomètres carrés (*degré de confiance moyen*). {2.5, 6.3, 7.3, 7.5 ; encadré thématique 9 du chapitre 6 ; figure RID.3, figure RID.4}

B.7.3 Les superficies de terres nécessaires à la bioénergie dans les différentes trajectoires modélisées varient beaucoup en fonction de la trajectoire socio-économique, de l'ampleur du réchauffement, des matières premières utilisées et des systèmes de production (*degré de confiance élevé*). Les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5 °C dédient jusqu'à 7 millions de kilomètres carrés à la bioénergie en 2050 ; la superficie utilisée pour de la bioénergie est moindre dans les trajectoires à 2 °C (0,4 à 5 millions de kilomètres carrés) et à 3 °C (0,1 à 3 millions de kilomètres carrés) (*degré de confiance moyen*). Les trajectoires avec un niveau élevé de conversion des terres pourraient présenter des effets secondaires indésirables sur la rareté de la ressource en eau, la biodiversité, la dégradation des terres, la désertification et la sécurité alimentaire, si elles ne sont pas gérées de façon adéquate et avec soin. *A contrario*, la mise en œuvre des meilleures pratiques aux échelles appropriées peut offrir des co-bénéfices, tels que la gestion de la salinité dans les terres arides, l'amélioration de la lutte biologique et de la biodiversité et l'augmentation de la séquestration du carbone dans le sol (*degré de confiance élevé*). {2.6, 6.1, 6.4, 7.2 ; encadré thématique 7 du chapitre 6, figure RID.3}

[35] Dans le présent rapport, les trajectoires qui limitent le réchauffement planétaire à une valeur donnée présentent une probabilité de 66 % de ne pas dépasser la température fixée d'ici à 2100 avec le modèle MAGICC.

B.7.4 La plupart des trajectoires d'atténuation incluent l'utilisation à grande échelle des technologies de bioénergie. Un petit nombre de trajectoires limite le réchauffement à 1,5 °C en réduisant la dépendance aux bioénergies et aux BECCS (superficie de terres inférieure à 1 million de kilomètres carrés en 2050) et à d'autres options d'élimination du dioxyde de carbone (*degré de confiance élevé*). Ces trajectoires reposent — encore plus que les autres scénarios à 1,5 °C — sur des transitions rapides et de grande envergure dans le domaine de l'énergie, des terres, des systèmes urbains et des infrastructures, et sur des changements de comportement et de mode de vie. {2.6.2, 5.5.1, 6.4, encadré thématique 7 du chapitre 6}

B.7.5 Ces trajectoires modélisées ne tiennent pas compte des effets du changement climatique sur les terres ou de la fertilisation par le CO_2. De plus, elles n'incluent qu'une partie des options de réponse évaluées dans ce rapport (*degré de confiance élevé*) ; la prise en compte d'options de réponse supplémentaires dans les modèles pourrait réduire le recours projeté à la bioénergie ou aux techniques d'élimination du dioxyde de carbone qui augmentent les besoins en terres. {6.4.4, encadré thématique 9 du chapitre 6}

Contribution potentielle globale des options de réponse à l'atténuation, à l'adaptation, à la lutte contre la désertification et la dégradation des terres et à l'amélioration de la sécurité alimentaire

La partie A présente les options de réponse qui peuvent être mises en œuvre avec une demande en terres faible, voire nulle, incluant certaines demandes qui peuvent réduire la demande en terres. La quantification des co-bénéfices et des effets secondaires indésirables est alignée sur la limite supérieure de la plage de potentiel estimé. L'ampleur des contributions est catégorisée à l'aide de seuils fixés pour les impacts positifs et négatifs. Les lettres dans les cases indiquent le niveau de confiance dans l'ampleur de l'impact par rapport aux seuils employés (voir la légende). Le niveau de confiance attaché au sens du changement (signe) est généralement plus grand.

Options de réponse basées sur la gestion des terres		Atténuation	Adaptation	Désertification	Dégradation des terres	Sécurité alimentaire	Coût
Agriculture	Hausse de la productivité agricole	F	M	F	M	E	—
	Agroforesterie	M	M	M	M	F	●
	Amélioration de la gestion des terres cultivées	M	F	F	F	F	●●
	Amélioration de la gestion des élevages	M	F	F	F	F	●●●
	Diversification agricole	F	F	F	M	F	●
	Amélioration de la gestion des terres pâturées	M	F	F	F	F	—
	Gestion intégrée de l'eau	F	F	F	F	F	●●
	Réduction de la conversion des prairies en terres cultivées	F	—	F	F	- F	●
Forêts	Gestion des forêts	M	F	F	F	F	●●
	Réduction de la déforestation et de la dégradation des forêts	E	F	F	F	F	●●
Sols	Augmentation de la teneur en carbone organique du sol	E	F	M	M	F	●●
	Ralentissement de l'érosion des sols	↔ F	F	M	M	F	●●
	Réduction de la salinisation des sols	—	F	F	F	F	●●
	Réduction des tassements des sols	—	F	—	F	F	●
Autres écosystèmes	Gestion des incendies	M	M	M	M	F	●
	Diminution des glissements de terrain et aléas naturels	F	F	F	F	F	—
	Diminution de la pollution, dont l'acidification	↔ M	M	F	F	F	—
	Restauration et réduction de la conversion des zones humides côtières	M	F	M	M	↔ F	—
	Restauration et réduction de la conversion des tourbières	M	—	S.O.	M	- F	●
Options de réponse basées sur la gestion des chaînes de valeur							
Demande	Réduction des pertes après récolte	E	M	F	F	E	—
	Modification des habitudes alimentaires	E	—	F	E	E	—
	Réduction du gaspillage de nourriture (consommateur ou détaillant)	E	—	F	M	M	—
Offre	Approvisionnement durable	—	F	—	F	F	—
	Amélioration de la transformation et de la vente au détail des denrées alimentaires	F	F	—	—	F	—
	Amélioration de l'utilisation d'énergie dans les systèmes alimentaires	F	F	—	—	F	—
Options de réponse basées sur la gestion des risques							
Risque	Diversification des moyens de subsistance	—	F	—	F	F	—
	Gestion de l'étalement urbain	—	F	F	M	F	—
	Instruments de partage du risque	↔ F	F	—	↔ F	F	●●

les options présentées sont celles pour lesquelles des données sont disponibles pour évaluer le potentiel global face à trois enjeux ou plus relatifs aux terres.
Les ampleurs sont estimées séparément pour chaque option et n'ont pas de caractère additif.

Critères clés employés pour déterminer l'ampleur de l'impact de chaque option de réponse intégrée

		Atténuation *GtéqCO$_2$ an^{-1}*	Adaptation *1 000 000 hab.*	Désertification *1 000 000 km²*	Dégradation des terres *1 000 000 km²*	Sécurité alimentaire *1 000 000 hab.*
positif	Important	Plus de 3	Positif pour plus de 25	Positif pour plus de 3	Positif pour plus de 3	Positif pour plus de 100
	Modéré	0,3 à 3	1 à 25	0,5 à 3	0,5 à 3	1 à 100
	Faible	Moins de 0,3	Moins de 1	Moins de 0,5	Moins de 0,5	Moins de 1
	Négligeable	Sans effet	Sans effet	Sans effet	Sans effet	Sans effetT
Négatif	- Faible	Moins de -0,3	Moins de 1	Moins de 0,5	Moins de 0,5	Moins de 1
	- Modéré	-0,3 à -3	1 à 25	0,5 à 3	0,5 à 3	1 à 100
	- Important	Plus de -3	Négatif pour plus de 25	Négatif pour plus de 3	Négatif pour plus de 3	Négatif pour plus de 100

↔ **Variable:** Peut être positif ou négatif — pas de donné — S.O. sans objet

Degré de confiance

Confiance dans l'estimation de l'ampleur

E *Degré de confiance élevé*
M *Degré de confiance moyen*
F *Degré de confiance faible*

Plage de coût

Voir, dans les notes techniques, les plages de coût en dollars É. U. téqCO$_2$$^{-1}$ ou en dollars É. U. ha^{-1}.

●●● Coût élevé
●● Coût moyen
● Coût faible
— pas de données

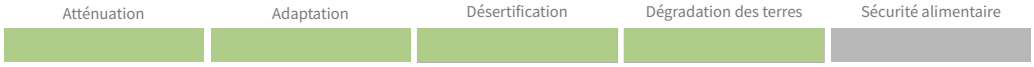
Contribution potentielle globale des options de réponse à l'atténuation et l'adaptation, à la lutte contre la désertification et la dégradation des terres et à l'amélioration de la sécurité alimentaire dans le monde

Partie B: Options de réponse qui reposent sur des changements d'affectation des sols additionnels et pourraient avoir des incidences sur trois enjeux liés aux terres ou plus, selon le contexte de mise en œuvre. Pour chaque option, la première ligne (mise en œuvre à grande échelle) donne une estimation quantitative (comme dans la partie A) des incidences dans le cas d'une mise en œuvre à une échelle permettant d'éliminer plus de 3 $GtCO_2$ an^{-1}, et en utilisant les seuils indiqués dans la partie A. Les cases avec les hachures rouges indiquent une accentuation de la pression sans quantification de l'impact. Pour chaque option, la deuxième ligne (mise en œuvre des meilleures pratiques) donne l'estimation qualitative de l'impact pour une mise en œuvre utilisant les meilleures pratiques dans des systèmes de paysages convenablement gérés, permettant une utilisation efficace et durable des ressources et soutenus par des mécanismes de gouvernance appropriés. Dans ces évaluations qualitatives, les impacts positifs sont en vert, les interactions neutres en gris.

Bioénergie avec ou sans capture et stockage du dioxyde de carbone



Grande échelle: Les impacts sur l'adaptation, la désertification, la dégradation des terres et la sécurité alimentaire sont les impacts potentiels maximaux dans le cas d'une élimination de 11,3 $GtCO_2$ an^{-1} en 2050 par la bioénergie avec capture et stockage du dioxyde de carbone, et notant que la bioénergie sans capture et stockage du dioxyde de carbone peut elle aussi réduire les émissions de plusieurs $GtCO_2$ an^{-1} s'il s'agit d'une source énergétique à faible intensité de carbone {2.7.1.5; 6.4.1.1.5}. Les études des liens entre bioénergie et sécurité alimentaire estiment qu'à ce niveau de mise en œuvre, jusqu'à 150 millions de personnes supplémentaires pourraient être menacées par la faim {6.4.5.1.5}. Les cases hachurées en rouge pour la désertification et la dégradation des terres indiquent que, bien qu'il faille jusqu'à 15 millions de kilomètres carrés de terres supplémentaires en 2100 dans les scénarios à 2 °C, ce qui accentuera la pression en matière de désertification et de dégradation des terres, il est difficile de quantifier la superficie réelle concernée par cette pression additionnelle {6.4.3.1.5 ; 6.4.4.1.5}.

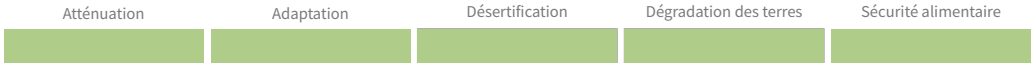


Meilleures pratiques: Le signe et l'ampleur des effets de la bioénergie avec ou sans capture et stockage du dioxyde de carbone dépendent de l'échelle de mise en œuvre, du type de matières premières utilisées pour la bioénergie, des autres options de réponse incluses, et du lieu où sont implantées les cultures bioénergétiques (incluant les émissions liées à l'usage antérieur des terres et au changement d'affectation des sols indirect). Par exemple, limiter la production de bioénergie aux terres marginales ou à des terres en déprise agricole aurait des effets négligeables sur la biodiversité et la sécurité alimentaire, avec de possibles co-bénéfices en matière de dégradation des terres ; toutefois, les avantages du point de vue de l'atténuation pourraient aussi être moindres {tableau 6.58}.

Reboisement et restauration de forêts



Grande échelle: Les impacts sur l'adaptation, la désertification, la dégradation des terres et la sécurité alimentaire sont les impacts potentiels maximaux dans le cas d'une mise en œuvre de reboisement et de restauration de forêts (avec chevauchement partiel avec du boisement) à une échelle permettant l'extraction de 10,1 $GtCO_2$ an^{-1} de l'atmosphère {6.4.1.1.2}. Le boisement à grande échelle pourrait entraîner une hausse du prix des denrées alimentaires de 80 % d'ici 2050, et des mesures d'atténuation plus générales dans le secteur AFOLU peuvent se traduire par une augmentation de 80 à 300 millions du nombre de personnes sous-alimentées ; l'impact du reboisement est moindre {6.4.5.1.2}.

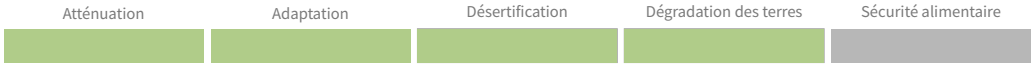


Meilleures pratiques: Le reboisement et la restauration des forêts dans d'anciens secteurs boisés présentent des co-bénéfices dans le cas d'un déploiement à petite échelle recourant à des espèces indigènes et associant les parties prenantes locales de manière à favoriser la sécurité alimentaire. Les exemples de mise en œuvre durable incluent, entre autres, la réduction de l'exploitation illégale et l'arrêt de la destruction illégale des forêts dans les zones protégées, le reboisement et la restauration des forêts sur les terres dégradées et désertifiées {encadré 6.1C ; tableau 6.6}.

Boisement



Grande échelle: Les impacts sur l'adaptation, la désertification, la dégradation des terres et la sécurité alimentaire sont les impacts potentiels maximaux dans le cas d'une mise en œuvre du boisement (avec chevauchement partiel du reboisement et de la restauration des forêts) à une échelle permettant l'extraction de 8,9 $GtCO_2$ an^{-1} de l'atmosphère {6.4.1.1.2}. Le boisement à grande échelle pourrait entraîner une hausse du prix des denrées alimentaires de 80 % d'ici 2050, et des mesures d'atténuation plus générales dans le secteur AFOLU peuvent se traduire par une augmentation de 80 à 300 millions du nombre de personnes sous-alimentées {6.4.5.1.2}.

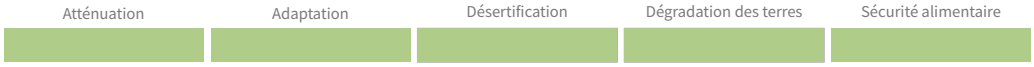


Meilleures pratiques: Le boisement est utilisé pour prévenir la désertification et lutter contre la dégradation des terres. Les terres forestières offrent aussi des bénéfices en terme d'approvisionnement alimentaire, en particulier quand les forêts sont implantées sur des terres dégradées, des mangroves ou d'autres terres impropres à l'agriculture. Par exemple, les aliments issus des forêts représentent un filet de sécurité pendant les périodes d'insécurité alimentaire et financière {6.4.5.1.2}.

Incorporation de biochar dans les sols



Grande échelle: Les impacts sur l'adaptation, la désertification, la dégradation des terres et la sécurité alimentaire sont les impacts potentiels maximaux dans le cas d'une mise en œuvre de l'incorporation de biochar dans les sols à une échelle permettant l'extraction de 6,6 $GtCO_2$ an^{-1} de l'atmosphère {6.4.1.1.3}. Les cultures énergétiques dédiées, nécessaires à la production de matières premières, pourraient occuper de 0,4 à 2,6 millions de kilomètres carrés, soit quelque 20 % de la superficie des terres cultivées dans le monde ; cela pourrait avoir un effet important sur la sécurité alimentaire d'environ 100 millions de personnes {6.4.5.1.3}.



Meilleures pratiques: Appliqué sur les terres, le biochar pourrait avoir des bénéfices modérés sur la sécurité alimentaire en améliorant les rendements de 25 % dans les tropiques, mais avec une incidence moindre dans les régions tempérées, ou accroître la capacité de rétention d'eau et l'efficacité de l'utilisation des nutriments. Les terres en déprise agricole pourraient servir à produire de la biomasse pour le biochar, évitant ainsi la compétition avec la production alimentaire ; on estime que 5 à 9 millions de kilomètres carrés de terres pourraient être disponibles à cette production de biomasse sans nuire à la sécurité alimentaire ou à la biodiversité, compte tenu des terres marginales et dégradées et des terres libérées par une intensification du pâturage {6.4.5.1.3}.

Figure RID.3 Contribution potentielle des options de réponse à l'atténuation et l'adaptation, à la lutte contre la désertification et la dégradation des terres et à l'amélioration de la sécurité alimentaire dans le monde | Cette figure rassemble les informations d'études comportant des hypothèses très diverses sur la manière d'appliquer les options de réponse et sur les contextes de mise en œuvre. Une même solution implémentée de façon différente à l'échelle locale ou mondiale pourrait produire des résultats différents. **Ampleur du potentiel :** Dans la partie A, l'ampleur concerne le potentiel technique des options de réponse au niveau mondial. Pour chaque enjeu concernant l'usage des terres, l'ampleur est fixée par rapport à un niveau de référence décrit ci-après. Pour l'atténuation, les potentiels sont établis par rapport aux potentiels approximatifs des stratégies qui présentent l'impact individuel le plus grand (~3 Gt$éqCO_2$ an^{-1}). Le seuil pour la catégorie d'impact « important » est fixé à ce niveau. Pour l'adaptation, l'ampleur est établie relativement aux 100 millions de personnes qui seraient touchées par le changement climatique et une économie carbonée entre 2010 et 2030. Le seuil pour la catégorie d'impact « important » correspond à 25 % de ce chiffre. Pour la désertification et la dégradation des terres, l'ampleur est mesurée par rapport à l'extrémité inférieure de la plage des estimations actuelles des superficies dégradées, soit 10 à 60 millions de kilomètres carrés. Le seuil pour la catégorie d'impact « important » représente 30 % de l'estimation inférieure. Pour la sécurité alimentaire, l'ampleur est évaluée par rapport aux 800 millions environ de personnes actuellement sous-alimentées. Le seuil pour la catégorie d'impact « important » équivaut à 12,5 % de ce total. Dans la partie B, la première ligne de chaque option de réponse correspond à une mise en œuvre à grande échelle ; l'ampleur et les seuils sont identiques à ceux définis dans la partie A. La deuxième ligne concerne une mise en œuvre conforme à de bonnes pratiques ; l'évaluation qualitative marquée de vert indique des impacts potentiels positifs, celle marquée de gris indique des interactions neutres. On suppose que la hausse de la production alimentaire est obtenue par une intensification viable plutôt que par l'emploi déraisonnable d'intrants supplémentaires telles les substances agrochimiques. **Niveau de confiance :** Il s'agit du niveau de confiance (élevé, moyen ou faible) attaché à la catégorie d'ampleur dans laquelle se classe chaque stratégie relativement à l'atténuation, l'adaptation, la désertification, la dégradation des terres et la sécurité alimentaire. Un *degré de confiance élevé* signifie que les textes publiés présentent une grande cohérence et de nombreux éléments probants à l'appui d'un impact important, modéré ou faible. Un *degré de confiance faible* signifie que la catégorisation de l'ampleur repose sur un faible nombre d'études. Un *degré de confiance moyen* s'appuie sur des preuves moyennement nombreuses et une cohérence moyenne sur l'amplitude de la réponse. **Plage de coût :** L'estimation repose sur l'agrégation d'études souvent régionales et n'englobe pas toujours les mêmes éléments de coût. Dans la partie B, aucune estimation n'est donnée pour une mise en œuvre conforme aux bonnes pratiques. Un cercle indique un coût faible (<10 dollars américains par $téqCO_2^{-1}$ ou <20 dollars américains par hectare), deux cercles un coût moyen (10 à 100 dollars américains par $téqCO_2^{-1}$ ou 20 à 200 dollars américains par hectare) et trois cercles un coût élevé (>100 dollars américains par $téqCO_2^{-1}$ ou >200 dollars américains par hectare). Les seuils en dollars américains par hectare sont choisis de manière à permettre la comparaison, mais la conversion précise dépendra de la solution retenue. **Éléments probants :** Les éléments probants quant à l'ampleur du potentiel quantitatif des options de réponse dans le domaine de la gestion des terres proviennent des sources suivantes : pour l'atténuation, tableaux 6.13 à 6.20 complétés par certains éléments de la section 2.7.1 ; pour l'adaptation, tableaux 6.21 à 6.28 ; pour la lutte contre la désertification, tableaux 6.29 à 6.36 complétés par certains éléments du chapitre 3 ; pour la lutte contre la dégradation des terres, tableaux 6.37 à 6.44 complétés par certains éléments du chapitre 4 ; pour l'amélioration de la sécurité alimentaire, tableaux 6.45 à 6.52 complétés par certains éléments du chapitre 5. Le chapitre 6 analyse plusieurs synergies et compromis qui ne sont pas repris ici. Pour l'évaluation qualitative qui figure à la deuxième ligne de chaque option de réponse dans la partie B, on trouvera d'autres éléments probants dans les tableaux 6.6, 6.55, 6.56 et 6.58, la section 6.3.5.1.3 et l'encadré 6.1c.

C. Conditions propices à la mise en œuvre des options de réponse

C.1 La mise en place de politiques, mécanismes institutionnels et dispositifs de gouvernance bien pensés à tous les échelons peut favoriser l'adaptation et l'atténuation dans le secteur des terres, tout en facilitant la poursuite de trajectoires de développement capables de s'adapter à l'évolution du climat (*degré de confiance élevé*). Les politiques en matière de climat et de gestion des terres qui se renforcent mutuellement offrent la possibilité de sauvegarder les ressources, d'affermir la résilience sociale, de faciliter la restauration écologique et de favoriser la participation et la collaboration de multiples parties prenantes (*degré de confiance élevé*). {Figure RID.1, figure RID.2, figure RID.3 ; 3.6.2, 3.6.3, 4.8, 4.9.4, 5.7, 6.3, 6.4, 7.2.2, 7.3, 7.4, 7.4.7, 7.4.8, 7.5, 7.5.5, 7.5.6, 7.6.6 ; encadré thématique 10 du chapitre 7}

C.1.1 Le zonage des terres, l'aménagement du territoire, la planification intégrée des paysages, la réglementation, les mesures d'incitation (par exemple, la rémunération des services écosystémiques) et les instruments de persuasion ou d'application volontaire (plans agro-environnementaux, normes et certificats de production viable, utilisation de savoirs scientifiques, locaux et autochtones, action collective, etc.) peuvent avoir des effets positifs sur l'adaptation et l'atténuation (*degré de confiance moyen*). Ces mesures peuvent aussi générer des revenus et inciter à remettre en état les terres dégradées, à atténuer le changement climatique et s'y adapter dans certains contextes (*degré de confiance moyen*). Les politiques qui visent la neutralité en matière de dégradation des terres permettent également de favoriser la sécurité alimentaire, le bien-être des populations, l'adaptation au changement climatique et l'atténuation (*degré de confiance élevé*). {Figure RID.2 ; 3.4.2, 4.1.6, 4.7, 4.8.5, 5.1.2, 5.7.3, 7.3, 7.4.6, 7.4.7, 7.5}

C.1.2 Une insécurité du régime foncier affecte la capacité des individus, des collectivités et des organisations à apporter des changements dans le secteur des terres qui peuvent favoriser l'adaptation et l'atténuation (*degré de confiance moyen*). Le manque de reconnaissance du droit coutumier d'accès aux terres et à la propriété foncière risque d'aggraver la vulnérabilité et d'affaiblir la capacité d'adaptation (*degré de confiance moyen*). Les politiques foncières (incluant la reconnaissance du droit coutumier, la cartographie participative, la redistribution, la décentralisation, la cogestion, la réglementation des marchés locatifs) peuvent favoriser simultanément la sécurité et la souplesse d'action face au changement climatique (*degré de confiance moyen*). {3.6.1, 3.6.2, 5.3, 7.2.4, 7.6.4, encadré thématique 6 du chapitre 5}

C.1.3 Parvenir à la neutralité en matière de dégradation des terres demande de conjuguer des mesures qui évitent et atténuent le phénomène par la mise en place d'une gestion durable des terres, et des mesures qui inversent le phénomène par la réhabilitation et la restauration des terres dégradées. Nombre d'interventions mises en œuvre dans ce but sont également bénéfiques sur le plan de l'adaptation au changement climatique et de l'atténuation. La recherche de la neutralité en matière de dégradation des terres incite à s'attaquer simultanément à la dégradation des terres et au changement climatique (*degré de confiance élevé*). {4.5.3, 4.8.5, 4.8.7, 7.4.5}

C.1.4 Compte-tenu de la complexité des enjeux et de la diversité des acteurs concernés par les défis à relever dans le secteur des terres, un ensemble cohérent de politiques peut donner de meilleurs résultats qu'une approche unique face aux défis complexes que posent la gestion durable des terres et le changement climatique (*degré de confiance élevé*). L'utilisation d'un ensemble cohérent de politiques peut nettement réduire la vulnérabilité et l'exposition des systèmes naturels et humains au changement climatique (*degré de confiance élevé*). Ces politiques pourraient inclure l'assurance santé, l'assurance contre les risques météorologiques, la protection sociale et les filets de sécurité adaptatifs, le financement des imprévus et des fonds de réserve, et l'accès universel aux systèmes d'alerte précoce complété par des plans d'urgence efficaces (*degré de confiance élevé*). {1.2, 4.8, 4.9.2, 5.3.2, 5.6, 5.6.6, 5.7.2, 7.3.2, 7.4, 7.4.2, 7.4.6, 7.4.7, 7.4.8, 7.5.5, 7.5.6, 7.6.4, figure RID.4}

C.2 Les politiques visant l'ensemble du système alimentaire, y compris celles qui visent à réduire les pertes et le gaspillage et à influencer les choix alimentaires, conduisent à une gestion plus durable des terres, une meilleure sécurité alimentaire et des trajectoires à faibles émissions (*degré de confiance élevé*). Ce genre de mesures peut contribuer à l'adaptation au changement climatique et à l'atténuation, à faire reculer la dégradation des terres, la désertification et la pauvreté, et à améliorer la santé publique (*degré de confiance élevé*). L'adoption d'un système de gestion durable des terres et l'élimination de la pauvreté peuvent être facilitées par un accès élargi aux marchés, un régime foncier sécurisé, la prise en compte du coût environnemental dans les denrées alimentaires, la rémunération des services écosystémiques et l'amplification de l'action collective, locale et communautaire (*degré de confiance élevé*). {1.1.2, 1.2.1, 3.6.3, 4.7.1, 4.7.2, 4.8, 5.5, 6.4, 7.4.6, 7.6.5}

C.2.1 Les mesures qui favorisent et promeuvent une gestion durable des terres dans un but d'adaptation au changement climatique et d'atténuation incluent un meilleur accès aux marchés pour les intrants, les extrants et les services financiers, le renforcement de la participation des femmes et des peuples autochtones, l'amplification de l'action collective, locale et communautaire, la réforme des mécanismes de subvention et la promotion d'un cadre propice aux échanges commerciaux (*degré de confiance élevé*). Les efforts de restauration et de réhabilitation des terres peuvent être plus efficaces si les politiques renforcent la gestion locale des ressources naturelles tout en facilitant la collaboration entre les acteurs et les institutions, y compris à l'échelle internationale. {3.6.3, 4.1.6, 4.5.4, 4.8.2, 4.8.4, 5.7, 7.2}

C.2.2 Une prise en compte des coûts environnementaux des pratiques agricoles qui dégradent les terres peut inciter à l'adoption d'une gestion plus durable des terres (*degré de confiance élevé*). Cette prise en compte peut être entravée par les difficultés techniques d'estimation des coûts environnementaux des pratiques agricoles ainsi que ceux associés aux denrées alimentaires. {3.6.3, 5.5.1, 5.5.2, 5.6.6, 5.7, 7.4.4, encadré thématique 10 du chapitre 7}

C.2.3 L'adaptation et le renforcement de la résilience aux événements extrêmes affectant les systèmes alimentaires peuvent être facilités par une gestion intégrée des risques, par exemple par le recours aux mécanismes de partage des risques et de transfert (*degré de confiance élevé*). La diversification agricole, l'élargissement de l'accès aux marchés et l'anticipation d'une augmentation des perturbations de la chaîne d'approvisionnement peuvent permettre une meilleure adaptation des systèmes alimentaires (*degré de confiance élevé*). {5.3.2, 5.3.3, 5.3.5}

C.2.4 Les politiques de santé publique visant une meilleure nutrition, comme la diversification des sources d'approvisionnement dans les achats publics, l'assurance santé, les incitations financières et les campagnes de sensibilisation peuvent orienter la demande alimentaire, réduire les dépenses de santé, participer à réduire des émissions de GES et améliorer la capacité d'adaptation (*degré de confiance élevé*). La promotion d'une alimentation saine, conforme aux directives de santé publique, peut orienter la demande alimentaire et favoriser une gestion plus durable des terres et l'atteinte d'une bonne part des objectifs de développement durable (*degré de confiance élevé*). {3.4.2, 4.7.2, 5.1, 5.7, 6.3, 6.4}

C.3 Tenir compte des co-bénéfices et des compromis lors de l'élaboration de politiques alimentaires et concernant le secteur des terres peut permettre de surmonter certains obstacles à leur mise en œuvre (*degré de confiance moyen*). Une gouvernance à plusieurs niveaux, hybride et intersectorielle renforcée, ainsi que des politiques élaborées et adoptées de manière itérative, cohérente, adaptative et flexible, peuvent maximiser les co-bénéfices et minimiser les compromis ; en effet, les décisions en matière de gestion des terres sont prises depuis le niveau de la ferme jusqu'au niveau national, et les politiques climatiques ainsi que les politiques concernant le secteur des terres sont souvent structurées à travers de multiples secteurs, ministères et organismes (*degré de confiance élevé*). {Figure RID.3 ; 4.8.5, 4.9, 5.6, 6.4, 7.3, 7.4.6, 7.4.8, 7.4.9, 7.5.6, 7.6.2}

C.3.1 Le fait d'aborder les questions relatives à la désertification, la dégradation des terres et la sécurité alimentaire de façon intégrée, coordonnée et cohérente peut faciliter un développement résilient face au changement climatique et offrir de nombreux co-bénéfices potentiels (*degré de confiance élevé*). {3.7.5, 4.8, 5.6, 5.7, 6.4, 7.2.2, 7.3.1, 7.3.4, 7.4.7, 7.4.8, 7.5.6, 7.5.5}

C.3.2 Divers obstacles techniques, biophysiques, socio-économiques, financiers et culturels peuvent freiner l'adoption de nombre d'options de réponse basées sur l'usage des terres, tout comme l'incertitude quant aux avantages qui en découleraient (*degré de confiance élevé*). Le manque d'adoption de plusieurs pratiques de gestion durable des terres résulte de l'insécurité du régime foncier, de l'accès limité aux ressources et aux services agronomiques, de l'insuffisance et de l'inégalité des mesures d'incitation publiques et privées et du manque de connaissances théoriques et d'expérience pratique (*degré de confiance élevé*). La position affichée par les pouvoirs publics, l'application de politiques soigneusement conçues, l'intégration de l'apprentissage social et la modification des marchés peuvent, ensemble, diminuer les obstacles à la mise en œuvre (*degré de confiance moyen*). {3.6.1, 3.6.2, 5.3.5, 5.5.2, 5.6, 6.2, 6.4, 7.4, 7.5, 7.6}

C.3.3 Les secteurs des terres et de l'alimentation font face à des défis particuliers liés au morcellement des institutions, et souffrent aussi souvent d'un manque d'engagement entre les parties prenantes à différentes échelles et de la portée trop restreinte des objectifs politiques (*degré de confiance moyen*). La concertation avec d'autres secteurs, tels que la santé publique, les transports, l'environnement, l'eau, l'énergie ou l'infrastructure, est de nature à accroître les co-bénéfices, liés par exemple à la réduction des risques et l'amélioration de la santé (*degré de confiance moyen*). {5.6.3, 5.7, 6.2, 6.4.4, 7.1, 7.3, 7.4.8, 7.6.2, 7.6.3}

C.3.4 Certaines stratégies et politiques d'intervention peuvent entraîner des compromis, y compris des répercussions sociales, des dommages aux fonctions et services des écosystèmes, une raréfaction de l'eau, ou des coûts élevés, qui ne peuvent être bien gérés, même avec des pratiques institutionnelles exemplaires (*degré de confiance moyen*). Tenir compte de ces compromis peut permettre d'éviter une maladaptation (*degré de confiance moyen*). L'anticipation et l'évaluation des éventuels compromis et des lacunes sur le plan des connaissances aident à formuler des politiques fondées sur des données probantes afin de soupeser les coûts et les avantages des réponses spécifiques pour les différentes parties prenantes (*degré de confiance moyen*). La gestion efficace des compromis requiert souvent d'optimiser la participation des parties prenantes grâce à des dispositifs structurés de remontée d'information, surtout dans les modèles à assise communautaire, de recourir à des cadres novateurs, telles la facilitation du dialogue ou la cartographie spatialement explicite, et de mettre en place des mécanismes itératifs et adaptatifs de gestion qui permettent l'ajustement constant de la politique aux nouveaux éléments (*degré de confiance moyen*). {5.3.5, 6.4.2, 6.4.4, 6.4.5, 7.5.6 ; encadré thématique 13 du chapitre 7}

C.4 L'efficacité du processus décisionnel et de la gouvernance est renforcée quand les parties prenantes locales (notamment en intégrant ceux qui sont les plus vulnérables au changement climatique, comme les populations autochtones et locales, les femmes, les personnes démunies et marginalisées) participent au choix, à l'évaluation, à la mise en œuvre et au suivi des instruments de politiques visant l'atténuation et l'adaptation au changement climatique (*degré de confiance élevé*). L'intégration intersectorielle et à plusieurs échelles renforce les possibilités d'optimiser les co-bénéfices et de minimiser les compromis (*degré de confiance moyen*). {1.4, 3.1, 3.6, 3.7, 4.8, 4.9, 5.1.3, encadré 5.1, 7.4, 7.6}

C.4.1 Une mise en œuvre réussie de pratiques de gestion durable des terres exige la prise en compte des conditions environnementales et socio-économiques locales (*degré de confiance très élevé*). Une gestion durable des terres dans le contexte du changement climatique est généralement favorisée par la participation de toutes les parties prenantes pertinentes pour identifier les pressions et les impacts liés à l'usage des terres (comme le déclin de la biodiversité, la perte de sol, la surexploitation des eaux souterraines, la perte d'habitats, le changement d'usage des sols en agriculture, la production vivrière et forestière), comme pour prévenir et réduire la dégradation des terres, et restaurer les terres déjà dégradées (*degré de confiance moyen*). {1.4.1, 4.1.6, 4.8.7, 5.2.5, 7.2.4, 7.6.2, 7.6.4}

C.4.2 Une gestion durable des terres peut être appuyée par la mise en œuvre d'approches participatives inclusives pour la mesure, la vérification et la communication de la performance des instruments politiques (*degré de confiance moyen*). L'implication des parties prenantes dans le choix des indicateurs, la collecte de données climatiques, la modélisation de l'usage et l'évolution des terres et l'aménagement du territoire permet des médiations et facilite l'aménagement intégré des paysages et le choix de politiques (*degré de confiance moyen*). {3.7.5, 5.7.4, 7.4.1, 7.4.4, 7.5.3, 7.5.4, 7.5.5, 7.6.4, 7.6.6}

C.4.3 Les pratiques agricoles qui intègrent les savoirs autochtones et locaux peuvent contribuer à surmonter les défis croisés que posent le changement climatique, la sécurité alimentaire, la sauvegarde de la biodiversité, et la lutte contre la désertification et la dégradation des terres (*degré de confiance élevé*). Une action concertée de tout un éventail d'acteurs, comprenant les entreprises, les producteurs, les consommateurs, les responsables de la gestion des terres et les décideurs, en partenariat avec les populations autochtones et locales, peut mettre en place les conditions propices à l'adoption des options de réponse (*degré de confiance élevé*) {3.1.3, 3.6.1, 3.6.2, 4.8.2, 5.5.1, 5.6.4, 5.7.1, 5.7.4, 6.2, 7.3, 7.4.6, 7.6.4}

C.4.4 L'autonomisation des femmes peut apporter des synergies et des co-bénéfices sur le plan de la sécurité alimentaire des ménages et de la gestion durable des terres (*degré de confiance élevé*). Du fait de la vulnérabilité disproportionnée des femmes face aux impacts du changement climatique, leur inclusion dans la gestion des terres et le régime foncier est indispensable. Les politiques qui peuvent avoir des répercussions sur les droits fonciers et faciliter la participation des femmes à la gestion durable des terres incluent des dispositifs de transfert financier à leur profit dans les programmes de lutte contre la pauvreté, des investissement dans la santé, l'éducation, la formation et le renforcement des capacités pour les femmes, des prêts subventionnés et une diffusion de l'information sur ces programmes par le biais des organisations communautaires de femmes existantes (*degré de confiance moyen*). {1.4.1, 4.8.2, 5.1.3, encadré 5.1, encadré thématique 11 du chapitre 7}.

A. Trajectoires mettant en relation le développement socio-économique, les mesures d'atténuation et les terres émergées

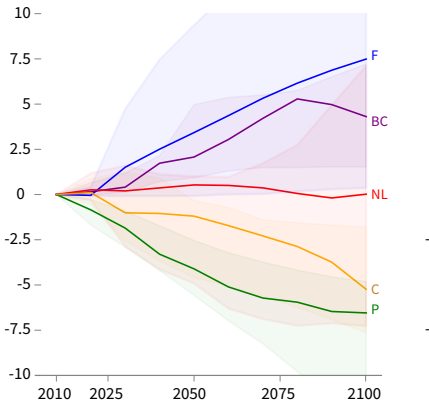
Le développement socio-économique et la gestion des terres ont une incidence sur l'évolution du système foncier, y compris sur la proportion relative de TERRES CULTIVEES, de PATURAGES, de TERRES AFFECTEES A LA BIOENERGIE, de FORETS et de TERRES NATURELLES. Les courbes indiquent la valeur médiane obtenue avec des modèles d'évaluation intégrée pour trois trajectoires d'évolution socio-économique (SSP1, SSP2 et SSP5 pour le scénario RCP1.9) ; les zones colorées correspondent à la plage des résultats des modèles. À noter que les trajectoires illustrent les effets de l'atténuation du changement climatique mais ne tiennent pas compte des effets induits par l'adaptation ni des impacts du changement climatique.

A. Priorité à la soutenabilité (SSP1)
La gestion durable des terres, l'intensification de l'agriculture et les modes de production et de consommation réduisent le besoin en terres agricoles, malgré la hausse de la consommation de nourriture par habitant. Ces terres peuvent être affectées au reboisement, au boisement et à la production de bioénergie.

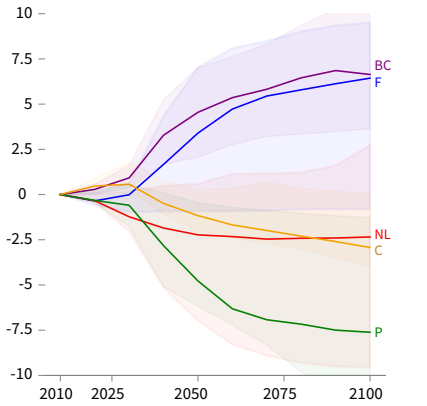
B. Trajectoire intermédiaire (SSP2)
L'évolution sociétale et les progrès technologiques suivent les tendances historiques. La demande en terres pour l'implantation de mesures d'atténuation comme par exemple la production de bioénergie, le ralentissement de la déforestation ou le boisement, conduit à une réduction des superficies de terres agricoles disponibles pour les cultures vivrières, fourragères et les fibres textiles.

C. Forte consommation de ressources (SSP5)
Les modes de production et de consommation très intensifs en ressources induisent des niveaux élevés d'émissions. L'atténuation est axée sur les solutions technologiques, dont un large recours à la bioénergie avec ou sans capture et stockage du dioxyde de carbone. L'intensification et la compétition entre les usages des terres contribuent à un déclin des superficies agricoles.

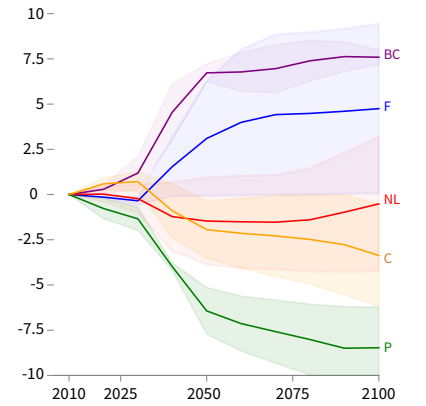
SSP1 Priorité à la soutenabilité
Évolution des superficies par rapport à 2010 (1 000 000 km²)



SSP2 Trajectoire intermédiaire
Évolution des superficies par rapport à 2010 (1 000 000 km²)



SSP5 Forte consommation de ressources
Évolution des superficies par rapport à 2010 (1 000 000 km²)



TERRES CULTIVEES PATURAGES TERRES AFFECTEES A LA BIOENERGIE FORETS TERRES NATURELLES

B. Évolution de l'usage des terres et de l'occupation des sols dans les trajectoires SSP

	Indicateurs quantitatifs pour les SSP	Nombre de modèles inclus*	Évolution des terres naturelles par rapport à 2010 (1 000 000 km²)	Évolution des terres affectées à la bioénergie par rapport à 2010 (1 000 000 km²)	Évolution des terres cultivées par rapport à 2010 (1 000 000 km²)	Évolution des forêts par rapport à 2010 (1 000 000 km²)	Évolution des pâturages par rapport à 2010 (1 000 000 km²)
SSP1	**RCP1.9** en 2050	5/5	0,5 (-4,9, 1)	2,1 (0,9, 5)	-1,2 (-4,6, -0,3)	3,4 (-0,1, 9,4)	-4,1 (-5,6, -2,5)
	↳ 2100		0 (-7,3, 7,1)	4,3 (1,5, 7,2)	-5,2 (-7,6, -1,8)	7,5 (0,4, 15,8)	-6,5 (-12,2, -4,8)
	RCP2.6 en 2050	5/5	-0,9 (-2,2, 1,5)	1,3 (0,4, 1,9)	-1 (-4,7, 1)	2,6 (-0,1, 8,4)	-3 (-4, -2,4)
	↳ 2100		0,2 (-3,5, 1,1)	5,1 (1,6, 6,3)	-3,2 (-7,7, -1,8)	6,6 (-0,1, 10,5)	-5,5 (-9,9, -4,2)
	RCP4.5 en 2050	5/5	0,5 (-1, 1,7)	0,8 (0,5, 1,3)	0,1 (-3,2, 1,5)	0,6 (-0,7, 4,2)	-2,4 (-3,3, -0,9)
	↳ 2100		1,8 (-1,7, 6)	1,9 (1,4, 3,7)	-2,3 (-6,4, -1,6)	3,9 (0,2, 8,8)	-4,6 (-7,3, -2,7)
	Niv. base en 2050	5/5	0,3 (-1,1, 1,8)	0,5 (0,2, 1,4)	0,2 (-1,6, 1,9)	-0,1 (-0,8, 1,1)	-1,5 (-2,9, -0,2)
	↳ 2100		3,3 (-0,3, 5,9)	1,8 (1,4, 2,4)	-1,5 (-5,7, -0,9)	0,9 (0,3, 3)	-2,1 (-7, 0)
SSP2	**RCP1.9** en 2050	4/5	-2,2 (-7, 0,6)	4,5 (2,1, 7)	-1,2 (-2, 0,3)	3,4 (-0,9, 7)	-4.8 (-6,2, -0,4)
	↳ 2100		-2,3 (-9,6, 2,7)	6,6 (3,6, 11)	-2,9 (-4, 0,1)	6,4 (-0,8, 9,5)	-7,6 (-11,7, -1,3)
	RCP2.6 en 2050	5/5	-3,2 (-4,2, 0,1)	2,2 (1,7, 4,7)	0,6 (-1.9, 1,9)	1,6 (-0,9, 4,2)	-1,4 (-3,7, 0,4)
	↳ 2100		-5,2 (-7,2, 0,5)	6,9 (2,3, 10,8)	-1,4 (-4, 0,8)	5,6 (-0,9, 5,9)	-7.2 (-8, 0,5)
	RCP4.5 en 2050	5/5	-2,2 (-2,2, 0,7)	1,5 (0,1, 2,1)	1,2 (-0.9, 2,7)	-0,9 (-2,5, 2,9)	-0,1 (-2,5, 1,6)
	↳ 2100		-3,4 (-4,7, 1,5)	4,1 (0,4, 6,3)	0,7 (-2.6, 3,1)	-0,5 (-3,1, 5,9)	-2,8 (-5,3, 1,9)
	Niv. base en 2050	5/5	-1,5 (-2,6, -0,2)	0,7 (0, 1,5)	1,3 (1, 2,7)	-1,3 (-2,5, -0,4)	-0.1 (-1.2, 1,6)
	↳ 2100		-2,1 (-5,9, 0,3)	1,2 (0,1, 2,4)	1,9 (0.8, 2,8)	-1,3 (-2,7, -0,2)	-0,2 (-1,9, 2,1)
SSP3	**RCP1.9** en 2050	Non réalisable dans tous les modèles évalués		-	-	-	-
	↳ 2100		-	-	-	-	-
	RCP2.6 en 2050	Non réalisable dans tous les modèles évalués		-	-	-	-
	↳ 2100		-	-	-	-	-
	RCP4.5 en 2050	3/3	-3,4 (-4,4, -2)	1,3 (1,3, 2)	2,3 (1,2, 3)	-2,4 (-4, -1)	2,1 (-0,1, 3,8)
	↳ 2100		-6,2 (-6,8, -5,4)	4,6 (1,5, 7,1)	3,4 (1,9, 4,5)	-3,1 (-5,5, -0,3)	2 (-2,5, 4,4)
	Niv. base en 2050	4/4	-3 (-4,6, -1,7)	1 (0,2, 1,5)	2,5 (1,5, 3)	-2,5 (-4, -1,5)	2,4 (0,6, 3,8)
	↳ 2100		-5 (-7,1, -4,2)	1,1 (0,9, 2,5)	5,1 (3,8, 6,1)	-5,3 (-6, -2,6)	3,4 (0,9, 6,4)
SSP4	**RCP1.9** en 2050	Non réalisable dans tous les modèles évalués**		-	-	-	-
	↳ 2100		-	-	-	-	-
	RCP2.6 en 2050	3/3	-4,5 (-6, -2,1)	3,3 (1,5, 4,5)	0,5 (-0,1, 0,9)	0,7 (-0,3, 2,2)	-0,6 (-0,7, 0,1)
	↳ 2100		-5,8 (-10,2, -4,7)	2,5 (2,3, 15,2)	-0,8 (-0,8, 1,8)	1,4 (-1,7, 4,1)	-1,2 (-2,5, -0,2)
	RCP4.5 en 2050	3/3	-2,7 (-4,4, -0,4)	1,7 (1, 1,9)	1,1 (-0,1, 1,7)	-1,8 (-2,3, 2,1)	0,8 (-0,5, 1,5)
	↳ 2100		-2,8 (-7,8, -2)	2,7 (2,3, 4,7)	1,1 (0,2, 1,2)	-0,7 (-2,6, 1)	1,4 (-1, 1,8)
	Niv. base en 2050	3/3	-2,8 (-2,9, -0,2)	1,1 (0,7, 2)	1,1 (0,7, 1,8)	-1,8 (-2,3, -1)	1,5 (-0,5, 2,1)
	↳ 2100		-2,4 (-5, -1)	1,7 (1,4, 2,6)	1,2 (1,2, 1,9)	-2,4 (-2,5, -2)	1,3 (-1, 4,4)
SSP5	**RCP1.9** en 2050	2/4	-1,5 (-3,9, 0,9)	6,7 (6,2, 7,2)	-1,9 (-3,5, -0,4)	3,1 (-0,1, 6,3)	-6,4 (-7,7, -5,1)
	↳ 2100		-0,5 (-4,2, 3,2)	7,6 (7,2, 8)	-3,4 (-6,2, -0,5)	4,7 (0,1, 9,4)	-8,5 (-10,7, -6,2)
	RCP2.6 en 2050	4/4	-3,4 (-6,9, 0,3)	4,8 (3,8, 5,1)	-2,1 (-4, 1)	3,9 (-0,1, 6,7)	-4,4 (-5, 0,2)
	↳ 2100		-4,3 (-8,4, 0,5)	9,1 (7,7, 9,2)	-3,3 (-6,5, -0,5)	3,9 (-0,1, 9,3)	-6,3 (-9,1, -1,4)
	RCP4.5 en 2050	4/4	-2,5 (-3,7, 0,2)	1,7 (0,6, 2,9)	0,6 (-3,3, 1,9)	-0,1 (-1,7, 6)	-1,2 (-2,6, 2,3)
	↳ 2100		-4,1 (-4,6, 0,7)	4,8 (2, 8)	-1 (-5,5, 1)	-0,2 (-1,4, 9,1)	-3 (-5,2, 2,1)
	Niv. base en 2050	4/4	-0,6 (-3,8, 0,4)	0,8 (0, 2,1)	1,5 (-0,7, 3,3)	-1,9 (-3,4, 0,5)	-0,1 (-1,5, 2,9)
	↳ 2100		-0,2 (-2,4, 1,8)	1 (0,2, 2,3)	1 (-2, 2,5)	-2,1 (-3,4, 1,1)	-0,4 (-2,4, 2,8)

** Nombre de modèles inclus / Nombre de modèles explorés. Un modèle, qui ne fournissait pas de données sur les terres, est exclu de toutes les entrées.*

*** Un modèle pouvait atteindre le scénario RCP1.9 avec la trajectoire SSP4, sans toutefois fournir de données sur les terres.*

Figure RID.4 Trajectoires mettant en relation le développement socio-économique, les mesures d'atténuation et les terres émergées | Les scénarios futurs offrent un cadre pour comprendre les implications de différentes stratégies d'atténuation et de conditions socio-économiques sur les terres émergées. Les trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSPs) couvrent une palette d'hypothèses très différentes (encadré RID.1). Elles sont conjuguées aux trajectoires représentatives de concentration (RCP)[36], qui sous-tendent différents niveaux d'atténuation. La figure montre l'évolution des superficies de terres cultivées, de pâturages, de terres affectées à la bioénergie, de forêts et d'espaces naturels par rapport à 2010. Les terres cultivées comprennent ici toutes les superficies affectées à l'alimentation humaine et animale, ainsi que d'autres terres arables (terrains cultivés) ; elles englobent la première génération de cultures bioénergétiques non forestières (maïs et canne à sucre pour l'éthanol, soja pour le biodiésel, etc.), mais excluent la deuxième génération. Le terme pâturage inclut ici toutes les catégories de la définition de la FAO des « prairies et pâturages permanents », et pas uniquement les pâturages extensifs de grande qualité. Les terres affectées à la bioénergie comprennent les superficies occupées par la deuxième génération de cultures énergétiques (par exemple des herbacées vivaces comme le panic érigé et le miscanthus, les essences ligneuses à croissance rapide). Sont incluses dans les forêts les superficies gérées et non gérées. Les espaces naturels comprennent les autres types d'herbages, les savanes et les zones arbustives. **Partie A :** Résultats simulés par les modèles d'évaluation intégrée[37] (IAMs) pour les trajectoires SSP1, SSP2 et SSP5 dans les conditions d'émission du scénario RCP1.9[38]. Pour chaque trajectoire, les zones colorées indiquent la plage des résultats de tous les modèles IAMs ; la courbe illustre la valeur médiane. Pour le scénario RCP1.9, les trajectoires SSP1, SSP2 et SSP5 incluent respectivement les résultats de cinq, quatre et deux IAMs. **Partie B :** L'évolution de l'usage et de l'occupation des terres est représentée pour diverses combinaisons de SSP et RCP, et montre la médiane multi-modèle et leur gamme de variation (min., max.). {Encadré RID.1, 1.3.2, encadré thématique 1 du chapitre 1, 2.7.2, encadré thématique 9 du chapitre 6, 6.1, 6.4.4, 7.4.2, 7.4.4, 7.4.5, 7.4.6, 7.4.7, 7.4.8, 7.5.3, 7.5.6 ; encadré thématique 9 du chapitre 6}

[36] Les scénarios RCP comprennent des séries temporelles d'émissions et de concentrations de l'ensemble des gaz à effet de serre, aérosols et gaz chimiquement actifs, et celles concernant l'évolution de l'utilisation des terres et de la couverture des sols.

[37] Un modèle d'évaluation intégrée réunit dans un même cadre des connaissances issues de deux domaines ou plus. Dans la figure, ce type de modèle sert à évaluer les liens entre le développement économique, social et technologique et l'évolution du système climatique.

[38] Les trajectoires RCP1.9 évaluées dans le rapport ont 66 % de chance de limiter le réchauffement à 1,5 °C en 2100, mais certaines comportent un dépassement temporaire (>0,1 °C) pendant le XXIe siècle.

D. L'action à court terme

D.1 Des actions peuvent être prises à court terme, sur la base des connaissances actuelles, pour lutter contre la désertification et la dégradation des terres et améliorer la sécurité alimentaire, tout en favorisant des interventions à plus long terme qui permettent l'adaptation au changement climatique et l'atténuation. Ceci inclut des actions pour renforcer les capacités individuelles et institutionnelles, accélérer le transfert de connaissances, renforcer le transfert et le déploiement de technologies, favoriser des mécanismes financiers, mettre en place des systèmes d'alerte précoce, procéder à la gestion des risques et remédier aux lacunes sur le plan de la mise en œuvre et de la transposition à plus grande échelle (*degré de confiance élevé*). {3.6.1, 3.6.2, 3.7.2, 4.8, 5.3.3, 5.5, 5.6.4, 5.7, 6.2, 6.4, 7.3, 7.4.9, 7.6 ; encadré thématique 10 du chapitre 7}

D.1.1 Le renforcement à court terme de capacités, de transfert et de déploiement de technologies, et la facilitation de mécanismes financiers peuvent renforcer l'adaptation et l'atténuation dans le secteur des terres. Le transfert de connaissances et de technologies peut aider à renforcer l'utilisation durable des ressources naturelles pour la sécurité alimentaire dans le contexte du changement climatique (*degré de confiance moyen*). La sensibilisation, le renforcement de capacités et l'éducation et la formation aux pratiques de gestion durable des terres, les services de conseil et de vulgarisation dans le domaine agricole, et l'élargissement de l'accès aux services agricoles pour les producteurs et les utilisateurs des terres, peuvent être efficaces pour combattre la dégradation des terres (*degré de confiance moyen*). {3.1, 5.7.4, 7.2, 7.3.4, 7.5.4}

D.1.2 La mesure et le suivi des changements d'usage des terres, y compris la dégradation des terres et la désertification, s'appuient sur une utilisation élargie des nouvelles technologies d'information et de communication (applications de téléphonie mobile, services virtuels, capteurs au sol, imageries par drone, etc.), l'utilisation de services climatiques, et les informations climatiques et foncières concernant les ressources terrestres issues de la télédétection (*degré de confiance moyen*). Les systèmes d'alerte précoce en cas de phénomènes météorologiques ou climatiques extrêmes jouent un rôle essentiel pour protéger les personnes et les biens et pour améliorer la gestion et la réduction des risques de catastrophe (*degré de confiance élevé*). Les prévisions saisonnières et les systèmes d'alerte précoce sont essentiels pour la sécurité alimentaire (famine) et pour le suivi de la biodiversité, y compris les ravageurs et les maladies, ainsi que pour la gestion adaptative des risques climatiques (*degré de confiance élevé*). Il est très rentable d'investir dans les capacités humaines et institutionnelles. Ces investissements comprennent l'accès aux systèmes d'observation et d'alerte précoce ainsi qu'aux autres services issus des systèmes d'observation hydrométéorologique *in situ* et par télédétection, des observations de terrain, des inventaires et des enquêtes, et une utilisation étendue des technologies numériques (*degré de confiance élevé*). {1.2, 3.6.2, 4.2.2, 4.2.4, 5.3.1, 5.3.6, 6.4, 7.3.4, 7.4.3, 7.5.4, 7.5.5, 7.6.4 ; encadré thématique 5 du chapitre 3}

D.1.3 Aborder la gestion des terres sous l'angle de la gestion des risques spécifiques peut jouer un rôle important dans l'adaptation par des approches à l'échelle du paysage, par le contrôle biologique des épidémies de ravageurs et de maladies et par l'amélioration des mécanismes de partage et de transfert des risques (*degré de confiance élevé*). Mettre à disposition les informations sur les risques liés au climat peut renforcer les compétences des gestionnaires des terres et permettre la prise de décisions au moment opportun (*degré de confiance élevé*). {5.3.2, 5.3.5, 5.6.2, 5.6.3 ; encadré thématique 6 du chapitre 5 ; 5.6.5, 5.7.1, 5.7.2, 7.2.4}

D.1.4 La gestion durable des terres peut être améliorée en augmentant la disponibilité et l'accessibilité des données et informations relatives à l'efficacité, aux co-bénéfices et aux risques associés aux nouvelles options de réponse, et en augmentant l'efficacité de l'utilisation des terres (*degré de confiance élevé*). Certaines options de réponse (par exemple, une meilleure gestion du carbone du sol) n'ont été mises en œuvre qu'à petite échelle sur des installations de démonstration et il reste de nombreuses lacunes et défis en ce qui concerne les connaissances, le financement et les institutions permettant une mise en oeuvre à plus grande échelle et le déploiement généralisé de ces options (*degré de confiance moyen*). {4.8, 5.5.1, 5.5.2, 5.6.1, 5.6.5, 5.7.5, 6.2, 6.4,}

D.2 Les actions à court terme permettant d'agir en matière d'adaptation au changement climatique et d'atténuation, de lutte contre la désertification et la dégradation des terres, et d'amélioration de la sécurité alimentaire peuvent générer des co-bénéfices sociaux, écologiques, économiques et en matière de développement (*degré de confiance élevé*). Ces co-bénéfices peuvent contribuer à l'éradication de la pauvreté et à une plus grande résilience des moyens de subsistance pour les populations vulnérables (*degré de confiance élevé*). {3.4.2, 5.7, 7.5}

D.2.1 Les mesures à court terme pour promouvoir la gestion durable des terres aideront à diminuer les vulnérabilités liées aux terres et à l'alimentation, et permettront de créer des moyens de subsistance plus résilients, et aussi de réduire la dégradation des terres, la désertification, et la perte de biodiversité (*degré de confiance élevé*). Des synergies existent entre la gestion durable des terres, les efforts d'éradication de la pauvreté, l'accès aux marchés, les mécanismes non marchands et l'élimination des pratiques peu productives. Maximiser ces synergies peut aboutir à des co-bénéfices d'adaptation, d'atténuation et de développement en préservant les fonctions et les services des écosystèmes (*degré de confiance moyen*). {3.4.2, 3.6.3, tableau 4.2, 4.7, 4.9, 4.10, 5.6, 5.7, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 ; encadré thématique 12 du chapitre 7}

D.2.2 Les investissements dans la restauration des terres peuvent entraîner des avantages à l'échelle mondiale et, dans les zones arides, peuvent avoir un ratio bénéfice-coût de trois à six pour ce qui est de la valeur économique estimée des services écosystémiques restaurés (*degré de confiance moyen*). La plupart des pratiques et technologies de gestion durable des terres sont rentables au

bout de trois à dix ans (*degré de confiance moyen*). Bien qu'elles puissent nécessiter des investissements initiaux, les actions visant à assurer la gestion durable des terres peuvent améliorer le rendement des cultures et la valeur économique des pâturages. Les mesures de restauration et de remise en état des terres améliorent les systèmes de subsistance et procurent à la fois des rendements économiques positifs à court terme et des bénéfices à plus long terme en matière d'adaptation et d'atténuation, de biodiversité et des fonctions et services écosystémiques renforcés (*degré de confiance élevé*). {3.6.1, 3.6.3, 4.8.1, 7.2.4, 7.2.3, 7.3.1, 7.4.6, encadré thématique 10 du chapitre 7}

D.2.3 Les investissements initiaux dans les pratiques et les technologies de gestion durable des terres peuvent varier de de 20 à 5 000 dollars américains par hectare, la médiane se situant aux alentours de 500 dollars américains par hectare. Le soutien des gouvernements et l'amélioration de l'accès au crédit peuvent aider à surmonter les obstacles à leur adoption, notamment ceux auxquels sont confrontés les petits exploitants pauvres (*degré de confiance élevé*). Des changements à court terme vers des habitudes alimentaires équilibrées (voir B6.2) peuvent réduire les pressions exercées sur les terres et procurer des avantages importants pour la santé en améliorant la nutrition (*degré de confiance moyen*). {3.6.3, 4.8, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 6.4, 7.4.7, 7.5.5 ; encadré thématique 9 du chapitre 6}

D.3 Des réductions rapides des émissions anthropiques de GES dans tous les secteurs suivant des trajectoires d'atténuation ambitieuses réduisent les impacts négatifs du changement climatique sur les écosystèmes terrestres et sur les systèmes alimentaires (*degré de confiance moyen*). Retarder le déploiement des options d'atténuation et d'adaptation dans l'ensemble des secteurs conduit à des impacts de plus en plus négatifs sur les terres et réduit les perspectives de développement durable (*degré de confiance moyen*). {Encadré RID.1, figure RID.2, 2.5, 2.7, 5.2, 6.2, 6.4, 7.2, 7.3.1, 7.4.7, 7.4.8, 7.5.6 ; encadré thématique 9 du chapitre 6, encadré thématique 10 du chapitre 7}

D.3.1 Les retards dans la mise en place de mesures dans tous secteurs accroît la nécessité de déployer à grande échelle des options d'adaptation et d'atténuation, et peut entraîner une diminution du potentiel offert par l'éventail de ces options dans la plupart des régions du monde et limiter leur efficacité actuelle et future (*degré de confiance élevé*). Agir sans tarder permettrait au contraire d'éviter ou de réduire les risques ou les pertes et de générer des avantages pour les sociétés (*degré de confiance moyen*). Une action rapide pour l'atténuation et l'adaptation, harmonisée avec une gestion durable des terres et avec les objectifs de développement durable pourrait, selon la région, réduire les risques que représentent pour des millions de personnes les extrêmes climatiques, la désertification, la dégradation des terres, l'insécurité alimentaire et l'insécurité des moyens de subsistance (*degré de confiance élevé*). {1.3.5, 3.4.2, 3.5.2, 4.1.6, 4.7.1, 4.7.2, 5.2.3, 5.3.1, 6.3, 6.5, 7.3.1}

D.3.2 Dans les scénarios d'évolution future, le report des réductions d'émission de GES implique des compromis qui entraînent des coûts et des risques significativement plus élevés au fur et à mesure que le niveau de réchauffement augmente (*degré de confiance moyen*). Le potentiel offert par certaines options de réponse, telle l'augmentation de la teneur en carbone organique des sols, diminue à mesure que s'intensifie le changement climatique, les sols étant moins capables d'agir comme des puits pour la séquestration du carbone quand la température est plus élevée (*degré de confiance élevé*). Tout retard dans l'évitement ou la réduction de la dégradation des terres et dans la promotion de la restauration des écosystèmes risque d'avoir des impacts à long terme, y compris un déclin rapide de la productivité de l'agriculture et des pâturages, la dégradation du pergélisol et des difficultés à réhumidifier les tourbières (*degré de confiance moyen*). {1.3.1, 3.6.2, 4.8, 4.9, 4.9.1, 5.5.2, 6.3, 6.4, 7.2, 7.3 ; encadré thématique 10 du chapitre 7}

D.3.3 Le report des réductions d'émissions de GES dans tous les secteurs implique des compromis, y compris la perte irréversible de fonctions et de services des écosystèmes terrestres essentiels pour l'alimentation, la santé, l'habitabilité des lieux de vie et la production, entraînant des impacts économiques de plus en plus importants dans un grand nombre de pays situés dans de nombreuses régions du monde (*degré de confiance élevé*). Retarder l'action, comme le supposent les scénarios d'émissions élevées, pourrait conduire à des impacts irréversibles sur certains écosystèmes, ce qui, à plus long terme, pourrait entraîner des émissions supplémentaires considérables de GES par ces écosystèmes, accélérant ainsi le réchauffement planétaire (*degré de confiance moyen*). {1.3.1, 2.5.3, 2.7, 3.6.2, 4.9, 4.10.1, 5.4.2.4, 6.3, 6.4, 7.2, 7.3 ; encadré thématique 9 du chapitre 6, encadré thématique 10 du chapitre 7}

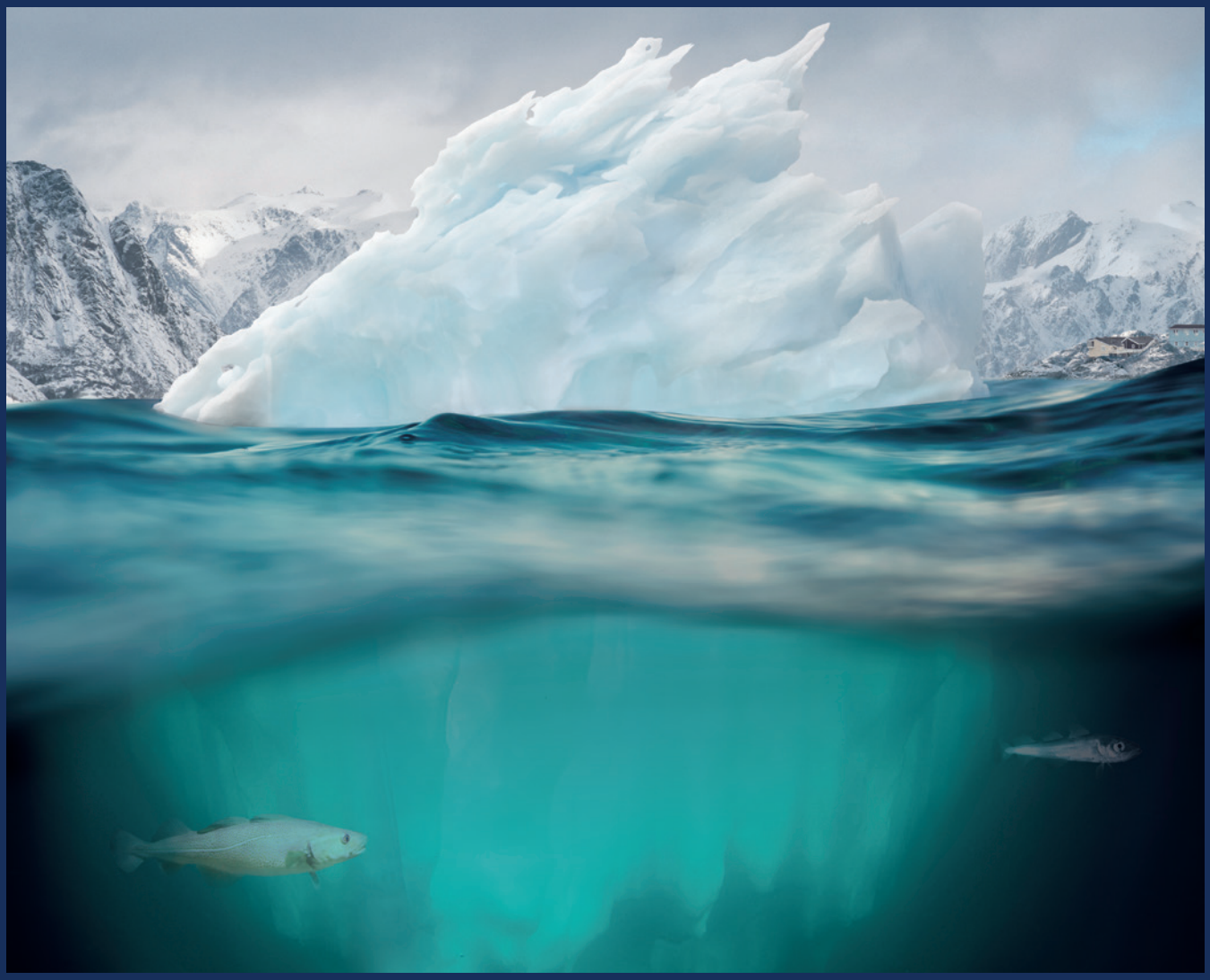
giec

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR l'évolution du climat

L'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique

Rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Résumé à l'intention des décideurs



GT I GT II

OMM PNUE

L'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique

Rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Résumé à l'intention des décideurs

Publié sous la direction de

Hans-Otto Pörtner
Coprésident du Groupe de travail II du GIEC

Debra C. Roberts
Coprésidente du Groupe de travail II du GIEC

Valérie Masson-Delmotte
Coprésidente du Groupe de travail I du GIEC

Panmao Zhai
Coprésident du Groupe de travail I du GIEC

Melinda Tignor
Cheffe de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail II du GIEC

Elvira Poloczanska
Conseillère scientifique auprès des coprésidents et de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail II

Katja Mintenbeck
Directrice scientifique

Andrés Alegría
Graphiste

Maike Nicolai
Chargée de communication

Andrew Okem
Administrateur scientifique

Jan Petzold
Administrateur scientifique

Bardhyl Rama
Directeur des opérations

Nora M. Weyer
Administratrice scientifique

Unité d'appui technique du Groupe de travail II

Première et quatrième de couverture : illustrations et mise en page de Stefanie Langsdorf

© 2019 Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Imprimé en juin 2020 par le GIEC, Suisse. Il est possible de se procurer des exemplaires électroniques du présent Résumé à l'intention des décideurs sur le site Web du GIEC (www.ipcc.ch).

ISBN 978-92-9169-255-2

Résumé à l'intention des décideurs

RID

Résumé à l'intention des décideurs

Rédaction :

Nerilie Abram (Australie), Carolina Adler (Suisse/Australie), Nathaniel L. Bindoff (Australie), Lijing Cheng (Chine), So-Min Cheong (République de Corée), William W. L. Cheung (Canada), Matthew Collins (Royaume-Uni), Chris Derksen (Canada), Alexey Ekaykin (Fédération de Russie), Thomas Frölicher (Suisse), Matthias Garschagen (Allemagne), Jean-Pierre Gattuso (France), Bruce Glavovic (Nouvelle-Zélande), Stephan Gruber (Canada/Allemagne), Valeria Guinder (Argentine), Robert Hallberg (États-Unis d'Amérique), Sherilee Harper (Canada), Nathalie Hilmi (Monaco/France), Jochen Hinkel (Allemagne), Yukiko Hirabayashi (Japon), Regine Hock (États-Unis d'Amérique), Anne Hollowed (États-Unis d'Amérique), Helene Jacot Des Combes (Fidji), James Kairo (Kenya), Alexandre K. Magnan (France), Valérie Masson-Delmotte (France), J.B. Robin Matthews (Royaume-Uni), Kathleen McInnes (Australie), Michael Meredith (Royaume-Uni), Katja Mintenbeck (Allemagne), Samuel Morin (France), Andrew Okem (Afrique du Sud/Nigéria), Michael Oppenheimer (États-Unis d'Amérique), Ben Orlove (États-Unis d'Amérique), Jan Petzold (Allemagne), Anna Pirani (Italie), Elvira Poloczanska (Royaume-Uni/Australie), Hans-Otto Pörtner (Allemagne), Anjal Prakash (Népal/Inde), Golam Rasul (Népal), Evelia Rivera-Arriaga (Mexique), Debra C. Roberts (Afrique du Sud), Edward A.G. Schuur (États-Unis d'Amérique), Zita Sebesvari (Hongrie/Allemagne), Martin Sommerkorn (Norvège/Allemagne), Michael Sutherland (Trinité-et-Tobago), Alessandro Tagliabue (Royaume-Uni), Roderik Van De Wal (Pays-Bas), Phil Williamson (Royaume-Uni), Rong Yu (Chine), Panmao Zhai (Chine)

Collaboration à la rédaction :

Andrés Alegria (Honduras), Robert M. DeConto (États-Unis d'Amérique), Andreas Fischlin (Suisse), Shengping He (Norvège/Chine), Miriam Jackson (Norvège), Martin Künsting (Allemagne), Erwin Lambert (Pays-Bas), Pierre-Marie Lefeuvre (Norvège/France), Alexander Milner (Royaume-Uni), Jess Melbourne-Thomas (Australie), Benoit Meyssignac (France), Maike Nicolai (Allemagne), Hamish Pritchard (Royaume-Uni), Heidi Steltzer (États-Unis d'Amérique), Nora M. Weyer (Allemagne)

Résumé à référencer comme suit :

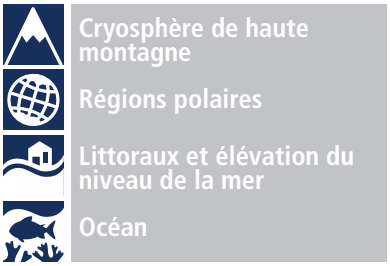
GIEC, 2019 : Résumé à l'intention des décideurs, *Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique* [sous la direction de H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer], sous presse.

Introduction

Le Rapport spécial sur l'océan et la cryosphère[1] dans le contexte du changement climatique fait suite à la décision prise en 2016 par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) de publier trois rapports spéciaux dans le cadre de son sixième cycle d'évaluation[2]. En évaluant les publications scientifiques récentes[3], ce rapport[4] répond aux propositions thématiques issues des gouvernements et des observateurs. Ce rapport fait suite à deux autres rapports spéciaux du GIEC, l'un sur le réchauffement planétaire de 1,5 °C, l'autre sur le changement climatique et les terres émergées[5], et au rapport sur l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques produit par la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES).

Ce Résumé à l'intention des décideurs (RID) synthétise les principales conclusions du rapport, et est organisé en trois parties : les observations des changements et impacts (RID.A), les projections de changements et risques futurs (RID.B) et la mise en œuvre des réponses aux changements dans l'océan et la cryosphère (RID.C). Pour en faciliter la lecture, des pictogrammes indiquent où trouver chaque type de contenu. Le degré de confiance attaché aux différentes conclusions est précisé à l'aide du langage calibré du GIEC[6] et les éléments scientifiques sous-jacents à chaque conclusion se trouvent dans les sections du rapport indiquées en référence.

Signification des pictogrammes



1 La cryosphère, telle que définie dans le présent rapport (Voir Annexe I : Glossaire), représente les composantes du système Terre à l'état gelé, situées sur et sous la surface des terres émergées et à la surface de l'océan : manteau neigeux, glaciers, calottes glaciaires, plates-formes de glace, icebergs, glace de mer (banquise), glace de lac et de rivière, pergélisol, sol gelé saisonnier, etc.

2 Décision prise lors de la 43e session plénière du GIEC tenue à Nairobi, Kenya, du 11 au 13 avril 2016.

3 Dates limites de publication : 15 octobre 2018 pour la soumission de manuscrits, 15 mai 2019 pour l'acceptation de publication.

4 Ce rapport est produit sous la direction scientifique du Groupe de travail I et du Groupe de travail II. Conformément à la structure approuvée de ce rapport, l'évaluation ne porte pas sur les options d'atténuation (Groupe de travail III), à l'exception du potentiel d'atténuation associé au carbone bleu (écosystèmes côtiers).

5 Les titres complets de ces rapports sont : *Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté ; Changement climatique et terres émergées, Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres*.

6 Chaque conclusion se fonde sur une évaluation des éléments probants et de la concordance s'y rapportant. Cinq qualificatifs sont utilisés pour exprimer le *degré de confiance : très faible, faible, moyen, élevé et très élevé ; le degré de confiance est indiqué en italique : par exemple degré de confiance moyen. Les qualificatifs ci-après ont été utilisés pour indiquer la probabilité évaluée d'un résultat : quasiment certain (probabilité de 99 à 100 %), très probable (90 à 100 %), probable (66 à 100 %), à peu près aussi probable qu'improbable (33 à 66 %), improbable (0 à 33 %), très improbable (0 à 10 %), exceptionnellement improbable (0 à 1 %). La probabilité évaluée est indiquée en italique : par exemple très probable. Cela est conforme au cinquième Rapport d'évaluation (AR5) et aux autres rapports spéciaux du Sixième Cycle d'Evaluation (AR6). D'autres qualificatifs peuvent également être utilisés le cas échéant : extrêmement probable (95 à 100 %), plus probable qu'improbable (> 50 à 100 %), plus improbable que probable (0 à < 50 %) et extrêmement improbable (0 à 5 %). Enfin, ce Rapport utilise également les expressions « fourchette probable » et « fourchette très probable » qui signifient que la probabilité évaluée d'un résultat se situe dans la fourchette de 17 à 83 % ou de 5 à 95 %. {1.9.2, figure 1.4}*

Préambule | L'importance de l'océan et de la cryosphère pour les populations humaines

Tous les êtres humains dépendent, directement ou indirectement, de l'océan et de la cryosphère. L'océan couvre 71 % de la surface de la Terre et contient environ 97 % de l'eau de la planète. La cryosphère désigne les parties gelées du système Terre[1]. Les glaciers et les calottes glaciaires recouvrent 10 % environ des terres émergées. L'océan et la cryosphère abritent des habitats uniques et sont interconnectés au reste du système climatique par des échanges d'eau, d'énergie et de carbone à l'échelle planétaire. Les projections des réactions de l'océan et de la cryosphère aux émissions passées et présentes de gaz à effet de serre d'origine anthropique et au réchauffement planétaire en cours incluent des rétroactions climatiques, des changements inéluctables à l'échelle de dizaines à milliers d'années, des seuils de changement abrupt et un caractère irréversible. {Encadré 1.1, 1.2}

Les communautés qui entretiennent des rapports étroits avec les milieux côtiers, les petites îles (dont les petits États insulaires en développement), les régions polaires et les zones de haute montagne[7] sont particulièrement exposées aux changements de l'océan et de la cryosphère tels que l'élévation du niveau de la mer, les niveaux marins extrêmes et le recul de la cryosphère. D'autres communautés, établies plus loin du littoral, sont, elles aussi, exposées aux conséquences des changements de l'océan, par exemple lors des phénomènes météorologiques extrêmes. À l'heure actuelle, 4 millions de personnes environ résident en permanence dans l'Arctique, dont 10 % font partie de peuples autochtones. Les littoraux de basse altitude[8] abritent quelque 680 millions de personnes (près de 10 % de la population mondiale en 2010), et devraient en accueillir plus d'un milliard en 2050. Les petits États insulaires en développement comptent à eux seuls 65 millions d'habitants. Environ 670 millions de personnes (près de 10 % de la population mondiale en 2010), incluant des peuples autochtones, vivent dans les régions de haute montagne de tous les continents, hors Antarctique. Ces populations des régions de haute montagne devraient atteindre 740 à 840 millions de personnes en 2050 (soit environ 8,4 à 8,7 % de la population mondiale projetée). {1.1, 2.1, 3.1, encadré thématique 9, figure 2.1}

Outre leurs fonctions dans le système climatique, dont l'absorption et la redistribution de la chaleur et du dioxyde de carbone (CO_2) d'origine naturelle et anthropique, et leur fonction de support aux écosystèmes, l'océan et/ou la cryosphère procurent aux populations humaines des services tels que l'approvisionnement en nourriture et en eau, des sources d'énergie renouvelable, des effets bénéfiques pour la santé et le bien-être, contribuent aux valeurs culturelles, au tourisme, au commerce et aux transports. L'état de l'océan et de la cryosphère interagit avec chaque aspect de la soutenabilité sous-tendu par les objectifs de développement durable des Nations Unies. {1.1, 1.2, 1.5}

---

7 Sont incluses dans les zones de haute montagne toutes les régions montagneuses dans lesquelles les glaciers, la neige ou le pergélisol constituent des caractéristiques importantes du paysage. Pour une liste des régions de haute montagne abordées dans ce rapport, voir le chapitre 2. La population présente dans ces zones est calculée sur les territoires situés à moins de 100 kilomètres d'un glacier ou d'une zone de pergélisol. {2.1} Les projections à l'horizon 2050 indiquent l'éventail d'évolution de la population dans ces régions pour les cinq trajectoires communes d'évolution socio-économique. {Encadré thématique 1 du chapitre 1}

8 La population des littoraux de basse altitude comprend les personnes qui habitent les zones côtières qui s'élèvent à moins de dix mètres au-dessus du niveau de la mer, incluant les petits États insulaires, {Encadré thématique 9}. Les projections à l'horizon 2050 indiquent l'éventail d'évolution de la population de ces régions estimée pour les cinq trajectoires socio-économiques communes. {Encadré thématique 1 du chapitre 1}.

RID.A Changements et Impacts Observés

Changements observés dans les paramètres physiques

A.1 Le réchauffement planétaire a provoqué ces dernières décennies un recul généralisé de la cryosphère : perte de masse des calottes glaciaires et des glaciers (*degré de confiance très élevé*), réduction du manteau neigeux (*degré de confiance élevé*), réduction de l'étendue et de l'épaisseur de la banquise arctique (*degré de confiance très élevé*), et élévation de la température du pergélisol (*degré de confiance très élevé*). {2.2, 3.2, 3.3, 3.4, figures RID.1, RID.2}

A.1.1 La masse des calottes glaciaires et des glaciers a diminué dans le monde entier (*degré de confiance très élevé*). Entre 2006 et 2015, la calotte glaciaire du Groenland[9] a perdu 278 ± 11 Gt de masse par an en moyenne (ce qui correspond à une élévation du niveau de la mer de 0,77 ± 0,03 mm.an^{-1} à l'échelle du globe)[10], essentiellement sous l'effet de la fonte en surface (*degré de confiance élevé*). Au cours de la période 2006–2015, la perte moyenne de masse de la calotte glaciaire de l'Antarctique s'est établie à 155 ± 19 Gt.an^{-1} (0,43 ± 0,05 mm.an^{-1}), causée surtout par l'amincissement et le recul rapides des grands glaciers émissaires qui drainent la calotte de l'Antarctique de l'Ouest (*degré de confiance très élevé*). Entre 2006 et 2015, les glaciers situés ailleurs qu'au Groenland et en Antarctique ont perdu de la masse à un rythme moyen de 220 ± 30 Gt.an^{-1} (ce qui correspond à une élévation du niveau de la mer de 0,61 ± 0,08 mm.an^{-1}). {3.3.1, 4.2.3, Annexe 2.A, figure RID.1}

A.1.2 Dans l'Arctique, l'étendue du manteau neigeux terrestre du mois de juin a diminué de 13,4 ± 5.4 % par décennie entre 1967 et 2018, soit une perte totale d'environ 2,5 millions de kilomètres carrés, en raison principalement de la hausse de la température de surface de l'air (*degré de confiance élevé*). Ces dernières décennies, l'épaisseur, l'étendue et la durée de présence du manteau neigeux ont diminué dans presque toutes les zones de haute montagne, notamment à basse altitude (*degré de confiance élevé*). {2.2.2, 3.4.1, figure RID.1}

A.1.3 Les températures du pergélisol ont augmenté et atteint des niveaux record depuis les années 1980 (*degré de confiance très élevé*), dont notamment la hausse récente de 0,29 °C ± 0,12 °C entre 2007 et 2016 (moyenne mondiale sur les régions polaires et les zones de haute montagne). Dans l'Arctique et les régions boréales, le pergélisol contient 1 460 à 1 600 Gt de carbone organique, soit près du double du carbone de l'atmosphère (*degré de confiance moyen*). Il y a des *éléments probants moyens* et un *degré de cohérence faible* autour du fait que le dégel du pergélisol conduit à un flux net supplémentaire de méthane et de CO_2 depuis les régions arctiques. La fonte du pergélisol et le recul des glaciers ont diminué la stabilité des versants de haute montagne (*degré de confiance élevé*). {2.2.4, 2.3.2, 3.4.1, 3.4.3, figure RID.1}

A.1.4 Il est *très probable* qu'entre 1979 et 2018, l'étendue de la glace de mer de l'Arctique a diminué, et ce pour tous les mois de l'année. Il est *très probable* que les réductions au mois de septembre ont atteint 12,8 ± 2,3 % par décennie. Il est *probable* que de telles modifications de l'étendue de la glace de mer en septembre sont sans précédent depuis mille ans au moins. La glace de mer de l'Arctique a perdu de l'épaisseur, avec une transition concomitante vers une glace plus jeune : en superficie, la proportion de glace pluriannuelle d'au moins cinq ans a chuté d'à peu près 90 % au cours de la période 1979–2018 (*degré de confiance très élevé*). Les rétroactions induites par la diminution de l'extension estivale de la glace de mer et du manteau neigeux terrestre de printemps ont contribué à amplifier le réchauffement dans l'Arctique (*degré de confiance élevé*) où la température de l'air en surface a *probablement* augmenté ces deux dernières décennies de plus du double par rapport à la moyenne planétaire. Les changements de glace de mer de l'Arctique peuvent affecter les conditions météorologiques aux latitudes moyennes (*degré de confiance moyen*), mais il y a un *degré de confiance faible* quant à la détection d'une telle incidence sur des types de temps spécifiques. La glace de mer de l'Antarctique ne présente aucune tendance statistiquement significative (1979–2018) en raison de signaux régionaux contrastés et de la forte variabilité interannuelle (*degré de confiance élevé*). {3.2.1, 6.3.1 ; encadré 3.1 ; encadré 3.2 ; A1.2, figures RID.1, RID.2}

---

9 Glaciers périphériques inclus.

10 Un volume de 360 Gt de glace correspond à une élévation du niveau moyen global de la mer de 1 mm.

Changements passés et futurs de l'océan et la cryosphère

Indicateurs clés, changements historiques (observés et simulés) et projections selon les scénarios RCP2.6 et RCP8.5

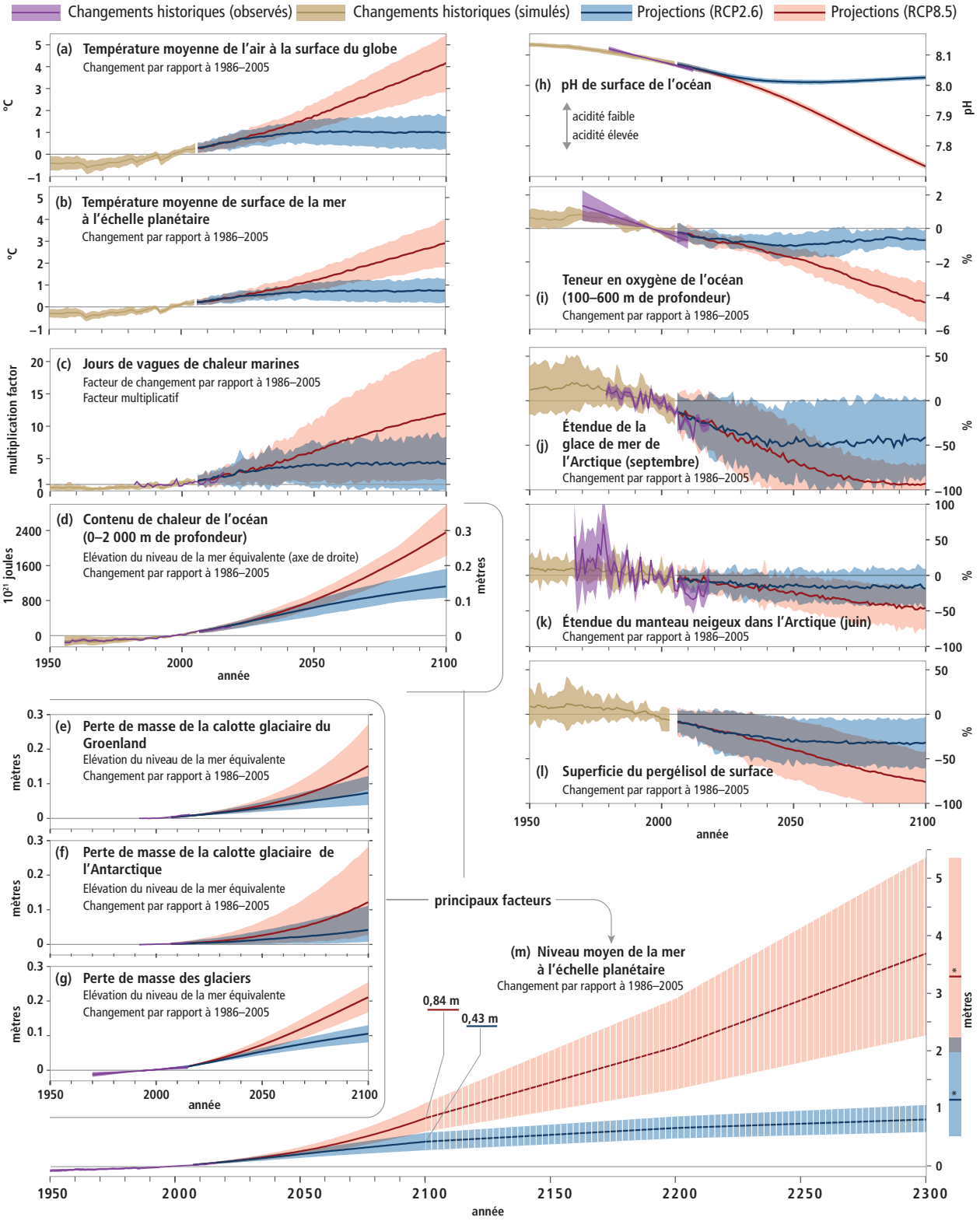


Figure RID.1 | Changements historiques observés et modélisés de l'océan et de la cryosphère depuis 1950[11] et changements futurs projetés selon les scénarios d'émissions faibles (RCP2.6) et élevés (RCP8.5) de gaz à effet de serre. {Encadré RID.1}

[11] Cela ne signifie pas que les changements ont commencé en 1950. Les changements de certaines variables se sont produits depuis la période pré-industrielle.

Figure RID.1 (continued) : Changements présentés dans les graphiques : **(a)** Évolution de la température moyenne de l'air à la surface du globe, avec fourchette *probable*. {Encadré RID.1, encadré thématique 1 du chapitre 1} **Changements concernant l'océan**, avec fourchettes *très probables* : **(b)** Évolution de la température moyenne de surface de la mer à l'échelle planétaire {encadré 5.1, 5.2.2} ; **(c)** Facteur de changement du nombre de jours de vagues de chaleur marines à la surface de l'océan {6.4.1} ; **(d)** Évolution du contenu de chaleur de l'océan (de 0 à 2 000 m de profondeur). Une estimation de la variation stérique du niveau de la mer est fournie sur l'axe de droite, en multipliant le contenu de chaleur de l'océan par le coefficient de dilatation thermique moyen à l'échelle du globe ($\varepsilon \approx 0{,}125$ m par 10^{24} joules)[12] pour le réchauffement observé depuis 1970 {figure 5.1} ; **(h)** pH de surface moyen à l'échelle du globe (sur l'échelle complète). Les tendances évaluées reposent sur des séries chronologiques d'observations en haute mer longues de plus de quinze années {encadré 5.1, figure 5.6, 5.2.2} ; **(i)** Évolution de la teneur moyenne en oxygène de l'océan à l'échelle du globe (de 100 à 600 m de profondeur). Les tendances évaluées concernent les observations couvrant la période 1970–2010 centrée sur 1996. {figure 5.8, 5.2.2} **Changements concernant le niveau de la mer**, avec fourchettes *probables* : **(m)** Changement du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe. Les sections hachurées signalent une *degré de confiance faible* dans les projections du niveau de la mer au-delà de 2100, les barres en 2300 correspondent aux avis formulés par les experts sur la fourchette des variations possibles du niveau de la mer {4.2.3, figure 4.2} ; **(e)** et **(f)** Perte de masse des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique et contribution à la hausse du niveau des mers {3.3.1} ; **(g)** Perte de masse des glaciers et contribution à la hausse du niveau des mers {encadré thématique 6 du chapitre 2, tableau 4.1}. **Autres changements concernant la cryosphère**, avec fourchettes *très probables* : **(j)** Évolution de l'étendue de la glace de mer arctique en septembre[13] {3.2.1, 3.2.2 figure 3.3} ; **(k)** Évolution du manteau neigeux dans l'Arctique en juin (terres émergées au nord de 60°N) {3.4.1, 3.4.2, figure 3.10} ; **(l)** Évolution de l'étendue du pergélisol de surface (jusqu'à trois ou quatre mètres) dans l'hémisphère Nord {3.4.1, 3.4.2, figure 3.10}. L'évaluation des changements projetés en réponse aux scénarios intermédiaires RCP4.5 et RCP6.0 n'est pas disponible pour toutes les variables prises en compte ici ; lorsque ces informations sont disponibles, elles se trouvent dans le rapport sous-jacent. {Pour RCP4.5, voir 2.2.2, encadré thématique 6 du chapitre 2, 3.2.2, 3.4.2, 4.2.3 ; pour RCP6.0, voir encadré thématique 1 du chapitre 1}

Encadré RID.1 | Utilisation des scénarios de changement climatique dans ce rapport

Dans ce rapport, l'évaluation des changements futurs s'appuie en grande partie sur les projections des modèles climatiques du programme CMIP5[14] utilisant les trajectoires représentatives de concentration (RCP). Les scénarios RCP comprennent des séries chronologiques d'émissions et de concentrations de l'ensemble des gaz à effet de serre, aérosols et gaz chimiquement actifs, ainsi que d'évolution de l'usage des terres et du couvert végétal. Chaque RCP représente l'un des multiples scénarios possibles conduisant à différents niveaux de réchauffement planétaire. {Annexe I : Glossaire}

Ce rapport utilise principalement les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 pour son évaluation, compte-tenu des informations disponibles dans les publications scientifiques. La trajectoire RCP2.6 illustre un avenir marqué par de faibles émissions de gaz à effet de serre du fait d'efforts importants d'atténuation du changement climatique, qui se traduit dans les simulations CMIP5 par deux chances sur trois de contenir le réchauffement planétaire sous 2°C d'ici à 2100[15]. En revanche, le scénario RCP8.5 est un scénario d'émissions fortes de gaz à effet de serre en l'absence de politiques destinées à lutter contre le changement climatique, conduisant à une augmentation continue et soutenue des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre. Parmi tous les RCP, le RCP8.5 correspond à la trajectoire d'émissions les plus élevées de gaz à effet de serre. Les chapitres du rapport principal font aussi référence à d'autres scénarios, dont les RCP4.5 et RCP6.0, qui correspondent à des niveaux intermédiaires d'émissions de gaz à effet de serre et conduisent à des niveaux intermédiaires de réchauffement. {Annexe I : Glossaire, encadré thématique 1 du chapitre 1}

Le tableau RID.1 fournit les estimations du réchauffement total depuis la période préindustrielle correspondant à quatre RCP différents pour les périodes principales utilisées pour l'évaluation des évolutions futures dans ce rapport. Le réchauffement observé entre 1850–1900 et 1986–2005 est estimé à 0,63°C (0,57 à 0,69°C, fourchette *probable*) d'après les observations de la température de l'air à la surface de l'océan et des terres émergées[16]. De manière cohérente avec l'approche du Cinquième Rapport d'évaluation (AR5), les changements futurs modélisés de la température moyenne de l'air à la surface du globe par rapport à 1986–2005 sont ajoutés à ce réchauffement observé. {Encadré thématique 1 du chapitre 1}

Tableau RID.1 | Évolution projetée de la température moyenne à la surface du globe, par rapport à 1850–1900, pour deux périodes avec quatre RCP[16] {Encadré thématique 1 du chapitre 1}

	Court terme : 2031–2050		Fin du siècle : 2081–2100	
Scénario	Moyenne (°C)	Fourchette *probable* (°C)	Moyenne (°C)	Fourchette *probable* (°C)
RCP2.6	1,6	1,1 à 2,0	1,6	0,9 à 2,4
RCP4.5	1,7	1,3 à 2,2	2,5	1,7 à 3,3
RCP6.0	1,6	1,2 à 2,0	2,9	2,0 à 3,8
RCP8.5	2,0	1,5 à 2,4	4,3	3,2 à 5,4

[12] Le coefficient de conversion entre la dilatation moyenne de l'océan à l'échelle planétaire et l'élévation du niveau de la mer, en mètres par unité de chaleur, varie de 10 % environ selon les modèles et il augmentera de façon systématique d'environ 10 % d'ici à 2100 pour un forçage RCP8.5, le réchauffement de l'océan entraînant une hausse du coefficient moyen de dilatation thermique. {4.2.1, 4.2.2, 5.2.2}

[13] La glace de mer antarctique n'est pas présentée ici en raison du *degré de confiance faible* attaché aux projections. {3.2.2}

[14] Cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (annexe I : Glossaire).

[15] Une trajectoire d'émissions plus faibles (RCP1.9), qui correspondrait à un réchauffement moindre qu'avec le RCP2.6, n'était pas prise en compte dans les simulations du programme CMIP5.

[16] Ce rapport évalue parfois les changements par rapport à la période 2006–2015. Le réchauffement survenu entre 1850–1900 et 2006–2015 a été évalué à 0,87 °C (0,75 à 0,99 °C, fourchette *probable*). {Encadré thématique 1 du chapitre 1}

A.2 Il est *quasiment certain* que l'océan mondial s'est réchauffé sans cesse depuis 1970 et qu'il a absorbé plus de 90 % de l'excédent de chaleur accumulé dans le système climatique (*degré de confiance élevé*). Le rythme de réchauffement de l'océan a plus que doublé depuis 1993 (*probable*). Il est *très probable* que la fréquence des vagues de chaleur marines a doublé depuis 1982 et que leur intensité augmente (*degré de confiance très élevé*). L'absorption d'une plus grande quantité de CO_2 a entraîné une augmentation de l'acidification des eaux superficielles de l'océan (*quasiment certain*). La teneur en oxygène entre la surface et 1000 m de profondeur a diminué (*degré de confiance moyen*). {1.4, 3.2, 5.2, 6.4, 6.7, figures RID.1, RID.2}

A.2.1. Le réchauffement de l'océan mis en évidence dans le Cinquième Rapport d'évaluation s'est poursuivi. Depuis 1993, la vitesse du réchauffement de l'océan, et donc son absorption de chaleur, a plus que doublé (*probable*), passant de 3,22 ± 1,61 ZJ.an^{-1} (0 à 700 m de profondeur) et 0,97 ± 0,64 ZJ.an^{-1} (700 à 2 000 m) entre 1969 et 1993, à 6,28 ± 0,48 ZJ.an^{-1} (0 à 700 m) et 3,86 ± 2,09 ZJ.an^{-1} (700 à 2 000 m) entre 1993 et 2017[17] ; ce phénomène est attribué au forçage anthropique (*très probable*). {1.4.1, 5.2.2, tableau 5.1, figure RID.1}

A.2.2 L'océan Austral a représenté 35 à 43 % du gain total de chaleur entre 1970 et 2017 dans les premiers 2 000 m de l'océan mondial (*degré de confiance élevé*). Sa part a augmenté pour atteindre 45–62 % entre 2005 et 2017 (*degré de confiance élevé*). L'océan profond (en-dessous de 2 000 m) s'est réchauffé depuis 1992 (*probable*), surtout dans l'océan Austral. {1.4, 3.2.1, 5.2.2, tableau 5.1, figure RID.2}

A.2.3 Les événements chauds en mer ont augmenté à l'échelle planétaire. Les vagues de chaleur marines[18], définies par une température quotidienne de surface de la mer supérieure au 99^{e} centile des valeurs locales pendant la période 1982–2016, ont doublé en fréquence et sont devenues plus longues, plus intenses et affectent des surfaces plus étendues (*très probable*). Il est *très probable* que 84 à 90 % des vagues de chaleur marines survenues entre 2006 et 2015 sont attribuables au réchauffement d'origine anthropique. {Tableau 6.2, 6.4 ; figures RID.1, RID.2}

A.2.4 La stratification de la densité[19] des couches d'eau a augmenté dans les premiers 200 m de l'océan depuis 1970 (*très probable*). Le réchauffement observé dans les couches supérieures et l'apport d'eau douce aux hautes latitudes réduisent la densité en surface par rapport aux couches plus profondes (*degré de confiance élevé*) et inhibent le mélange des eaux superficielles et des eaux plus profondes (*degré de confiance élevé*). La stratification dans les premiers 200 m a augmenté de 2,3 ± 0,1 % (fourchette *très probable*) entre les niveaux moyens de 1971–1990 et de 1998–2017. {5.2.2}

A.2.5 L'océan a absorbé 20 à 30 % (*très probable*) des émissions anthropiques totales de CO_2 depuis les années 1980, ce qui a accentué son acidification. Le pH de surface en haute mer a diminué de 0,017–0,027 unité pH (fourchette *très probable*) par décennie depuis la fin des années 1980[20] et il est *très probable* que la baisse du pH dans les couches superficielles soit déjà sortie de la variabilité naturelle sur plus de 95 % de la superficie de l'océan. {3.2.1 ; 5.2.2 ; encadré 5.1 ; figures RID.1, RID.2}

---

17 ZJ est le symbole du zettajoule, soit 10^{21} joules. Il faut 5 500 ZJ environ pour réchauffer l'ensemble de l'océan de 1 °C ; 144 ZJ réchaufferaient les premiers 100 m d'environ 1 °C.

18 Période marquée par une température de surface de la mer extrêmement élevée, d'une durée de quelques jours à plusieurs mois, qui s'étend parfois sur des milliers de kilomètres (annexe I : Glossaire).

19 La stratification de la densité désigne, dans ce rapport, l'écart de densité entre les couches d'eau plus proches de la surface et les couches plus profondes. Une augmentation de la stratification réduit les échanges verticaux de chaleur, de salinité, d'oxygène, de carbone et de nutriments.

20 Selon des relevés *in situ* longs de plus de quinze ans.

A.2.6 Les jeux de données couvrant la période 1970–2010 révèlent un appauvrissement en oxygène de 0,5–3,3 % (fourchette *très probable*) dans les premiers 1 000 m en haute mer, accompagné d'une expansion *probable* de 3 à 8 % du volume des zones de minimum d'oxygène (*degré de confiance moyen*). La perte d'oxygène est surtout due à la stratification accrue, à la modification de la ventilation et à la biogéochimie (*degré de confiance élevé*). {5.2.2 ; figures RID.1, RID.2}

A.2.7 Les observations à la fois *in situ* (2004–2017) et basées sur les reconstitutions de la température de surface de la mer indiquent que la circulation méridienne de retournement en Atlantique[21] a ralenti par rapport à la période 1850–1900 (*degré de confiance moyen*). Les données sont insuffisantes pour quantifier l'ampleur de ce ralentissement, ou pour l'attribuer rigoureusement au forçage anthropique, faute de relevés d'observation suffisamment longs. Bien qu'une attribution ne soit actuellement pas possible, les simulations de modèles CMIP5 prenant en compte le forçage anthropique montrent en moyenne, pour la période 1850–2015, un ralentissement de la circulation méridienne de retournement en Atlantique. {6.7}

A.3 Le niveau moyen de la mer s'élève à l'échelle planétaire avec une accélération au cours des dernières décennies en raison d'une perte croissante de glace des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique (*degré de confiance très élevé*), en plus de la perte continue de masse des glaciers et de la dilatation thermique de l'océan. Le renforcement des vents et des pluies lors des cyclones tropicaux et l'augmentation des vagues extrêmes, s'ajoutant à l'élévation du niveau relatif de la mer, exacerbent les événements de niveau marin extrême et les aléas côtiers (*degré de confiance élevé*). {3.3, 4.2, 6.2, 6.3, 6.8, figures RID.1, RID.2, RID.4, RID.5}

A.3.1 L'élévation totale du niveau moyen de la mer global pour la période 1902-2015 est de 0,16 m (0,12–0,21 m, fourchette *probable*). Le rythme d'élévation entre 2006 et 2015, soit 3,6 mm.an^{-1} (3,1–4,1 mm.an^{-1}, fourchette *très probable*), est sans précédent au cours du siècle dernier (*degré de confiance élevé*) et correspond à environ 2,5 fois le taux de la période 1901–1990, soit 1,4 mm.an^{-1} (0,8–2,0 mm.an^{-1}, fourchette *très probable*). De 2006 à 2015, l'apport cumulé des calottes glaciaires et des glaciers a été la source principale d'élévation du niveau de la mer (1,8 mm.an^{-1}, fourchette *très probable* de 1,7–1,9 mm.an^{-1}), excédant l'effet de la dilatation thermique des eaux océaniques (1,4 mm.an^{-1}, fourchette *très probable* de 1,1–1,7 mm.an^{-1})[22] (*degré de confiance très élevé*). Le forçage anthropique est la principale cause de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe depuis 1970 (*degré de confiance élevé*). {4.2.1, 4.2.2, figure RID.1}

A.3.2 L'élévation du niveau de la mer a accéléré (*extrêmement probable*) en raison de l'augmentation de la perte combinée de glace des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique (*degré de confiance très élevé*). La perte de masse de l'Antarctique a triplé sur la période 2007–2016 par rapport à la période 1997–2006. Pour le Groenland, elle a doublé sur la même période (*probable, confiance moyenne*). {3.3.1 ; figures RID.1, RID.2 ; RID A1.1}

A.3.3 Une accélération de l'écoulement et du recul de la calotte Antarctique, qui a le potentiel d'élever le niveau de la mer de plusieurs mètres en quelques siècles, est observée dans la baie de la mer d'Amundsen (Antarctique de l'Ouest) et dans la terre de Wilkes (Antarctique de l'Est) (*degré de confiance très élevé*). Il est possible que ces changements marquent le début d'une instabilité irréversible[23] de la calotte glaciaire dans ces régions. L'incertitude sur le démarrage d'une instabilité de la calotte glaciaire provient d'observations limitées, d'une représentation inadéquate de certains processus dynamiques spécifiques des calottes glaciaires dans les modèles, et d'une compréhension limitée des interactions complexes entre l'atmosphère, l'océan et les calottes glaciaires. {3.3.1, encadré thématique 8 du chapitre 3, 4.2.3}

A.3.4 L'élévation du niveau de la mer n'est pas uniforme partout sur la planète et varie d'une région à l'autre. Les écarts régionaux, de ± 30 % par rapport à l'élévation moyenne globale, sont dus aux pertes de glace continentale et aux variations du réchauffement de l'océan et de sa circulation. Les écarts par rapport à la moyenne globale peuvent être plus grands dans les zones concernées par un mouvement vertical rapide des terres émergées, celui-ci pouvant provenir de l'effet d'activités humaines locales (prélèvement d'eaux souterraines, par exemple). (*degré de confiance élevé*) {4.2.2, 5.2.2, 6.2.2, 6.3.1, 6.8.2, figure RID.2}

---

21 Principal système de courants dans l'Atlantique Nord et l'Atlantique Sud (annexe I : Glossaire).

22 Le total des taux d'élévation du niveau de la mer est supérieur à la somme des contributions de la cryosphère et de l'océan du fait d'incertitudes sur l'estimation du stockage d'eau sur les terres émergées.

23 L'échelle de temps de rétablissement est de l'ordre de plusieurs siècles à plusieurs millénaires (annexe I : Glossaire).

A.3.5 Les hauteurs extrêmes de vagues, qui contribuent aux niveaux marins extrêmes, à l'érosion des côtes et aux submersions, ont augmenté d'environ 1,0 $cm.an^{-1}$ et 0,8 $cm.an^{-1}$ dans l'océan Austral et l'Atlantique Nord pendant la période 1985–2018 (*degré de confiance moyen*). Dans l'Arctique, le recul de la glace de mer a également contribué à accroître la hauteur des vagues entre 1992 et 2014 (*degré de confiance moyen*). {4.2.2, 6.2, 6.3, 6.8, encadré 6.1}

A.3.6 Le changement climatique d'origine anthropique a renforcé l'intensité des précipitations (*degré de confiance moyen*), la vitesse des vents (*degré de confiance faible*) et les épisodes de niveau marin extrême (*degré de confiance élevé*) observés lors de certains cyclones tropicaux, ce qui a augmenté l'intensité d'événements extrêmes multiples et leurs conséquences en cascade (*degré de confiance élevé*). Il est possible que le changement climatique d'origine anthropique ait contribué ces dernières décennies au déplacement vers les pôles de l'intensité maximale des cyclones tropicaux dans la partie occidentale du Pacifique Nord, en relation avec l'élargissement de la bande climatique tropicale générée par le forçage anthropique (*degré de confiance faible*). Des observations récentes font apparaître, sur les dernières décennies, une hausse de la proportion annuelle de cyclones tropicaux de catégorie 4 ou 5 dans le monde (*degré de confiance faible*). {6.2, tableau 6.2, 6.3, 6.8, encadré 6.1}

Impacts observés sur les écosystèmes

A.4 Les changements survenus dans la cryosphère et les effets hydrologiques qui en résultent ont affecté les espèces et les écosystèmes terrestres et d'eau douce dans les régions polaires et de haute montagne du fait de l'apparition de terres auparavant recouvertes de glace, la modification du manteau neigeux et le dégel du pergélisol. Ils ont contribué à modifier les activités saisonnières, l'abondance et la répartition d'espèces animales et végétales importantes pour leurs valeurs écologiques, culturelles et économiques, et ont aussi affecté les perturbations écologiques et le fonctionnement des écosystèmes. (*degré de confiance élevé*) {2.3.2, 2.3.3, 3.4.1, 3.4.3, encadré 3.4, figure RID.2}

A.4.1 Au cours du siècle dernier, à la faveur du recul des glaciers et de l'allongement de la saison libre de neige, l'abondance de certaines espèces animales et végétales a augmenté, leur aire de répartition s'est déplacée et elles ont colonisé de nouveaux secteurs (*degré de confiance élevé*). Conjugués au réchauffement, ces changements ont accru localement le nombre d'espèces en haute montagne, les espèces des altitudes plus basses migrant vers les hauteurs (*degré de confiance très élevé*). L'abondance de certaines espèces adaptées au froid ou tributaires de la neige a diminué, amplifiant le risque d'extinction, surtout sur les sommets (*degré de confiance élevé*). Dans les régions polaires et montagneuses, beaucoup d'espèces ont modifié leurs activités saisonnières, surtout à la fin de l'hiver et au printemps (*degré de confiance élevé*). {2.3.3, encadré 3.4}

A.4.2 L'augmentation des feux de forêt, le dégel abrupt du pergélisol et la modification de l'hydrologie de l'Arctique et des zones de montagnes ont changé la fréquence et l'intensité des perturbations subies par les écosystèmes (*degré de confiance élevé*). Cela inclut des impacts positifs et négatifs sur la flore et la faune comme le renne et le saumon (*degré de confiance élevé*). {2.3.3, 3.4.1, 3.4.3}

A.4.3 Les observations par satellite montrent un verdissement de la toundra, signe habituel d'une hausse de la productivité des plantes (*degré de confiance élevé*). Le brunissement de quelques secteurs, dans la toundra et la forêt boréale, y indique une baisse de productivité (*degré de confiance élevé*). Ces changements ont affecté négativement les services écosystémiques d'approvisionnement, de régulation et culturels, avec aussi quelques effets positifs transitoires sur les services d'approvisionnement en haute montagne (*degré de confiance moyen*) et dans les régions polaires (*degré de confiance élevé*). {2.3.1, 2.3.3, 3.4.1, 3.4.3, annexe I : Glossaire}

A.5 L'aire de répartition géographique et les activités saisonnières de beaucoup d'espèces marines de divers groupes ont changé depuis environ 1950, en réaction au réchauffement de l'océan, aux changements de la glace de mer et aux modifications biogéochimiques de leurs habitats, comme leur perte d'oxygène (*degré de confiance élevé*). Cela a entraîné des changements de composition des espèces, de leur abondance, et de la production de biomasse par les écosystèmes, de l'équateur aux pôles. Les modifications des interactions entre espèces ont eu des répercussions en cascade sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes (*degré de confiance moyen*). Dans certains écosystèmes marins, les espèces sont affectées à la fois par les effets de la pêche et du changement climatique (*degré de confiance moyen*). {3.2.3, 3.2.4, encadré 3.4, 5.2.3, 5.3, 5.4.1, figure RID.2}

A.5.1 Depuis les années 1950, l'aire de répartition de diverses espèces marines se déplace vers les pôles 1950 à un rythme (fourchette *très probable*) de 52 ± 33 km par décennie pour les organismes des écosystèmes épipélagiques (premiers 200 m de profondeur) et 29 ± 16 km par décennie pour les organismes des écosystèmes des fonds marins. La vitesse et la direction des changements observés dans ces distributions sont déterminées par les températures locales, la teneur en oxygène et les courants océaniques au sein de gradients de profondeur, de latitude et de longitude (*degré de confiance élevé*). L'expansion de l'aire de répartition des espèces sous l'effet du réchauffement a entraîné une altération de la structure et du fonctionnement des écosystèmes, par exemple dans l'Atlantique Nord, le Pacifique Nord-Est et l'Arctique (*degré de confiance moyen*). {5.2.3, 5.3.2, 5.3.6, encadré 3.4, figure RID.2}

A.5.2 Au cours des dernières décennies, la production primaire nette de l'Arctique a augmenté dans les eaux libres de glace (*degré de confiance élevé*) et l'efflorescence printanière du phytoplancton y survient plus tôt du fait des changements de glace de mer et du volume de nutriments disponibles, avec des conséquences positives ou négatives pour les écosystèmes marins, variables selon le lieu (*degré de confiance moyen*). En Antarctique, ces changements sont spatialement hétérogènes et sont liés à une évolution rapide des conditions locales, telles que le recul des glaciers et les changements de la glace de mer (*degré de confiance moyen*). Les changements dans les activités saisonnières, la production et la répartition d'une partie du zooplancton de l'Arctique et le déplacement vers le sud de la population de krill de l'Antarctique, dans l'Atlantique Sud, sont associés à des changements environnementaux liés au climat (*degré de confiance moyen*). Dans les régions polaires, les oiseaux de mer et les mammifères marins tributaires des glaces ont connu une contraction de leur habitat liée aux modifications de la glace de mer (*degré de confiance élevé*) et le succès de leur recherche de nourriture a été affecté par les impacts climatiques sur la répartition de leurs proies (*degré de confiance moyen*). Des effets en cascade de multiples facteurs climatiques affectant le zooplancton polaire ont modifié la structure et la fonction du réseau trophique, la biodiversité et eu des impacts sur les pêcheries (*degré de confiance élevé*). {3.2.3, 3.2.4, encadré 3.4, 5.2.3, figure RID.2}

A.5.3 Les zones de remontée d'eau profonde sur les marges Est des bassins océaniques (EBUS, *Eastern Boundary Upwelling Systems*) sont parmi les écosystèmes marins les plus productifs. L'acidification et la désoxygénation progressives de l'océan ont des impacts néfastes sur deux de ces quatre grands systèmes : le courant de Californie et le courant de Humboldt (*degré de confiance élevé*). L'acidification et la baisse de la teneur en oxygène dans le système de remontée d'eau profonde du courant de Californie ont modifié la structure de cet écosystème, avec des impacts négatifs directs sur la production de biomasse et la composition des espèces (*degré de confiance moyen*). {Encadré 5.3, figure RID.2}

A.5.4 Le réchauffement de l'océan au XX^{e} siècle et au-delà a contribué à abaisser globalement le potentiel maximal de capture des pêcheries (*degré de confiance moyen*), aggravant les impacts de la surpêche sur certains stocks de poissons (*degré de confiance élevé*). Dans beaucoup de régions, la diminution des stocks de poissons, coquillages et crustacés, directement ou indirectement imputable au réchauffement planétaire et aux changements biogéochimiques, concourt déjà à faire diminuer les captures (*degré de confiance élevé*). Dans certaines régions, l'évolution des conditions océaniques a favorisé l'expansion d'habitats adéquats et/ou l'augmentation de l'abondance de quelques espèces (*degré de confiance élevé*). Ces changements se sont accompagnés d'une modification de la composition des prises de pêche depuis les années 1970 dans de nombreux écosystèmes (*degré de confiance moyen*). {3.2.3, 5.4.1, figure RID.2}

A.6 Les écosystèmes côtiers sont affectés par le réchauffement de l'océan, notamment par l'intensification des vagues de chaleur marines, par son acidification, sa perte d'oxygène, par les intrusions salines et l'élévation du niveau de la mer, le tout conjugué aux effets préjudiciables des activités humaines en mer comme à terre (*degré de confiance élevé*). On en observe déjà les impacts sur la superficie de certains habitats, la biodiversité ainsi que sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs services écosystémiques (*degré de confiance élevé*). {4.3.2, 4.3.3, 5.3, 5.4.1, 6.4.2, figure RID.2}

A.6.1 Les écosystèmes côtiers végétalisés protègent le littoral des tempêtes et de l'érosion tout en atténuant les conséquences de l'élévation du niveau de la mer. Près de 50 % des zones humides côtières ont disparu au cours des derniers 100 ans, sous les effets conjugués des pressions anthropiques locales, de l'élévation du niveau de la mer, du réchauffement planétaire et des phénomènes climatiques extrêmes (*degré de confiance élevé*). La végétation côtière est un important réservoir de carbone et la disparition de ces écosystèmes est à l'origine d'un rejet actuel de 0,04–1,46 Gt de carbone par an (*degré de confiance moyen*). En réaction au réchauffement, l'aire de répartition des herbiers marins et des forêts de laminaires s'étend dans les hautes latitudes et se contracte dans les basses latitudes depuis la fin des années 1970 (*degré de confiance élevé*) ; dans certaines régions, des pertes épisodiques surviennent à la suite de vagues de chaleur (*degré de confiance moyen*). La mortalité à grande échelle des mangroves liée au réchauffement depuis les années 1960 a été en partie compensée par leur progression dans les marais salés subtropicaux du fait de la hausse des températures, mais cette progression provoque la perte de zones dégagées où prolifère une végétation herbacée, fournissant nourriture et habitat à une faune qui en dépend (*degré de confiance élevé*). {4.3.3, 5.3.2, 5.3.6, 5.4.1, 5.5.1, figure RID.2}

A.6.2 L'augmentation de l'intrusion d'eau salée dans les estuaires due à l'élévation du niveau de la mer a provoqué la redistribution en amont d'espèces marines (*degré de confiance moyen*) et a réduit les habitats adéquats pour les communautés estuariennes (*degré de confiance moyen*). La hausse des teneurs en nutriments et matière organique dans les estuaires depuis les années 1970, due aux activités humaines intensives et à l'apport des cours d'eau, a exacerbé l'effet du réchauffement océanique sur la respiration bactérienne, entraînant l'expansion de zones à faibles teneurs en oxygène (*degré de confiance élevé*). {5.3.1}

A.6.3 Les impacts de l'élévation du niveau de la mer sur les écosystèmes côtiers comprennent la réduction des habitats et le déplacement des espèces affectées, de même que la perte de biodiversité et de fonctionnalités des écosystèmes. Ces impacts sont aggravés par les perturbations humaines directes et par la présence de barrières d'origine anthropique au déplacement des zones de marais et des mangroves vers l'intérieur des terres (ce que l'on appelle la compression côtière) (*degré de confiance élevé*). Selon la géomorphologie locale et l'apport en sédiments, les marais et les mangroves peuvent s'étendre verticalement à un rythme égal ou supérieur à l'élévation actuelle du niveau de la mer (*degré de confiance élevé*). {4.3.2, 4.3.3, 5.3.2, 5.3.7, 5.4.1}

A.6.4 Les récifs coralliens d'eau chaude et les côtes rocheuses qui abritent surtout des organismes fixés calcifiants (à coquille, squelette, etc.) tels les coraux, balanes et moules, sont actuellement affectés par les températures extrêmes et l'acidification de l'océan (*degré de confiance élevé*). Les vagues de chaleur marines accroissent déjà la fréquence des phénomènes de blanchissement des coraux à grande échelle (*degré de confiance très élevé*) et ont causé une dégradation des récifs coralliens depuis 1997 à l'échelle globale ; si elle survient, la régénération après un tel événement est lente (plus de 15 ans) (*degré de confiance élevé*). Les périodes prolongées de température ambiante élevée et de déshydratation des organismes font peser des risques élevés sur les écosystèmes des côtes rocheuses (*degré de confiance élevé*). {SR1,5 ; 5.3.4, 5.3.5, 6.4.2.1, figure RID.2}

Impacts régionaux observés résultant de changements de l'océan et la cryosphère

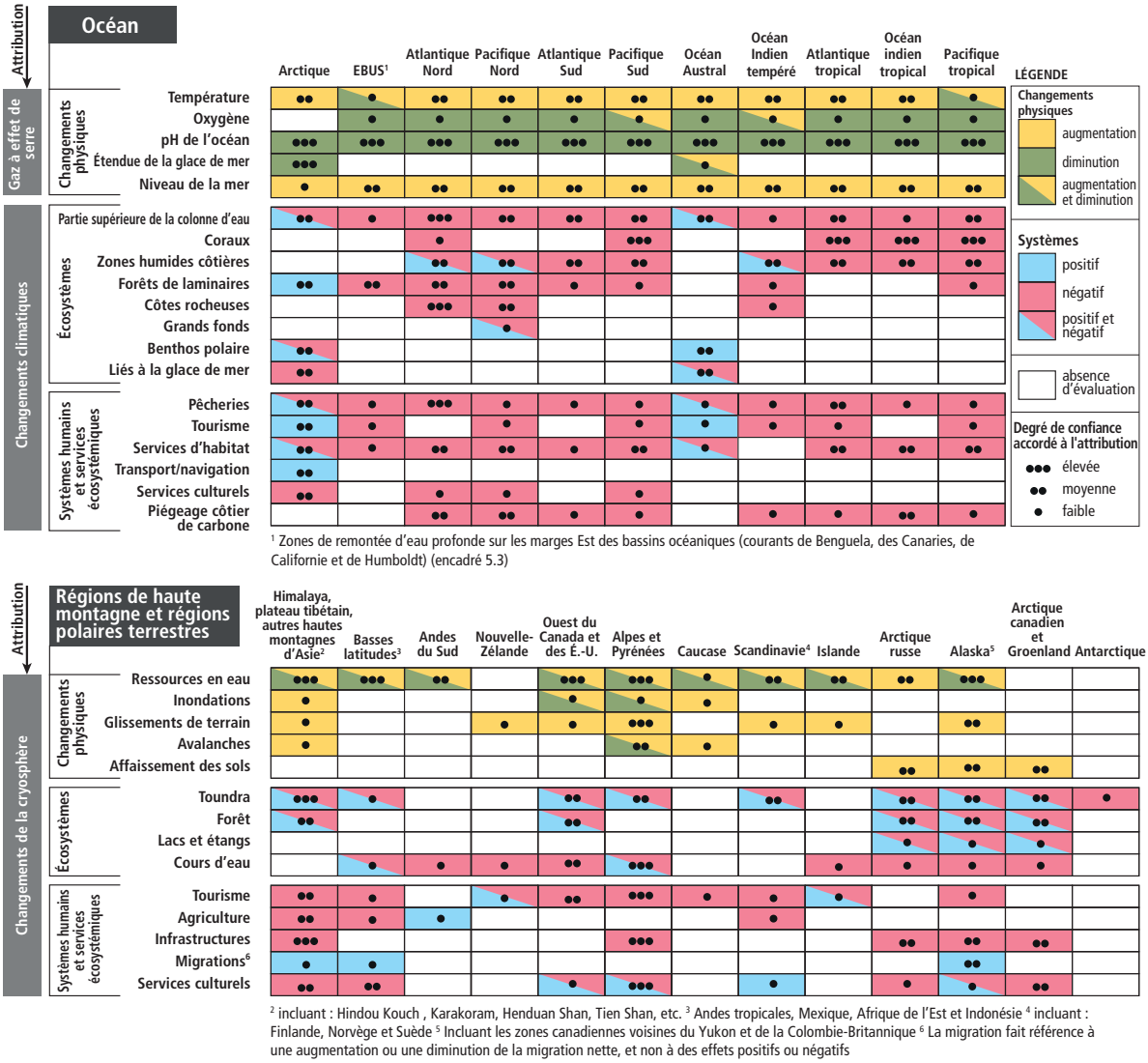


Figure RID.2 | Synthèse des changements physiques régionaux et de leurs impacts observés dans l'océan[24] (en haut) et dans les zones de haute montagne et les régions polaires terrestres (en bas) évalués dans ce rapport. Les changements physiques, les impacts sur les écosystèmes clés et les impacts sur les systèmes humains et sur les fonctions et services écosystémiques sont présentés pour chaque région. S'agissant des changements physiques, le jaune et le vert désignent, respectivement, une augmentation et une diminution en quantité ou en fréquence de la variable mesurée. S'agissant des impacts sur les écosystèmes, les systèmes humains et les services écosystémiques, le bleu et le rouge précisent, respectivement, si l'impact observé est positif (bénéfique) ou négatif (néfaste) pour le système ou le service en question. Les cases « augmentation et diminution » signifient que, dans la région visée, on observe à la fois des hausses et des baisses des paramètres physiques, qui ne sont pas forcément égales ; il en va de même pour les cases « positif et négatif ». Dans le cas de l'océan, le degré de confiance concerne l'attribution des changements observés aux variations du forçage résultant des gaz à effet de serre, pour les paramètres physiques, et aux changements climatiques, pour les écosystèmes, les systèmes humains et les services écosystémiques. Dans le cas des zones de haute montagne et des régions polaires terrestres, le degré de confiance concerne l'attribution des changements et des impacts physiques, au moins partiellement, à une modification de la cryosphère. L'absence d'évaluation signifie : non applicable, pas d'évaluation à l'échelle régionale ou éléments probants insuffisants pour une évaluation. Les changements physiques dans l'océan sont : l'évolution de la température dans la couche océanique de 0 à 700 m, sauf dans l'océan Austral (0 à 2 000 m) et l'océan Arctique (couche de mélange supérieure et principales branches entrantes) ; l'oxygène dans la couche de 0 à 1 200 m ou dans la couche de minimum d'oxygène ; et le pH de l'océan en surface (la baisse du pH correspond à l'acidification des eaux). Écosystèmes océaniques : les coraux regroupent les récifs coralliens d'eau chaude et les coraux d'eau froide. La partie supérieure de la colonne d'eau désigne la zone épipélagique dans toutes les régions océaniques à l'exception des régions polaires, où sont inclus les impacts sur certains organismes pélagiques à plus de 200 m de profondeur dans les eaux libres. Les zones humides côtières englobent les marais maritimes, les mangroves et les herbiers. Les forêts de laminaires abritent un groupe particulier de macro-algues. Les côtes rocheuses sont des habitats côtiers qui abritent surtout des organismes fixés calcifiants telles les balanes et les moules. Les grands fonds désignent les écosystèmes situés entre 3 000 et 6 000 m de profondeur. L'association à la glace de mer comprend les écosystèmes qui se trouvent dans, sur ou sous les glaces de mer. Les services d'habitat renvoient aux structures et services d'appui (par exemple : habitat, biodiversité, production primaire). Le piégeage côtier de carbone désigne l'absorption et le stockage de carbone par les écosystèmes à carbone bleu du littoral. Écosystèmes terrestres : la toundra fait référence à la toundra et aux prairies alpines et englobe les écosystèmes antarctiques terrestres. La migration fait référence à une augmentation ou une diminution de la migration nette, et non à ses effets positifs ou négatifs.

[24] Les mers marginales ne sont pas évaluées séparément, en tant que régions océaniques, dans le rapport.

Figure RID.2 (continued): Les impacts sur le tourisme font référence aux conditions d'exploitation du secteur touristique. Les services culturels englobent l'identité culturelle, le sentiment d'appartenance et les valeurs spirituelles, intrinsèques et esthétiques, ainsi que l'apport de l'archéologie des glaciers. Les informations sous-jacentes figurent dans les tableaux SM2.6, SM2.7, SM2.8, SM3.8, SM3.9 et SM3.10 pour les régions terrestres, et dans les tableaux SM5.10, SM5.11, SM3.8, SM3.9 et SM3.10 pour les régions océaniques. {2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6, 2.3.7, figure 2.1, 3.2.1 ; 3.2.3 ; 3.2.4 ; 3.3.3 ; 3.4.1 ; 3.4.3 ; 3.5.2 ; encadré 3.4, 4.2.2, 5.2.2, 5.2.3, 5.3.3, 5.4, 5.6, figure 5.24, encadré 5.3}

Impacts observés sur les populations humaines et les services écosystémiques

A.7 Depuis le milieu du XX^{e} siècle, le recul de la cryosphère en Arctique et en haute montagne a eu des conséquences essentiellement néfastes sur la sécurité alimentaire, les ressources en eau, la qualité de l'eau, les moyens de subsistance, la santé et le bien-être des populations, les infrastructures, les transports, le tourisme et les loisirs, ainsi que sur la culture des sociétés humaines, particulièrement chez les peuples autochtones (*degré de confiance élevé*). Les coûts et bénéfices ont été inégalement distribués d'une population à une autre et d'une région à une autre. Les efforts d'adaptation ont bénéficié de la prise en compte des savoirs autochtones et des savoirs locaux (*degré de confiance élevé*). {1.1, 1,5, 1.6.2, 2.3, 2.4, 3.4, 3.5, figure RID.2}

A.7.1 La sécurité alimentaire et la sécurité de l'approvisionnement en eau ont été affectées négativement par les changements du manteau neigeux, de la glace de lac et de rivière et du pergélisol dans de nombreuses régions arctiques (*degré de confiance élevé*). Ces changements ont perturbé l'accès aux zones d'élevage, de chasse, de pêche et de cueillette et ont réduit la nourriture qui y est disponible, au détriment des moyens de subsistance et de l'identité culturelle des habitants de l'Arctique, dont les peuples autochtones (*degré de confiance élevé*). Le recul des glaciers et les changements d'enneigement ont contribué à des baisses localisées de rendements agricoles dans certaines régions de haute montagne comme l'Hindou Kouch Himalaya et dans les Andes tropicales (*degré de confiance moyen*). {2.3.1, 2.3.7, encadré 2.4, 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.5.2, figure RID.2}

A.7.2 En Arctique, les effets négatifs des changements de la cryosphère de l'Arctique sur la santé humaine comprennent un risque accru de maladies d'origine alimentaire ou hydrique, de malnutrition, de blessures et de problèmes de santé mentale, surtout chez des peuples autochtones (*degré de confiance élevé*). Dans certaines zones de haute montagne, la qualité de l'eau a été affectée par des contaminants, en particulier du mercure, relâchés par la fonte des glaciers et le dégel du pergélisol (*degré de confiance moyen*). Les mesures d'adaptation visant la santé publique en Arctique vont de l'échelle locale à internationale et leur efficacité est renforcée lorsqu'elles s'appuient sur les savoirs autochtones (*degré de confiance élevé*). {1.8, encadré thématique 4 du chapitre 1, 2.3.1, 3.4.3}

A.7.3 Les habitants de l'Arctique, en particulier les peuples autochtones, ont modifié le calendrier de leurs activités pour tenir compte des changements saisonniers et de la sécurité de leurs déplacements sur la terre, la glace et la neige. Les municipalités et les entreprises commencent à prendre en charge les défaillances des d'infrastructure provoquées par les inondations et le dégel du pergélisol ; certaines communautés côtières ont planifié leur relocalisation (*degré de confiance élevé*). L'adaptation a été rendue plus difficile par l'insuffisance de fonds, le manque de compétences et de capacités, et l'absence d'appui institutionnel pour lancer efficacement des processus de planification (*degré de confiance élevé*). {3.5.2, 3.5.4, encadré thématique 9}

A.7.4 Le transport maritime (tourisme inclus) a augmenté en été dans les eaux de l'Arctique depuis deux décennies, en parallèle au recul de l'étendue de la glace de mer (*degré de confiance élevé*). Cette évolution a une incidence sur les économies et les échanges internationaux liés aux couloirs de navigation traditionnels et crée de nouveaux risques pour les écosystèmes marins et les communautés locales de l'Arctique (*degré de confiance élevé*), par exemple par l'apport d'espèces invasives et par la pollution locale. {3.2.1, 3.2.4, 3.5.4, 5.4.2, figure RID.2}

A.7.5 Au cours des dernières décennies, l'essor démographique, le tourisme et le développement socio-économique ont accru l'exposition des personnes et des infrastructures aux aléas naturels (*degré de confiance élevé*). Certaines catastrophes ont été attribuées aux changements de la cryosphère, par exemple dans les Andes, les hauts plateaux d'Asie, dans le Caucase et les Alpes européennes (*degré de confiance moyen*). {2.3.2, figure RID.2}

A.7.6 Les modifications observées du manteau neigeux et des glaciers ont changé le volume et le rythme saisonnier de l'écoulement et des ressources en eau dans les bassins hydrographiques alimentés par les glaciers et dominés par la neige (*degré de confiance très élevé*). Les centrales hydroélectriques ont connu des changements dans la saisonnalité et dans le

volume (aussi bien en augmentation qu'en diminution) de l'eau provenant des régions de haute montagne, par exemple en Europe centrale, en Islande, dans l'ouest des États-Unis d'Amérique et du Canada, et dans les Andes tropicales (*degré de confiance moyen*). On ne dispose toutefois que d'*éléments probants limités* quant aux conséquences de ces changements sur l'exploitation de ces ouvrages et sur la production d'énergie. {B1.4, 2.3.1}

A.7.7 Les dimensions esthétiques et culturelles des hautes montagnes ont pâti de la diminution des glaciers et de l'enneigement (Himalaya, Afrique de l'Est, Andes tropicales, etc.) (*degré de confiance moyen*). Le tourisme et les activités récréatives, dont le ski et le tourisme glaciaire, la randonnée et l'alpinisme ont aussi souffert dans de nombreuses régions montagneuses (*degré de confiance moyen*). Dans certaines régions, la production de neige de culture a limité les conséquences négatives pour les stations de ski (*degré de confiance moyen*). {2.3.5, 2.3.6, figure RID.2}

A.8 Les changements survenus dans l'océan ont eu des effets sur les écosystèmes marins et les services écosystémiques, variables selon les régions, remettant en cause leur gouvernance (*degré de confiance élevé*). Les impacts sont à la fois positifs et négatifs pour la sécurité alimentaire issue de la pêche (*degré de confiance moyen*), les cultures locales et les moyens de subsistance (*degré de confiance moyen*), le tourisme et les loisirs (*degré de confiance moyen*). Les impacts sur les services écosystémiques sont néfastes pour la santé et le bien-être (*degré de confiance moyen*), ainsi que pour les peuples autochtones et les populations locales qui dépendent de la pêche (*degré de confiance élevé*). {1.1, 1,5, 3.2.1, 5.4.1, 5.4.2, figure RID.2}

A.8.1 Les changements induits par le réchauffement dans la répartition spatiale et l'abondance de certains stocks de poissons, coquillages et crustacés ont eu des répercussions positives et négatives sur les captures, les avantages économiques, les moyens de subsistance et les cultures locales (*degré de confiance élevé*). Les conséquences sont néfastes pour les peuples autochtones et les populations locales qui vivent de la pêche (*degré de confiance élevé*). L'évolution de la répartition et de l'abondance des espèces a mis à l'épreuve la gouvernance internationale et nationale de l'océan et des pêcheries, notamment dans l'Arctique, l'Atlantique Nord et le Pacifique, en ce qui concerne la réglementation de la pêche pour préserver l'intégrité des écosystèmes et partager les ressources entre les entités concernées (*degré de confiance élevé*). {3.2.4, 3.5.3, 5.4.2, 5.5.2, figure RID.2}

A.8.2 Depuis les années 1980, les efflorescences algales nuisibles affectent des zones plus larges et se produisent plus fréquemment le long des côtes, en réponse à des facteurs climatiques et non climatiques tels que l'augmentation des nutriments dans les cours d'eau (*degré de confiance élevé*). Ces tendances sont attribuées en partie aux conditions induites par le réchauffement de l'océan, les vagues de chaleur marines, le déficit en oxygène, l'eutrophisation et la pollution (*degré de confiance élevé*). Les efflorescences algales nuisibles ont des conséquences néfastes sur la sécurité alimentaire, le tourisme, l'économie locale et la santé humaine (*degré de confiance élevé*). Les communautés humaines qui sont les plus vulnérables à ces risques biologiques sont celles qui vivent dans des régions où il n'existe pas de programmes de surveillance soutenus ni de systèmes d'alerte précoce dédiés à ces efflorescences algales nuisibles (*degré de confiance moyen*). {Encadré 5.4, 5.4.2, 6.4.2}

A.9 Les populations côtières sont exposées à de multiples aléas climatiques, tels les cyclones tropicaux, les niveaux marins extrêmes, les submersions marines, les vagues de chaleur marines, la disparition de la glace de mer et le dégel du pergélisol (*degré de confiance élevé*). Des réponses variées ont été mises en œuvre dans le monde, souvent à la suite d'événements extrêmes, mais dans certains cas en anticipant l'élévation du niveau de la mer à venir, par exemple pour de grandes infrastructures. {3.2.4, 3.4.3, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.4.2, 5.4.2, 6.2, 6.4.2, 6.8, encadré 6.1, encadré thématique 9, figure RID.5}

A.9.1 Aujourd'hui, l'attribution d'impacts affectant les populations côtières à l'élévation du niveau de la mer reste difficile dans la plupart des régions, étant donné que ces impacts ont été amplifiés par des facteurs humains non climatiques tels que la subsidence des terres (par exemple, liée au prélèvement d'eaux souterraines), la pollution, la dégradation des habitats, l'extraction de sable et de récifs (*degré de confiance élevé)*. {4.3.2., 4.3.3}

A.9.2 La protection des côtes par des ouvrages en dur tels que digues, murs longitudinaux et obstacles contre les forts déferlements liés aux tempêtes, est très répandue dans de nombreuses villes côtières et dans les deltas. Les approches écosystémiques et mixtes combinant écosystèmes et génie civil sont devenues de plus en plus populaires dans le monde entier. Le développement de remblais littoraux, c'est-à-dire le fait de gagner des terres en construisant vers la mer (terre-pleins, par exemple)

est pratiqué depuis longtemps dans les régions où il y a une population côtière dense et une pénurie de terres. Le recul stratégique, qui fait référence à la fin de la présence humaine dans une zone côtière, est également observé, mais se limite généralement à de petites communautés humaines ou bien est mis en œuvre pour créer des zones humides littorales. L'efficacité des réponses face à l'élévation du niveau de la mer est évaluée dans la figure RID.5. {3.5.3, 4.3.3, 4.4.2, 6.3.3, 6.9.1, encadré thématique 9}

RID.B Changements et Risques Projetés

Changements projetés dans les paramètres physiques[25]

B.1 Dans les projections, la perte de masse des glaciers dans le monde, le dégel du pergélisol et la diminution du manteau neigeux et de l'étendue de la banquise Arctique se poursuivent à court terme (2031–2050), à cause de l'augmentation de la température de l'air en surface (*degré de confiance élevé*), avec des conséquences inéluctables sur le débit des rivières et les aléas locaux (*degré de confiance élevé*). La perte de masse des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique projetée s'accélère tout au long du XXIe siècle et au-delà (*degré de confiance élevé*). Le rythme et l'ampleur de ces changements de la cryosphère devraient encore augmenter au cours de la seconde moitié du XXIe siècle dans un scénario de fortes émissions de gaz à effet de serre (*degré de confiance élevé*). De larges réductions des émissions de gaz à effet de serre au cours des prochaines décennies limiteraient les changements après 2050 (*degré de confiance élevé*). {2.2, 2.3, encadré thématique 6 du chapitre 2, 3.3, 3.4, figure RID.1, encadré RID.1}

B.1.1 La perte de masse projetée des glaciers (à l'exclusion des calottes glaciaires) entre 2015 et 2100 atteint 18 ± 7 % (fourchette *probable*) selon le RCP2.6 et 36 ± 11 % (fourchette *probable*) selon le RCP8.5, ce qui correspond à un apport de 94 ± 25 mm (fourchette *probable*) en équivalent niveau de la mer selon le RCP2.6 et de 200 ± 44 mm (fourchette *probable*) selon le RCP8.5 (*degré de confiance moyen*). Dans les régions où l'on trouve surtout des petits glaciers (Europe centrale, Caucase, nord de l'Asie, Scandinavie, Andes tropicales, Mexique, Afrique de l'Est et Indonésie), leur perte de masse devrait excéder 80 % d'ici à 2100 selon le RCP8.5 (*degré de confiance moyen*) et beaucoup de glaciers devraient disparaître quel que soit le niveau futur d'émissions (*degré de confiance très élevé*). {Encadré thématique 6 du chapitre 2, figure RID.1}

B.1.2 En 2100, la contribution projetée de la calotte glaciaire du Groenland à l'élévation du niveau moyen des mers atteint 0,07 m (0,04–0,12 m, fourchette *probable*) selon le RCP2.6 et 0,15 m (0,08–0,27 m, fourchette *probable*) selon le RCP8.5. Quant à la calotte glaciaire de l'Antarctique, la projection de sa contribution atteint 0,04 m en 2100 (0,01–0,11 m, fourchette *probable*) selon le RCP2.6 et 0,12 m (0,03–0,28 m, fourchette *probable*) selon le RCP8.5. Actuellement, le Groenland contribue davantage que l'Antarctique à l'élévation du niveau de la mer (*degré de confiance élevé*), mais l'Antarctique pourrait devenir un plus grand contributeur d'ici à la fin du XXIe siècle en cas de recul rapide (*degré de confiance faible*). Au-delà de 2100, l'écart grandissant entre la contribution du Groenland et de l'Antarctique à l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe selon le RCP8.5 aurait des conséquences marquées sur le rythme de l'élévation du niveau relatif de la mer dans l'hémisphère Nord. {3.3.1, 4.2.3, 4.2.5, 4.3.3, encadré thématique 8 du chapitre 3, figure RID.1}

B.1.3 La surface du manteau neigeux de la zone arctique à l'automne et au printemps devrait diminuer de 5 à 10 % à court terme (2031–2050) par rapport à 1986–2005, puis se stabiliser dans le scénario RCP2.6, mais subir une perte supplémentaire de 15 à 25 % d'ici à la fin du siècle dans le cas du scénario RCP8.5 (*degré de confiance élevé*). En haute montagne, l'épaisseur moyenne de neige en hiver à basse altitude diminuera *probablement* de 10 à 40 % en 2031–2050 par rapport à 1986–2005, quel que soit le scénario d'émissions (*degré de confiance élevé*). Pour la période 2081–2100, la baisse projetée est *probablement* de 10 à 40 % selon le RCP2.6 et de 50 à 90 % selon le RCP8.5. {2.2.2, 3.3.2, 3.4.2, figure RID.1}

[25] Le rapport utilise surtout les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 pour les raisons suivantes : ces scénarios représentent en grande partie la gamme évaluée pour les sujets qu'aborde le rapport, ils correspondent largement aux éléments disponibles dans la littérature scientifique, à partir des simulations CMIP5, et ils permettent une description cohérente des changements projetés. Les résultats de projections en réponse aux scénarios RCP4.5 et RCP6.0 ne sont pas disponibles pour toutes les questions examinées dans le rapport. {Encadré RID.1}

B.1.4 Un dégel généralisé du pergélisol est projeté au cours de ce siècle (*degré de confiance très élevé*) et au-delà. D'ici à 2100, le pergélisol de surface (jusqu'à 3 à 4 m de profondeur) devrait perdre 24 ± 16 % (fourchette *probable*) de sa superficie dans le cas du scénario RCP2.6 et 69 ± 20 % (fourchette *probable*) selon le RCP8.5. Le scénario RCP8.5 se traduit d'ici à 2100 par le rejet cumulé dans l'atmosphère de dizaines à centaines de milliards de tonnes de carbone (GtC) sous forme de CO_2[26] et de méthane, stockés dans le pergélisol, ce qui est susceptible d'exacerber le changement climatique (*degré de confiance moyen*). L'effet de la libération de carbone dans les zones de pergélisol est réduit pour les scénarios d'émissions les plus basses (*degré de confiance élevé*). Le méthane ne représente qu'une faible part de tout le rejet additionnel de carbone, mais il peut jouer un rôle important en raison de son fort potentiel de réchauffement. L'augmentation de la croissance des plantes devrait permettre de reconstituer en partie le carbone stocké dans le sol, mais ne sera pas suffisante pour compenser les rejets de carbone à long terme (*degré de confiance moyen*). {2.2.4, 3.4.2, 3.4.3, figure RID.1, encadré thématique 5 du chapitre 1}

B.1.5 Dans de nombreuses zones de haute montagne, il est projeté que le recul des glaciers et le dégel du pergélisol continueront à réduire la stabilité des versants, tandis que le nombre et la superficie des lacs glaciaires continueront à augmenter (*degré de confiance élevé*). Il est projeté que les crues dues aux vidanges brutales de lacs glaciaires ou aux événements de pluie sur la neige, les glissements de terrain et les avalanches surviendront aussi dans de nouveaux secteurs ou à différentes périodes de l'année (*degré de confiance élevé*). {2.3.2}

B.1.6 Il est projeté que le débit des rivières dans les bassins versants de haute montagne à régime nivo-glaciaire ou nival changera quels que soient les scénarios d'émissions considérés (*degré de confiance très élevé*) avec comme conséquences un débit moyen accru en hiver (*degré de confiance élevé)* et des pics printaniers plus précoces (*degré de confiance très élevé*). Quel que soit le scénario d'émissions, la contribution hydrologique annuelle et estivale provenant des glaciers devrait culminer avant la fin du XXIe siècle (*degré de confiance élevé*), par exemple vers le milieu du siècle dans les hautes montagnes d'Asie, pour décliner ensuite. Dans les régions à faible couverture glaciaire (Andes tropicales, Alpes européennes, etc.), la plupart des glaciers ont déjà franchi ce point culminant (*degré de confiance élevé*). Le déclin de la contribution hydrologique glaciaire projeté d'ici à 2100 (RCP8.5) correspond à une diminution de 10 % ou plus du débit des rivières et fleuves, au moins au cours d'un mois de la saison de fonte, dans plusieurs grands bassins versants, surtout dans les hautes montagnes d'Asie pendant la saison sèche (*degré de confiance faible*). {2.3.1}

B.1.7 D'après les projections, le déclin de la glace de mer Arctique se poursuivra jusqu'au milieu du siècle, avec des différences par la suite en fonction de l'ampleur du réchauffement planétaire : pour un réchauffement stabilisé à 1,5 °C, la probabilité annuelle d'absence de glaces de mer en septembre est de 1 % environ à la fin du siècle, chiffre qui passe à 10–35 % avec un réchauffement stabilisé à 2 °C (*degré de confiance élevé*). Un *degré de confiance faible* est associé aux projections d'évolution de la glace de mer Antarctique. {3.2.2, figure RID.1}

B.2 Dans les projections, l'océan connaît au XXIe siècle une transition vers des conditions sans précédent, caractérisées par des températures plus élevées (*quasiment certain*), une stratification plus marquée des couches océaniques de surface (*très probable*), une acidification continue en surface (*quasiment certain*), une perte d'oxygène (*degré de confiance moyen*) et une altération de la production primaire nette (*degré de confiance faible*). Il est projeté que les vagues de chaleur marines (*degré de confiance très élevé*) et les épisodes El Niño et La Niña extrêmes (*degré de confiance moyen*) seront plus fréquents. La circulation méridienne de retournement de l'Atlantique devrait s'affaiblir (*très probable*). Le rythme et l'ampleur des changements projetés seront réduits dans les scénarios de baisse d'émissions de gaz à effet de serre (*très probable*). {3.2, 5.2, 6.4, 6.5, 6.7, encadré 5.1, figures RID.1, RID.3}

B.2.1 L'océan continuera de se réchauffer tout au long du XXIe siècle (*quasiment certain*). D'ici à 2100, les premiers 2 000 m de l'océan devraient absorber cinq à sept fois plus de chaleur, selon le RCP8.5 (deux à quatre fois plus selon le RCP2.6), que le cumul de chaleur absorbé depuis 1970 (*très probable*). En 2081–2100, la stratification moyenne annuelle[19] dans les premiers 200 m, entre 60°S et 60°N excède celle de la période 1986–2005 de 12 à 30 % dans le cas du RCP8.5, et de 1 à 9 % dans le cas du RCP2.6 (*très probable*), inhibant les flux verticaux de nutriments, de carbone et d'oxygène. {5.2.2, figure RID.1}

---

[26] À titre de comparaison, les émissions anthropiques totales de CO_2 se situaient à 10,8 ± 0,8 GtC.an^{-1} (39,6 ± 2,9 GtCO_2.an^{-1}) en moyenne pendant la période 2008–2017. Les émissions anthropiques totales de méthane se situaient à 0,35 ± 0,01 Gt CH_4.an^{-1} en moyenne pendant la période 2003–2012. {5.5.1}

B.2.2 Dans le cas du scénario RCP8.5, la teneur en oxygène de l'océan (*degré de confiance moyen*), la concentration en nitrates de la couche supérieure (*degré de confiance moyen*), la production primaire nette (*degré de confiance faible*) et l'exportation de carbone (*degré de confiance moyen*) diminuent dans les projections, à l'échelle du globe, de 3–4 %, 9–14 %, 4–11 % et 9-16 % respectivement (fourchettes *très probables*) en 2081–2100 par rapport à 2006–2015. Dans le cas du scénario RCP2.6, les changements anticipés en 2081–2100 à l'échelle du globe sont moindres pour ce qui concerne la désoxygénation (*très probable*), la disponibilité en nutriments (*à peu près aussi probable qu'improbable*) et la production primaire nette (*degré de confiance élevé*). {5.2.2, encadré 5.1, figures RID.1, RID.3}

B.2.3 Il est *quasiment certain* que l'absorption continue de carbone par l'océan jusqu'en 2100 exacerbera l'acidification océanique. Le pH de surface en haute mer devrait être inférieur d'environ 0,3 unité pH en 2081–2100 par rapport à 2006–2015 pour le scénario RCP8.5 (*quasiment certain*). Ce scénario RCP8.5 s'accompagne de risques élevés pour des espèces clés formant leur coquille à partir d'aragonite, car le seuil de stabilité de la formation d'aragonite sera dépassé tout au long de l'année dans les océans polaires et subpolaires en 2081–2100 (*très probable*). Ces conditions seraient évitées au cours du siècle actuel dans le cas du RCP2.6 (*très probable*), mais certains systèmes de remontée d'eau profonde dans les marges Est devraient rester vulnérables (*degré de confiance élevé*). {3.2.3, 5.2.2, encadré 5.1, encadré 5.3, figure RID.1}

B.2.4 Des conditions climatiques sans précédent depuis la période préindustrielle sont en train de se mettre en place dans l'océan, amplifiant les risques pour les écosystèmes de haute mer. Les signaux de réchauffement et l'acidification en surface ont déjà émergé au cours de la période historique (*très probable*). Une désoxygénation entre 100 et 600 m de profondeur devrait émerger sur 59 à 80 % de la superficie de l'océan d'ici 2031–2050 pour le scénario RCP8.5 (*très probable*). Les signaux des cinq principaux facteurs d'évolution des écosystèmes marins (réchauffement et acidification en surface, désoxygénation, variation de la teneur en nitrates et modification de la production primaire nette) devraient tous émerger avant 2100 sur plus de 60 % de la superficie de l'océan dans le cas du RCP8.5, et sur plus de 30 % de cette superficie dans le cas du RCP2.6 (*très probable*). {Annexe I : Glossaire, encadré 5.1, figure 1 de l'encadré 5.1}

B.2.5 Il est projeté que les vagues de chaleur marines continueront d'augmenter en fréquence, durée, étendue spatiale et intensité (température maximale) (*degré de confiance très élevé*). Selon les modèles climatiques, la fréquence des vagues de chaleur marines devrait être multipliée par cinquante environ en 2081–2100 dans le cas du RCP8.5 et par vingt dans le cas du RCP2.6, par rapport à la période 1850–1900 (*degré de confiance moyen*). Les augmentations de fréquence les plus fortes sont projetées dans l'océan Arctique et les océans tropicaux (*degré de confiance moyen*). Dans le cas du RCP8.5, l'intensité des vagues de chaleur marines devrait augmenter d'un facteur dix en 2081–2100 par rapport à 1850–1900 (*degré de confiance moyen*). {6.4, figure RID.1}

B.2.6 Dans les projections, il est *probable* que les épisodes El Niño et La Niña extrêmes augmenteront en fréquence au XXI^{e} siècle et il est *probable* qu'ils intensifieront les aléas existants, entraînant des conditions plus sèches ou bien plus humides dans plusieurs régions du globe. Les épisodes El Niño extrêmes devraient survenir à peu près deux fois plus souvent au XXI^{e} siècle qu'au XX^{e} siècle, tant dans le cas du RCP2.6 que pour le RCP8.5 (*degré de confiance moyen*). Les projections indiquent également une augmentation de la fréquence d'occurrence d'événements extrêmes du dipôle de l'océan Indien (*degré de confiance faible*). {6.5, figures 6.5, 6.6}

B.2.7 Dans les projections, la circulation méridienne de retournement en Atlantique s'affaiblit au XXI^{e} siècle quels que soient les RCP (*très probable*), mais un effondrement est *très improbable* (*degré de confiance moyen*). Selon les projections des modèles CMIP5, un arrêt de cette circulation d'ici à 2300 est *aussi probable qu'improbable* avec les scénarios d'émissions élevées, et *très improbable* avec les scénarios d'émissions faibles (*degré de confiance moyen*). Tout affaiblissement prononcé de la circulation méridienne de retournement en Atlantique se traduirait par une productivité marine réduite dans l'Atlantique Nord (*degré de confiance moyen*), davantage de tempêtes en Europe du Nord (*degré de confiance moyen*), une diminution des pluies estivales dans le Sahel (*degré de confiance élevé*) et en Asie du Sud (*degré de confiance moyen*), un nombre réduit de cyclones tropicaux dans l'Atlantique (*degré de confiance moyen*) et une accentuation de la hausse du niveau de la mer le long de la côte nord-est de l'Amérique du Nord (*degré de confiance moyen*). Ces changements se superposeraient aux effets de réchauffement planétaire. {6.7, figures 6.8–6.10}

B.3 Le niveau de la mer continue de s'élever à un rythme qui s'accélère. Les épisodes de niveaux marins extrêmes, historiquement rares (un évènement par siècle), devraient survenir fréquemment (un événements par an au minimum) dans nombre d'endroits d'ici à 2050 selon tous les scénarios RCP, et en particulier dans les régions tropicales (*degré de confiance élevé*). La fréquence croissante des hauts niveaux marins peut avoir des impacts graves dans beaucoup d'endroits exposés (*degré de confiance élevé*). Dans les projections, l'élévation du niveau de la mer se poursuit après 2100 quel que soit le scénario RCP. Dans le cas d'un scénario d'émissions élevées (RCP8.5), les projections de hausse du niveau moyen global des mers en 2100 excèdent celles du cinquième Rapport d'évaluation en raison d'une contribution plus grande de la calotte glaciaire de l'Antarctique (*degré de confiance moyen*). Au cours des siècles suivants, l'élévation du niveau de la mer devrait se produire à un rythme dépassant plusieurs centimètres par an dans le cas du RCP8.5, conduisant à une hausse de plusieurs mètres (*degré de confiance moyen*), tandis que celle-ci serait contenue aux alentours d'un mètre en 2300 dans le cas du RCP2.6 (*degré de confiance faible*). Les niveaux marins extrêmes et les aléas côtiers seront exacerbés par l'intensification projetée de l'intensité des cyclones tropicaux et de leurs précipitations (*degré de confiance élevé*). Les changements projetés pour les vagues et les marées varient selon les régions et pourront aggraver ou atténuer ces aléas, selon l'endroit considéré (*degré de confiance moyen*). {Encadré thématique 5 du chapitre 1, encadré thématique 8 du chapitre 3, 4.1, 4.2, 5.2.2, 6.3.1 ; figures RID.1, RID.4, RID.5}

B.3.1 Dans le cas du RCP2.6, l'élévation moyenne projetée du niveau de la mer à l'échelle du globe atteint 0,39 m (0,26–0,53 m, fourchette *probable*) en 2081–2100 et 0,43 m (0,29–0,59 m, fourchette *probable*) en 2100 par rapport à 1986–2005. Dans le cas du RCP8.5, elle est de à 0,71 m (0,51–0,92 m, fourchette *probable*) en 2081–2100 et atteint 0,84 m (0,61–1,10 m, fourchette *probable*) en 2100. Les projections de l'élévation du niveau moyen de la mer en 2100 dans le cas du RCP8.5 sont revues à la hausse de 0,1 m par rapport aux estimations du cinquième Rapport d'évaluation et la fourchette *probable* va au-delà d'1 m en 2100, la perte de glace de la calotte Antarctique ayant été revue à la hausse (*degré de confiance moyen*). L'incertitude des valeurs à la fin du siècle est principalement due à la contribution des calottes glaciaires, en particulier celle de l'Antarctique. {4.2.3, figures RID.1, RID.5}

B.3.2 Les projections du niveau de la mer présentent des écarts régionaux par rapport à la moyenne globale. Divers processus non liés à l'évolution récente du climat, telle la subsidence locale causée par des phénomènes naturels et certaines activités humaines, jouent un rôle majeur dans la variation du niveau marin relatif à la côte (*degré de confiance élevé*). Même si l'importance relative de l'élévation du niveau de la mer due au climat croît avec le temps dans les projections, il est indispensable de prendre en compte les processus locaux dans les projections de montée des mers et leurs impacts (*degré de confiance élevé*). {RID A3.4, 4.2.1, 4.2.2, figure RID.5}

B.3.3 Il est projeté que le rythme d'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe atteindra, en 2100, 15 mm.an^{-1} en moyenne (10–20 mm.an^{-1}, fourchette *probable*) dans le cas du RCP8.5 et dépassera plusieurs centimètres par an au cours du XXII^{e} siècle. Il atteindra 4 mm.an^{-1} (2–6 mm.an^{-1}, fourchette *probable*) en 2100 dans le cas du RCP2.6. Les études de modélisation indiquent une montée des eaux de plusieurs mètres d'ici à 2300 (2,3–5,4 m et 0,6–1,07 m dans les cas des RCP8.5 et RCP2.6, respectivement) (*degré de confiance faible*), soulignant l'importance de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter l'ampleur de la montée du niveau des mers. Les processus qui contrôlent l'évolution temporelle du recul des plateformes de glace et l'ampleur de l'instabilité des calottes glaciaires pourraient accroître la contribution de l'Antarctique à la hausse du niveau de la mer à des valeurs nettement supérieures à la fourchette *probable* à l'horizon de fin de ce siècle et à plus long terme (*degré de confiance faible*). Compte-tenu des conséquences de l'élévation du niveau de la mer en cas d'effondrement d'une partie de la calotte glaciaire Antarctique, ce risque d'impact majeur mérite d'être considéré avec attention. {Encadré thématique 5 du chapitre 1, encadré thématique 8 du chapitre 3, 4.1, 4.2.3}

B.3.4 L'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe augmentera la fréquence des épisodes de niveaux marins extrêmes pour la plupart des littoraux étudiés dans ce rapport. Selon les projections correspondant à tous les scénarios RCP, les niveaux locaux de la mer qui n'étaient atteints qu'une fois par siècle (événements historiques centennaux) seront récurrents tous les ans au moins dans la plupart des endroits d'ici à 2100 (*degré de confiance élevé*). Beaucoup de mégapoles et de petites îles (dont les petits États insulaires en développement) avec des littoraux de basse altitude subiront ces événements historiques centennaux annuellement ou plus fréquemment d'ici à 2050 dans le cas des RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. L'année où l'événement centennal historique devient un événement annuel dans les latitudes moyennes se produit le plus tôt dans le cas du scénario RCP8.5, puis dans RCP4.5 et le plus tard pour le RCP2.6. La fréquence croissante des niveaux marins extrêmes peut provoquer des impacts graves en beaucoup d'endroits, selon leur degré d'exposition (*degré de confiance élevé*). {4.2.3, 6.3, figures RID.4, RID.5}

B.3.5  Dans les projections, la hauteur des vagues importantes (hauteur moyenne, du creux à la crête, du tiers le plus élevé de toutes les vagues) augmente dans l'océan Austral et la partie tropicale du Pacifique Est (*degré de confiance élevé*), ainsi que dans la mer Baltique (*degré de confiance moyen*), et diminue dans l'Atlantique Nord et la mer Méditerranée, dans le cas du RCP8.5 (*degré de confiance élevé*). L'amplitude et la configuration des marées à la côte changeront sous l'effet du niveau plus élevé de la mer et selon les mesures d'adaptation prises dans ces zones (*très probable*). L'évolution des paramètres des vagues due aux nouvelles conditions météorologiques et l'évolution des marées due à un niveau marin plus élevé pourraient aggraver ou atténuer localement les aléas côtiers (*degré de confiance moyen*). {6.3.1, 5.2.2}

B.3.6  Dans les projections, l'intensité moyenne des cyclones tropicaux, la proportion de cyclones de catégorie 4 ou 5 et les taux moyens de précipitation qui leurs sont associés augmentent pour tout réchauffement de 2°C par rapport à toute période de référence (*degré de confiance moyen*). L'élévation du niveau moyen de la mer provoquera une hausse des niveaux marins extrêmes liés aux cyclones tropicaux (*degré de confiance très élevé*). Les aléas côtiers seront aggravés par l'augmentation de l'intensité moyenne, de l'amplitude des surcôtes liées aux tempêtes et des taux de précipitation associés aux cyclones tropicaux. Les projections d'augmentations sont plus grandes dans le cas du RCP8.5 que dans le cas du RCP2.6, du milieu du siècle environ jusqu'à 2100 (*degré de confiance moyen*). Un degré de *confiance faible* est associé aux changements futurs de fréquence des cyclones tropicaux à l'échelle mondiale. {6.3.1}

Risques projetés pour les écosystèmes

B.4 L'évolution future de la cryosphère terrestre continuera de transformer les écosystèmes d'eau douce et terrestres dans les zones de haute montagne et les régions polaires, avec des déplacements marqués de la répartition des espèces entraînant une modification de la structure et du fonctionnement des écosystèmes et, à terme, la perte d'une biodiversité unique au monde (*degré de confiance moyen*). Les feux de forêt devraient augmenter nettement jusqu'à la fin du siècle dans la plupart des régions de toundra et de taïga, ainsi que dans certaines zones montagneuses (*degré de confiance moyen*). {2.3.3, encadré 3.4, 3.4.3}

B.4.1  Dans les régions de haute montagne, la poursuite de la migration en hauteur des espèces de moyenne altitude, la contraction des habitats et une mortalité accrue entraîneront un déclin de nombreuses espèces, notamment celles qui dépendent des glaciers ou du manteau neigeux (*degré de confiance élevé*), allant jusqu'à une disparition locale, voire mondiale, d'espèces (*degré de confiance moyen*). La sauvegarde des espèces de montagne et le maintien des services écosystémiques dépendent de mesures adéquates de protection et d'adaptation (*degré de confiance élevé*). {2.3.3}

B.4.2  Sur les terres arctiques, la disparition d'une biodiversité unique au monde est projetée car il existe peu de refuges pour certaines espèces du Haut-Arctique et par conséquent ces espèces sont en concurrence avec des espèces issues de zones plus tempérées (*degré de confiance moyen*). Les arbustes et arbres devraient s'étendre pour couvrir 24 à 52 % de la toundra de l'Arctique d'ici à 2050 (*degré de confiance moyen*). La forêt boréale progresserait sur sa bordure nord et diminuerait sur sa bordure sud, où elle serait remplacée par des zones boisées et arbustives à plus faible quantité de biomasse (*degré de confiance moyen*). {3.4.3, encadré 3.4}

B.4.3  Le dégel du pergélisol et la réduction de l'enneigement auront une incidence sur l'hydrologie et les feux de forêt dans les montagnes et dans l'Arctique, avec des impacts sur la faune et la végétation (*degré de confiance moyen*). Environ 20 % du pergélisol terrestre de l'Arctique est vulnérable à un dégel abrupt et un affaissement du sol, ce qui, dans les projections, devrait étendre de plus de 50 % la superficie des petits lacs d'ici à 2100 dans le cas du RCP8.5 (*degré de confiance moyen*). Bien que le cycle de l'eau s'intensifie dans les projections pour la région arctique, à la fois pour la hausse des précipitations, de l'évapotranspiration et du débit des rivières vers l'océan Arctique, le recul de l'enneigement et du pergélisol pourrait provoquer un assèchement du sol, avec des conséquences sur la productivité et des perturbations des écosystèmes (*degré de confiance moyen*). Selon les projections, les feux de forêt augmenteront jusqu'à la fin du siècle dans la plupart des régions de toundra et de taïga ainsi que dans certaines zones montagneuses, tandis que les interactions du climat et des déplacements de la végétation influeront sur l'intensité et la fréquence des incendies (*degré de confiance moyen*). {2.3.3, 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, RID B1}

B.5 Une diminution de la biomasse totale des populations d'animaux marins, de leur production et du potentiel de capture des pêcheries, ainsi qu'un changement dans la composition des espèces sont projetés au cours du XXI[ème] siècle dans tous les écosystèmes océaniques, depuis la surface jusqu'au fond des mers, quels que soient les scénarios d'émissions (*degré de confiance moyen*). Ce déclin devrait être le plus rapide et le plus prononcé dans les régions tropicales (*degré de confiance élevé*), alors que les impacts sont divers dans les régions polaires (*degré de confiance moyen*) et augmentent pour les scénarios de fortes émissions. L'acidification des océans (*degré de confiance moyen*), la perte d'oxygène (*degré de confiance moyen*) et la réduction de l'étendue de la glace de mer (*degré de confiance moyen*) ainsi que les conséquences des activités humaines autres que les rejets de gaz à effet de serre (*degré de confiance moyen*) peuvent exacerber ces conséquences du réchauffement sur les écosystèmes. {3.2.3, 3.3.3, 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4, 5.4.1, figure RID.3}

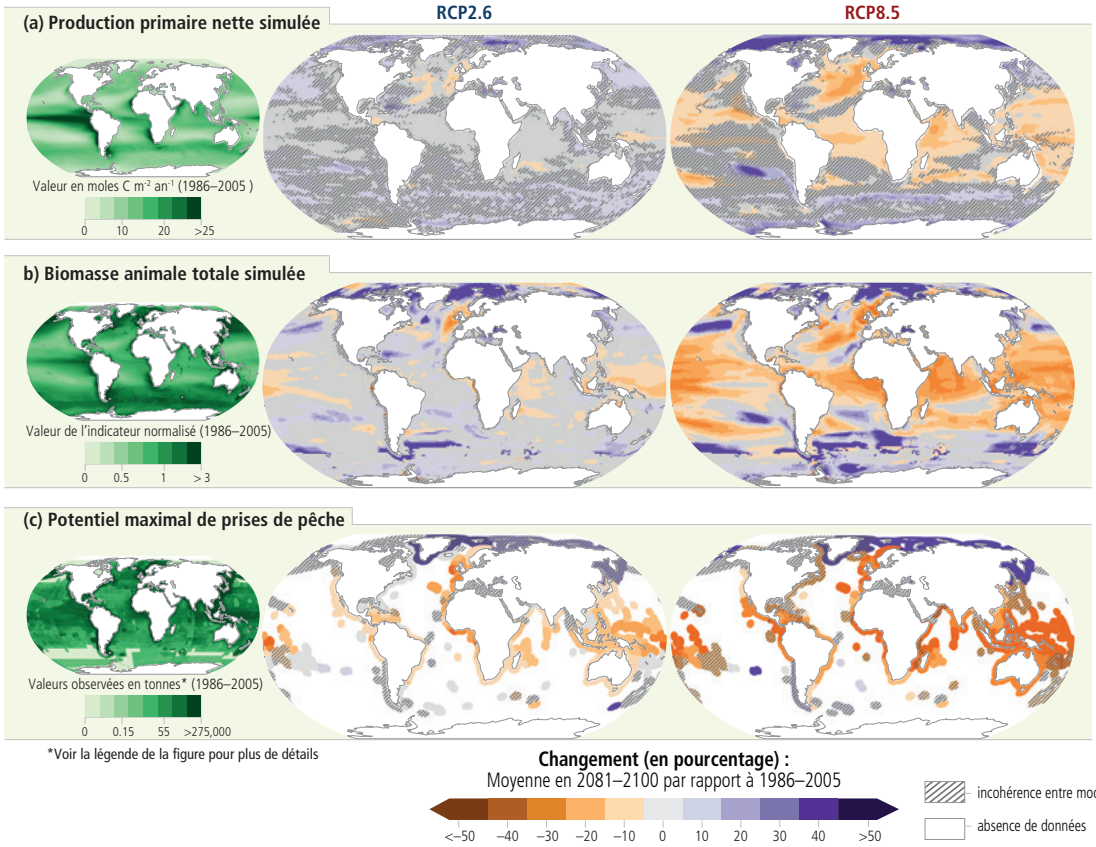
B.5.1 Le réchauffement de l'océan et les changements projetés de la production primaire nette modifieront la biomasse, la production et la structure en communauté des écosystèmes marins. La biomasse mondiale de la faune marine sur tout le réseau trophique chute de 15,0 ± 5,9 % (fourchette *très probable*) et le potentiel maximal de pêche baisse de 20,5–24,1 % d'ici à la fin du XXI[e] siècle par rapport à la période 1986–2005 dans les projections correspondant au scénario RCP8.5 (*degré de confiance moyen*). Dans les projections, ces changements sont *très probablement* trois ou quatre fois plus importants dans le cas du RCP8.5 que dans le cas du RCP2.6. {3.2.3, 3.3.3, 5.2.2, 5.2.3, 5.4.1, figure RID.3}

B.5.2 Dans les projections, l'apport réduit en nutriments lié à une stratification accrue induit dans les eaux tropicales un déclin de la production primaire nette de 7 à 16 % (fourchette *très probable*) pour le RCP8.5 en 2081–2100 (*degré de confiance moyen*). Dans les régions tropicales, les projections de recul de la biomasse animale marine et de la production sont plus importantes qu'en moyenne planétaire, quel que soit le scénario d'émissions, au cours du XXI[e] siècle (*degré de confiance élevé*). Le réchauffement et la modification de la banquise stimulent la production primaire nette dans les eaux de l'Arctique (*degré de confiance moyen*) et de l'Antarctique (*degré de confiance faible*), l'apport de nutriments étant modifié par le déplacement des zones de remontée d'eau profonde et de stratification dans les projections. À l'échelle mondiale, les projections indiquent une diminution du flux de sédimentation de matière organique provenant de la couche supérieure de l'océan, en grande partie en raison des changements de la production primaire nette (*degré de confiance élevé*). Il est projeté, dans le cas du RCP8.5, que 95 % ou plus des grands fonds marins (3 000–6 000 m de profondeur) et des écosystèmes de coraux d'eau froide de profondeur connaîtront un déclin de la biomasse benthique (*degré de confiance moyen*). {3.2.3, 5.2.2, 5.2.4, figure RID.1}

B.5.3 Il est projeté que le réchauffement, l'acidification de l'océan, la diminution de l'étendue saisonnière de la banquise et le recul continu de la glace de mer pluriannuelle auront un impact sur les écosystèmes marins polaires par leurs effets directs et indirects sur les habitats, les populations et leur viabilité (*degré de confiance moyen*). Les espèces marines de l'Arctique, dont les mammifères, les oiseaux et les poissons, verront leur aire de répartition rétrécir alors que celle de plusieurs communautés de poissons subarctiques s'étendra, accentuant les pressions subies par les espèces du Haut-Arctique (*degré de confiance moyen*). Il est projeté que l'habitat du krill antarctique dans l'océan Austral, espèce cruciale pour l'alimentation des manchots, phoques et baleines, se contractera vers le sud dans le cas des scénarios RCP2.6 et RCP8.5 (*degré de confiance moyen*). {3.2.2, 3.2.3, 5.2.3}

B.5.4 Il est projeté que le réchauffement de l'océan, la perte d'oxygène, l'acidification et la diminution des flux de carbone organique de la surface vers l'océan profond seront néfastes pour les coraux d'eau froide qui forment des habitats soutenant une diversité biologique riche, du fait en partie d'une calcification moindre, de la dissolution accrue des squelettes et de la bioérosion (*degré de confiance moyen*). La vulnérabilité et les risques sont les plus élevés dans les endroits et aux moments où la température et la teneur en oxygène locales atteignent des niveaux en dehors de la fourchette de tolérance de ces espèces (*degré de confiance moyen*). {Encadré 5.2, figure RID.3}

Changements, impacts et risques projetés pour les écosystèmes océaniques du fait du changement climatique



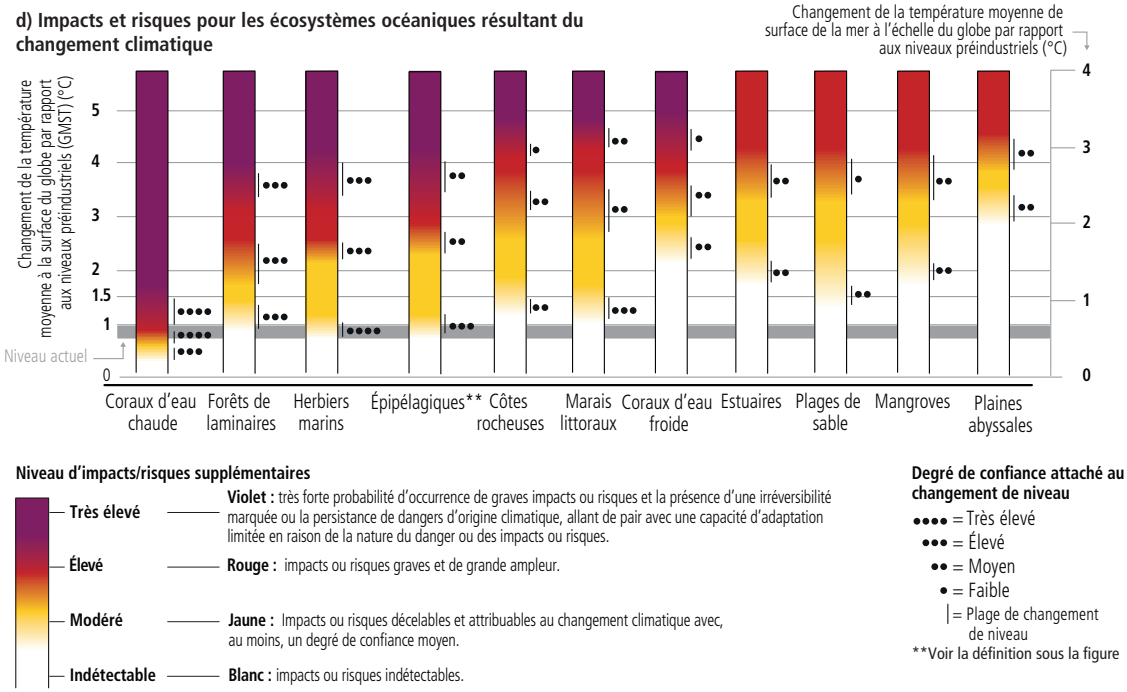


Figure RID.3 | Projections des changements, impacts et risques dans les régions et les écosystèmes océaniques :

Figure RID.3 (continued): **(a)** Production primaire nette intégrée sur la colonne d'eau (selon CMIP5[27]) ; **(b)** Biomasse animale totale (intégrée sur la colonne d'eau, incluant poissons et invertébrés, selon FISHMIP[28]) ; **(c)** Potentiel maximal de pêche ; **(d)** Impacts et risques pour les écosystèmes côtiers et de pleine mer. Les trois graphiques de gauche illustrent les valeurs moyennes simulées (a, b) et observées (c) dans le passé récent (1986–2005), ceux du centre et de droite présentent les changements projetés (%) en 2081–2100 par rapport au passé récent avec, respectivement, des scénarios bas (RCP2.6) et élevé (RCP8.5) d'émissions de gaz à effet de serre {encadré RID.1}. La biomasse animale totale dans le passé récent (b, graphique de gauche) représente la valeur projetée de biomasse animale totale pour chaque pixel spatial relativement à la moyenne mondiale. c) *Capture moyenne observée dans le passé récent (selon la base de données mondiale sur la pêche « *Sea Around Us* ») ; variation projetée du potentiel maximal de capture dans les eaux du plateau continental selon les résultats moyens de deux modèles des écosystèmes marins et des pêches. Zones d'incohérence des modèles : les secteurs hachurés délimitent les régions où le désaccord quant au sens du changement concerne plus de trois projections de modèles sur dix (a et b), un modèle sur deux (c). Bien que les régions arctique et antarctique ne soient pas hachurées, les changements projetés dans l'Arctique et l'Antarctique concernant b) la biomasse animale totale et c) le potentiel de pêche sont affectés d'un *degré de confiance faible* étant donné les incertitudes associées à la modélisation de multiples facteurs en interaction et à la réponse des écosystèmes. Les projections représentées en b) et c) résultent des changements dans les propriétés physiques et biogéochimiques de l'océan telles que la température, la teneur en oxygène et la production primaire nette projetés par les modèles du système Terre dans le CMIP5. **La zone épipélagique est la couche supérieure de l'océan, jusqu'à moins de 200 m, qui reçoit assez de lumière pour la photosynthèse. d) Évaluation des risques pour les écosystèmes côtiers et de pleine mer d'après les impacts observés et projetés du climat sur la structure, le fonctionnement et la biodiversité des écosystèmes. Les impacts et les risques sont présentés en fonction de l'évolution de la température moyenne à la surface du globe par rapport au niveau préindustriel. Comme les risques et les impacts sont évalués en fonction de la température moyenne de surface de la mer à l'échelle du globe, les valeurs correspondantes sont indiquées[29]. L'évaluation des transitions de risque est décrite dans les sections 5.2, 5.2.5, 5.3 et 5.3.7 du chapitre 5, le supplément SM5.3, le tableau SM5.6, le tableau SM5.8 et d'autres parties du rapport. La figure montre les risques évalués selon le niveau approximatif de réchauffement et l'aggravation des risques liés au climat dans l'océan : réchauffement océanique, acidification, désoxygénation, hausse de la stratification de densité, changement des flux de carbone, élévation du niveau de la mer et augmentation de la fréquence et/ou de l'intensité des phénomènes extrêmes. L'évaluation tient compte de la capacité naturelle d'adaptation des écosystèmes, de leur exposition et de leur vulnérabilité. Les niveaux d'impact et de risque ne prennent en considération ni les stratégies de réduction des risques telles que les interventions humaines, ni les changements futurs dans les facteurs non climatiques. Les risques qui pèsent sur les écosystèmes sont évalués en considérant les aspects biologiques, biogéochimiques, géomorphologiques et physiques. Les risques plus élevés liés aux effets combinés des aléas climatiques comprennent la perte d'habitat et de biodiversité, la modification de la composition et des aires de répartition des espèces et les impacts/risques pour la structure et le fonctionnement des écosystèmes, dont les variations dans la densité et la biomasse animale/végétale, la productivité, les flux de carbone et le transport sédimentaire. Les publications scientifiques ont été rassemblées et les données en ont été extraites sous forme de tableau de synthèse pour procéder à l'évaluation. Un processus d'élicitation entre experts en plusieurs étapes a eu lieu avec une évaluation indépendante pour déterminer ces seuils, et une discussion finale pour parvenir à un consensus. Davantage de renseignements sur les méthodes et les textes sous-jacents sont fournis dans les sections 5.2 et 5.3 et le supplément du chapitre 5. {3.2.3, 3.2.4, 5.2, 5.3, 5.2.5, 5.3.7, SM5.6, SM5.8, figure 5.16, tableau CCB1 de l'encadré thématique 1 du chapitre 1}

B.6 Les risques d'impacts graves sur la biodiversité, la structure et la fonction des écosystèmes côtiers seront plus grands avec les températures plus élevées liées aux scénarios d'émissions fortes, que dans les scénarios de baisses d'émissions, au XXI^e^ siècle et au-delà. Parmi les projections de réponses des écosystèmes figurent la perte d'habitats et de la diversité des espèces, et la dégradation des fonctions des écosystèmes. La capacité d'ajustement et d'adaptation des organismes et des écosystèmes est meilleure dans le cas des scénarios avec des émissions plus faibles (*degré de confiance élevé*). Les écosystèmes fragiles tels les herbiers marins et les forêts de laminaires seront gravement menacés si le réchauffement planétaire excède 2 °C par rapport au niveau préindustriel, du fait de la combinaison de multiples aléas liés au climat (*degré de confiance élevé*). Les coraux d'eau chaude sont déjà exposés à un risque élevé et le passage à un risque très élevé surviendrait même si le réchauffement planétaire était contenu à 1,5 °C (*degré de confiance très élevé*). {4.3.3, 5.3, 5.5, figure RID.3}

B.6.1 Tous les écosystèmes côtiers évalués sont confrontés à un niveau de risque projeté grandissant, qui passe d'ici à 2100 d'un niveau modéré à élevé dans le cas du RCP2.6 et atteint un niveau élevé à très élevé dans le cas du RCP8.5. Les écosystèmes intertidaux des rivages rocheux subissent un risque très élevé d'ici à 2100 dans le cas du RCP8.5 (*degré de confiance moyen*), car ils sont exposés au réchauffement, surtout pendant les vagues de chaleur marines, ainsi qu'à l'acidification, l'élévation du niveau de la mer, la perte d'espèces calcifiantes et de biodiversité (*degré de confiance élevé*). L'acidification des eaux met ces écosystèmes à l'épreuve et limite encore davantage leur adéquation à leur habitat (*degré de confiance moyen*), leur capacité de rétablissement étant inhibée par une calcification réduite et une bioérosion accrue. Le déclin des forêts de laminaires dû au réchauffement se poursuivra dans les zones tempérées, surtout sous l'effet de l'intensification projetée des vagues de chaleur marines, avec un risque élevé de disparition locale dans le cas du RCP8.5 (*degré de confiance moyen*). {5.3, 5.3.5, 5.3.6, 5.3.7, 6.4.2, figure RID.3}

B.6.2 Les herbiers marins, les marais salés et leur stockage de carbone sont soumis à un risque modéré pour un réchauffement planétaire de 1,5 °C, et qui croît avec la hausse des températures (*degré de confiance moyen*). À l'échelle du globe, il est projeté que 20 à 90 % des zones humides côtières actuelles disparaîtront d'ici à 2100, ces estimations variant selon le niveau de montée du niveau de la mer, les particularités régionales et le types de zones humides, celles-ci étant particulièrement vulnérables lorsque la progression verticale est déjà restreinte par un apport réduit en nutriments et lorsque la migration vers l'intérieur des terres est elle-même contrainte par une topographie abrupte ou par l'artificialisation du littoral (*degré de confiance élevé*). {4.3.3, 5.3.2, figure RID.3, RIDA6.1}

---

27 La production primaire nette est estimée à partir de la cinquième phase du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP5).

28 La biomasse animale totale est tirée du Projet de comparaison de modèles des écosystèmes marins et des pêches (FISHMIP).

29 La conversion de la température moyenne à la surface du globe en température de surface de la mer est faite en utilisant un coefficient de 1,44 calculé à partir de leurs changements dans un ensemble de simulations pour le scénario RCP8.5 ; ce coefficient est associé à une incertitude d'environ 4 % due aux différences entre les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. {Tableau RID.1}

B.6.3 Selon les projections, le réchauffement de l'océan, l'élévation du niveau de la mer et la modification des marées entraîneront une progression de la salinisation et de l'hypoxie dans les estuaires (*degré de confiance élevé*), avec des risques élevés pour certains biotes et entraînant une migration, une survie moindre et une extinction locale dans le cas de scénarios d'émissions élevées (*degré de confiance moyen*). Ces impacts seront plus prononcés dans les estuaires les plus vulnérables car peu profonds, en proie à l'eutrophisation et caractérisés par une faible amplitude de marée, notamment dans les régions tempérées et aux latitudes élevées (*degré de confiance moyen*). {5.2.2., 5.3.1, figure RID.3}

B.6.4 Pratiquement tous les récifs coralliens d'eau chaude vont subir un recul notable de leur superficie et des extinctions locales, même si le réchauffement planétaire est contenu à 1,5 °C (*degré de confiance élevé*). Les coraux restants devraient être différents des récifs actuels par leur composition et leur diversité (*degré de confiance très élevé*). {5.3.4, 5.4.1, figure RID.3}

Risques projetés pour les populations humaines et les services écosystémiques

B.7 Il est projeté que les changements à venir de la cryosphère affecteront les ressources en eau et leurs usages, comme la production d'hydroélectricité (*degré de confiance élevé*) et l'agriculture irriguée dans les zones de haute montagne et en aval de celles-ci (*degré de confiance moyen*), de même que les moyens de subsistance dans l'Arctique (*degré de confiance moyen*). Il est projeté que les changements portant sur les crues, les avalanches, les glissements de terrain et la déstabilisation du sol augmenteront les risques affectant les infrastructures, les biens culturels, le tourisme et les activités récréatives (*degré de confiance moyen*). {2.3, 2.3.1, 3.4.3}

B.7.1 Les risques de catastrophe affectant les communautés humaines, leurs modes de vie et moyens de subsistance, devraient augmenter en haute montagne et dans l'Arctique (*degré de confiance moyen*), étant donné l'évolution future d'aléas tels que les crues, les feux, les glissements de terrain, les avalanches, les conditions incertaines de neige et de glace et l'exposition accrue des personnes et des biens (*degré de confiance élevé*). Il est projeté que les techniques actuelles de réduction des risques perdront en efficacité du fait de l'évolution du caractère des aléas (*degré de confiance moyen*). D'ambitieuses stratégies de réduction des risques et d'adaptation pourraient aider à contrer la hausse des impacts provoqués par les crues et les glissements de terrain en montagne au fur et à mesure de l'augmentation de l'exposition et la vulnérabilité à ces aléas dans de nombreuses zones montagneuses au cours de ce siècle (*degré de confiance élevé*). {2.3.2, 3.4.3, 3.5.2}

B.7.2 Selon les projections, la subsidence des terres imputable au dégel du pergélisol aura un impact sur les infrastructures de communication et de transport urbains et ruraux implantées sur les sols gelés dans l'Arctique et en haute montagne (*degré de confiance moyen*). En Arctique, la majorité des infrastructures se trouve dans des régions où une intensification du dégel du pergélisol est anticipée d'ici au milieu du siècle. La modernisation et la reconfiguration de ces infrastructures pourraient réduire de moitié les coûts découlant du dégel du pergélisol et des impacts liés au changement climatique d'ici à 2100 (*degré de confiance moyen*). {2.3.4, 3.4.1, 3.4.3}

B.7.3 Il est projeté que les atouts touristiques, récréatifs et culturels des régions de haute montagne seront affectés négativement par les changements à venir dans la cryosphère (*degré de confiance élevé*). Les techniques actuelles de production de neige de culture seront de moins en moins efficaces pour réduire les risques climatiques pour les stations de sports d'hiver dans la majeure partie de l'Europe, en Amérique du Nord et au Japon, surtout si le réchauffement planétaire atteint ou dépasse 2 °C (*degré de confiance élevé*). {2.3.5, 2.3.6}

B.8 Selon les projections, l'évolution future de la répartition des poissons, l'abondance réduite des stocks et la baisse du potentiel de capture des pêcheries résultant du changement climatique vont affecter les revenus, les moyens de subsistance et la sécurité alimentaire des communautés qui dépendent de la mer (*degré de confiance moyen*). La disparition et la dégradation durables des écosystèmes marins compromettent leur rôle pour des valeurs culturelles, récréatives et pour leur valeur intrinsèque qui sont importantes pour l'identité et le bien-être des populations humaines (*degré de confiance moyen*). {3.2.4, 3.4.3, 5.4.1, 5.4.2, 6.4}



B.8.1 Les déplacements géographiques et les réductions de la biomasse animale marine et du potentiel de pêche projetés dans le monde sont plus marqués dans le cas du RCP8.5 qu'avec le RCP2.6, augmentant les risques qui pèsent sur les revenus et les moyens de subsistance des populations humaines qui en dépendent, particulièrement dans les régions où l'économie est vulnérable (*degré de confiance moyen*). Les projections de répartition des ressources et de leur abondance devraient accroître les risques de conflit entre les pêcheries, les autorités et les populations (*degré de confiance moyen*). Les défis pour la gouvernance des pêcheries sont généralisés dans le cas du scénario RCP8.5, avec des régions critiques comme l'Arctique et la partie tropicale du Pacifique (*degré de confiance moyen*). {3.5.2, 5.4.1, 5.4.2, 5.5.2, 5.5.3, 6.4.2, figure RID.3}



B.8.2 Le déclin des récifs coralliens d'eau chaude compromettra fortement les services qu'ils procurent à la société, tels l'apport de nourriture (*degré de confiance élevé*), la protection des côtes (*degré de confiance élevé*) et le tourisme (*degré de confiance moyen*). Les risques accrus qui pèsent sur la sécurité alimentaire liée aux produits de la mer (*degré de confiance moyen*), combinés à la baisse des ressources halieutiques, mettront davantage en péril la santé nutritionnelle de certaines populations fortement dépendantes des ressources marines (*degré de confiance moyen*), par exemple dans l'Arctique, en Afrique de l'Ouest et dans les petits États insulaires en développement. Ces impacts se combinent à d'autres risques créés par d'autres changements dans les régimes et systèmes alimentaires dus à l'évolution socio-économique et au changement climatique sur les terres émergées (*degré de confiance moyen*). {3.4.3, 5.4.2, 6.4.2}



B.8.3 Le réchauffement planétaire nuit à la qualité sanitaire des produits de la mer (*degré de confiance moyen*) en exposant les populations humaines à la forte bioaccumulation de polluants organiques persistants et de mercure dans la faune et la flore océaniques (*degré de confiance moyen*), à l'augmentation de la prévalence de pathogènes de type « *vibrio* » (*degré de confiance moyen*) et à une probabilité élevée d'efflorescences algales nuisibles (*degré de confiance moyen*). Ces risques seront particulièrement élevés au sein des communautés qui consomment beaucoup de produits de la mer, y compris les peuples autochtones établis sur le littoral (*degré de confiance moyen*), et dans les secteurs économiques tels que la pêche, l'aquaculture et le tourisme (*degré de confiance élevé*). {3.4.3, 5.4.2, encadré 5.3}



B.8.4 Les impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins et les services qu'ils procurent menacent certaines dimensions culturelles fondamentales des modes de vie et des moyens de subsistance (*degré de confiance moyen*), par exemple en modifiant la répartition et l'abondance des espèces collectées et en réduisant l'accès aux zones de pêche ou de chasse. Cela comprend la perte potentiellement rapide et irréversible d'éléments culturels et de savoirs locaux et autochtones, ainsi que les impacts néfastes sur les régimes alimentaires traditionnels, la sécurité alimentaire, les valeurs esthétiques et les loisirs marins (*degré de confiance moyen*). {3.4.3, 3.5.3, 5.4.2}

B.9 La montée des niveaux marins moyens et extrêmes combinée au réchauffement et à l'acidification de l'océan aggravera les risques qui pèsent sur les populations des littoraux de basse altitude (*degré de confiance élevé*). Dans les communautés de l'Arctique qui ne sont pas soumises à un soulèvement rapide des terres et dans les îles urbaines des atolls, les risques seront modérés à élevés même dans le cas d'un scénario de forte baisse des émissions (RCP2.6) (*degré de confiance moyen*), incluant l'atteinte de limites à l'adaptation (*degré de confiance élevé*). Dans le cas d'émissions fortes (RCP8.5) et de la poursuite du niveau actuel d'adaptation, les deltas et les villes côtières riches en ressources seront confrontés à des risques modérés à élevés après 2050 (*degré de confiance moyen*). Une adaptation ambitieuse incluant une gouvernance transformatrice peut réduire ces risques (*degré de confiance élevé*), les bénéfices étant propres à chaque contexte. {4.3.3, 4.3.4, 6.9.2, encadré thématique 9, SM4.3, figure RID.5}

B.9.1 En l'absence de mesures d'adaptation plus ambitieuses qu'aujourd'hui et vu la hausse actuelle de l'exposition et de la vulnérabilité des populations côtières, les risques tels que l'érosion et la perte de terres, les inondations, la salinisation et les impacts en cascade de l'élévation du niveau moyen de la mer et des phénomènes extrêmes devraient augmenter substantiellement tout au long du XXIe siècle, quel que soit le scénario d'émissions de gaz à effet de serre (*degré de confiance très élevé*). Selon les mêmes hypothèses, les dommages annuels causés par les submersions côtières seront multipliés par cent ou mille d'ici à 2100 par rapport à aujourd'hui (*degré de confiance élevé*). {4.3.3, 4.3.4, encadré 6.1, 6.8, SM4.3, figures RID.4 et RID.5}

B.9.2 L'élévation du niveau de la mer fait peser des niveaux de risque élevés à très élevés sur les communautés vulnérables vivant dans des environnements coralliens, dans des îles urbanisées d'atolls et des littoraux bas arctiques, et ce bien avant la fin du siècle en cas de scénarios à fortes émissions. Cela implique l'atteinte de la limite à l'adaptation, c'est-à-dire le point à partir duquel les objectifs d'un acteur (ou les besoins d'un système) ne peuvent être préservés de risques intolérables par la prise de mesures d'adaptation (*degré de confiance élevé*). L'atteinte de cette limite (biophysique, géographique, financière, technique, sociale, politique, institutionnelle ou autres) dépend des scénarios d'émissions et de la tolérance aux risques spécifique à chaque contexte ; elle devrait toucher davantage de littoraux après 2100, étant donné l'élévation inéluctable et à long terme du niveau de la mer (*degré de confiance moyen*). Il est *probable* que les modifications de l'océan et de la cryosphère liées au climat rendront inhabitables certains États insulaires (*degré de confiance moyen*), mais il reste extrêmement difficile d'évaluer les seuils critiques d'habitabilité. {4.3.4, 4.4.2, 4.4.3, 5.5.2, encadré thématique 9, SM4.3, RID C1, glossaire, figure RID.5}

B.9.3 Une limitation de l'ampleur des changements climatiques et de leurs conséquences sur l'océan et la cryosphère permettrait d'augmenter les possibilités d'adaptation à l'échelle mondiale (*degré de confiance élevé*). Bien qu'un degré de *confiance élevé* soit affecté au potentiel offert par une adaptation ambitieuse incluant une gouvernance propice à des changements transformationnels pour réduire les risques dans de nombreux endroits, ces bénéfices sont susceptibles de varier d'un lieu à l'autre. À l'échelle planétaire, la protection des côtes pourrait réduire les risques de submersion de deux ou trois ordres de grandeur pendant le XXIe siècle, mais elle nécessite des investissements annuels de l'ordre de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliards de dollars américains (*degré de confiance élevé*). Si de tels investissements sont souvent rentables dans les régions urbaines densément peuplées, les zones rurales et plus pauvres pourraient avoir du mal à entreprendre ce genre de projets, dont le coût annuel équivaudrait à plusieurs pourcents du produit intérieur brut dans certains petits États insulaires (*degré de confiance élevé*). Il persisterait des risques résiduels et des pertes associées même avec des mesures substantielles d'adaptation (*degré de confiance moyen*), quoique les limites à l'adaptation spécifiques au contexte et les risques résiduels restent difficiles à évaluer. {4.1.3, 4.2.2.4, 4.3.1, 4.3.2, 4.3.4, 4.4.3, 6.9.1, 6.9.2, encadrés thématiques 1 et 2 du chapitre 1, SM4.3, figure RID.5}

Événements de niveau marin extrême

En raison de l'élévation projetée du niveau moyen de la mer à l'échelle globale, il est projeté que les niveaux extrêmes locaux qui se produisaient historiquement une fois par siècle (événements historiques centennaux, EHC) surviendront, au cours du XXIe siècle, au moins une fois par an pour la plupart des régions côtières. La hauteur des EHC varie considérablement d'une localisation à une autre, et, selon le degré d'exposition, peut déjà provoquer des impacts considérables. Les impacts peuvent continuer à s'accroître avec l'augmentation de la récurrence des EHC.

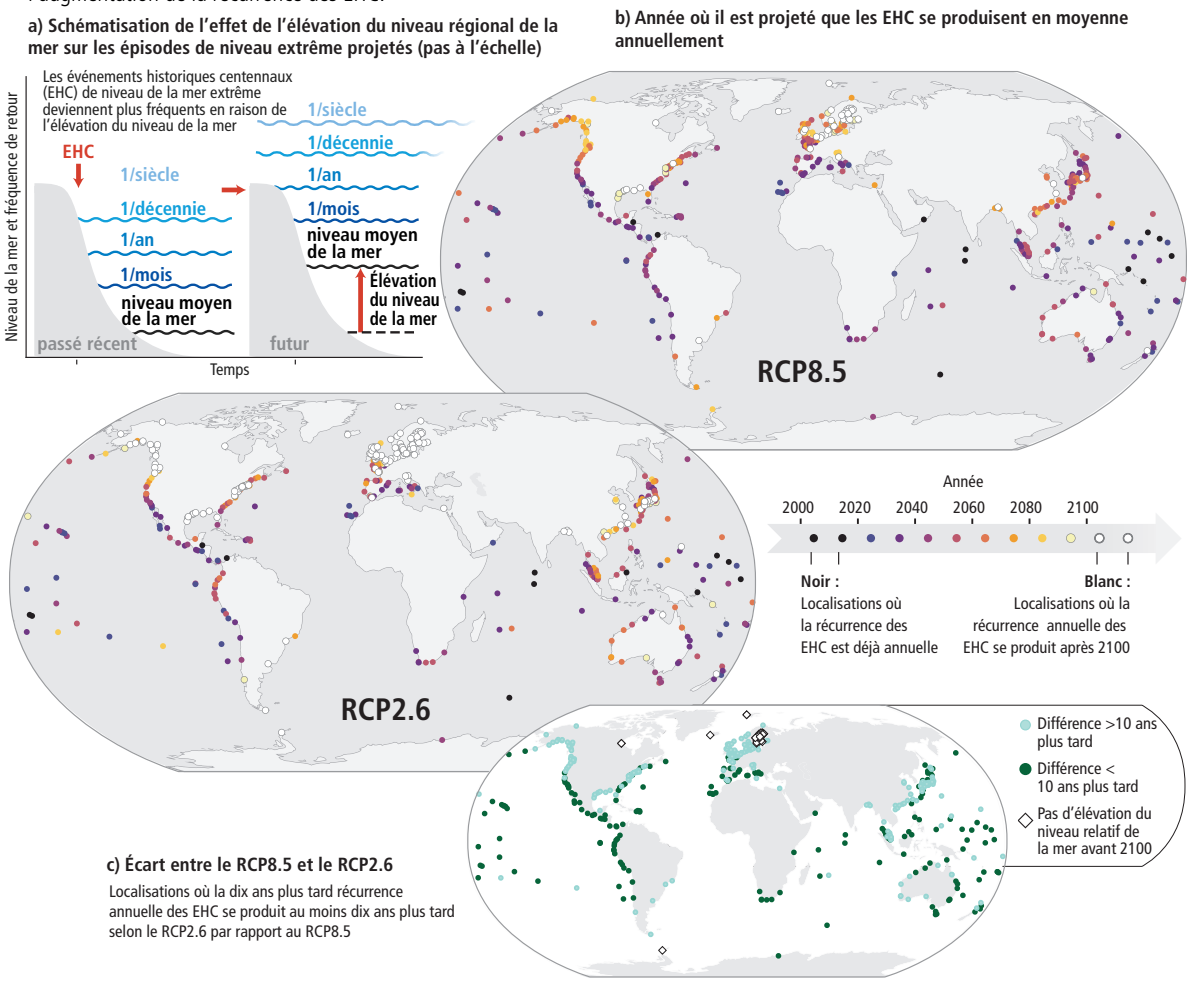


Figure RID.4 | Effet de l'élévation du niveau régional de la mer sur les niveaux marins extrêmes pour différents sites côtiers. **(a)** Illustration schématique des événements de niveau marin extrême et de leur récurrence moyenne dans le passé récent (1986–2005) et dans le futur. Par suite de l'élévation du niveau moyen de la mer, les niveaux locaux qui revenaient historiquement une fois par siècle (événements historiques centennaux, EHC) devraient survenir plus fréquemment à l'avenir. **(b)** Année où les EHC se reproduiraient une fois par an en moyenne dans le cas des RCP8.5 et RCP2.6 pour les 439 localisations côtières pour lesquelles on dispose de relevés d'observation suffisants. L'absence de cercle signale l'impossibilité de procéder à une évaluation par manque de données, et non pas une exposition ou un risque inexistants. Plus la couleur du cercle est sombre, plus la transition surviendrait tôt. La fourchette *probable* est de ± 10 ans aux endroits où cette transition est attendue avant 2100. Un cercle blanc (33 % des sites selon le RCP2.6, 10 % selon le RCP8.5) signifie que les EHC ne devraient pas se reproduire une fois par an avant 2100. **(c)** Indication des localisations où le passage des EHC à des phénomènes annuels serait retardé de plus de dix ans dans le cas du RCP2.6 par rapport au RCP8.5. Étant donné que les scénarios produisent, en beaucoup d'endroits, de faibles écarts d'ici 2050, les résultats obtenus avec le RCP4.5 ne sont pas inclus ici mais ils sont présentés également dans le chapitre 4. {4.2.3, figure 4.10, figure 4.12}

RID.C Mise en Oeuvre de Reponses aux Changements dans l'Océan et la Cryosphère

Défis

C.1 Les impacts des changements liés au climat dans l'océan et la cryosphère confrontent de manière croissante les efforts de gouvernance aux défis d'élaborer et de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation aux échelles locale à mondiale, les poussant parfois à leurs limites. Les populations les plus exposées et les plus vulnérables sont souvent celles qui disposent de la plus faible capacité de réponse (*degré de confiance élevé*). {1,5, 1.7, encadrés thématiques 2 et 3 du chapitre 1, 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.4, 3.2.4, 3.4.3, 3.5.2, 3.5.3, 4.1, 4.3.3, 4.4.3, 5.5.2, 5.5.3, 6.9}

C.1.1 Les impacts du changement climatique dans l'océan et la cryosphère, tout comme leurs répercussions sur les sociétés, ont un horizon temporel plus long que celui des dispositifs de gouvernance (cycles de planification, cycles du processus décisionnel dans le secteur public et privé, instruments financiers, etc.). Ces différences d'horizons temporels entravent la capacité qu'ont les sociétés de se préparer et de réagir de manière adéquate aux changements à long terme, y compris aux variations de fréquence et d'intensité des phénomènes extrêmes (*degré de confiance élevé*). Des exemples de tels enjeux incluent les modifications des glissements de terrain et des inondations dans les régions de haute montagne, les risques qui pèsent sur des espèces et des écosystèmes importants de l'Arctique, ainsi que sur les pays et les îles de faible altitude, les petits États insulaires, les autres régions côtières et les écosystèmes des récifs coralliens. {2.3.2, 3.5.2, 3.5.4, 4.4.3, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5.1, 5.5.2, 5.5.3, 6.9}

C.1.2 Les instruments de gouvernance (aires marines protégées, plans d'aménagement du territoire, systèmes de gestion des ressources en eau, etc.) sont, dans de nombreux contextes, trop fragmentés et répartis entre les frontières administratives et les différents secteurs pour apporter des réponses intégrées face aux risques croissants et en cascade inhérents aux changements dans l'océan et/ou la cryosphère liés au climat (*degré de confiance élevé*). La capacité des dispositifs de gouvernance dans les régions polaires et océaniques de contrer les impacts du changement climatique s'est accrue récemment, mais pas de manière assez rapide ou solide pour faire face de manière adéquate aux risques croissants projetés (*degré de confiance élevé*). Dans les hautes montagnes, les régions côtières et les petites îles, la coordination des mesures d'adaptation au changement climatique présente aussi des difficultés au regard des nombreuses interactions entre les facteurs de risque climatiques et non climatiques (inaccessibilité, démographie et habitat, subsidence due aux activités locales, etc.), à diverses échelles et dans différents secteurs et domaines d'action gouvernementale (*degré de confiance élevé*). {2.3.1, 3.5.3, 4.4.3, 5.4.2, 5.5.2, 5.5.3, encadré 5.6, 6.9, encadré thématique 3 du chapitre 1}

C.1.3 Il existe un large éventail d'obstacles répertoriés et de limites à l'adaptation au changement climatique dans les écosystèmes (*degré de confiance élevé*). Parmi ces limites figurent l'espace dont ont besoin les écosystèmes, les facteurs non climatiques et les impacts humains qui doivent être pris en compte dans le cadre des options d'adaptation, la baisse de la capacité d'adaptation des écosystèmes du fait du changement climatique, et l'augmentation de la durée de rétablissement des écosystèmes en fonction de la récurrence des impacts climatiques, la disponibilité des technologies, des connaissances et des moyens financiers, et les dispositifs de gouvernance en place (*degré de confiance moyen*). {3.5.4, 5.5.2}

C.1.4 Il existe des obstacles, notamment financiers, technologiques, institutionnels et autres à la mise en œuvre de stratégies de réponses face aux impacts négatifs actuels et projetés induits par les changements dans l'océan et la cryosphère liés au climat, qui entravent le renforcement de la résilience et les mesures de réduction des risques (*degré de confiance élevé*). La question de savoir si ces obstacles réduisent l'efficacité de l'adaptation ou correspondent aux limites à l'adaptation dépend des circonstances propres au contexte, du rythme et de l'ampleur des changements climatiques et de l'aptitude des sociétés à transformer leur capacité d'adaptation en réponses efficaces. La capacité d'adaptation diffère toujours d'une communauté et d'une société à l'autre comme au sein de celles-ci (*degré de confiance élevé*). Les populations les plus exposées et les plus vulnérables aux aléas présents et futurs découlant des changements dans l'océan et la cryosphère sont souvent celles qui possèdent la plus faible capacité d'adaptation, surtout dans les îles et les zones côtières de basse altitude, l'Arctique et les régions de hautes montagnes aux prises avec des défis de développement (*degré de confiance élevé*). {2.3.1, 2.3.2, 2.3.7, encadré 2.4, 3.5.2, 4.3.4, 4.4.2, 4.4.3, 5.5.2, 6.9, encadrés thématiques 2 et 3 du chapitre 1, encadré thématique 9}

Renforcer les options de réponse

C.2 Les multiples services et possibilités qu'offrent les écosystèmes océaniques et cryosphériques peuvent être soutenus par la protection, la restauration, la gestion précautionneuse fondée sur les écosystèmes, et la diminution de la pollution et des autres facteurs de stress (*degré de confiance élevé*). La gestion intégrée des ressources en eau (*degré de confiance moyen*) et l'adaptation fondée sur les écosystèmes (*degré de confiance élevé*) réduisent localement les risques climatiques et apportent de multiples bienfaits à la société. Il existe cependant des contraintes écologiques, financières, institutionnelles et en matière de gouvernance à ce type d'actions (*degré de confiance élevé*) et, dans de nombreux contextes, l'adaptation fondée sur les écosystèmes ne sera efficace que pour les niveaux de réchauffement les plus faibles (*degré de confiance élevé*). {2.3.1, 2.3.3, 3.2.4, 3.5.2, 3.5.4, 4.4.2, 5.2.2, 5.4.2, 5.5.1, 5.5.2, figure RID.5}

C.2.1 Les réseaux d'aires protégées aident à préserver les services écosystémiques, dont l'absorption et le stockage de carbone, et rendent possibles de futures options d'adaptation fondées sur les écosystèmes en facilitant la migration vers les pôles et en altitude des espèces, populations et écosystèmes qui se produisent en réponse au réchauffement et à l'élévation du niveau de la mer (*degré de confiance moyen*). Les obstacles géographiques, la dégradation des écosystèmes, le morcellement des habitats et les freins à la coopération régionale limitent le potentiel de ces réseaux pour soutenir les changements d'aires de répartition des espèces à venir dans les régions marines, les régions de haute montagne et les régions polaires (*degré de confiance élevé*). {2.3.3, 3.2.3, 3.3.2, 3.5.4, 5.5.2, encadré 3.4}

C.2.2 La restauration des habitats terrestres et marins et les outils de gestion des écosystèmes, telles que la relocalisation assistée d'espèces et la culture de coraux, peuvent être efficaces pour améliorer l'adaptation fondée sur les écosystèmes à l'échelon local (*degré de confiance élevé*). De telles actions sont plus fructueuses lorsqu'elles sont soutenues par la communauté locale, sont basées sur la science tout en intégrant aussi les savoirs locaux et autochtones, et bénéficient d'un appui durable incluant la réduction ou l'élimination des facteurs de stress non climatiques, et aux niveaux de réchauffement les plus bas (*degré de confiance élevé*). Ainsi, la restauration des récifs coralliens pourrait s'avérer inefficace si le réchauffement planétaire s'élevait au-delà de 1,5 °C, les coraux étant déjà gravement menacés (*degré de confiance très élevé*) au niveau actuel de réchauffement. {2.3.3, 4.4.2, 5.3.7, 5.5.1, 5.5.2, encadré 5.5, figure RID.3}

C.2.3 Le renforcement des approches de conservation, telle la reconstitution des zones de pêche surexploitées ou épuisées, et l'amélioration de la capacité d'ajustement des stratégies de gestion des pêches réduisent les impacts néfastes du changement climatique sur les pêcheries, au profit de l'économie régionale et des moyens de subsistance (*degré de confiance moyen*). La gestion des pêches qui évalue et actualise les mesures à intervalle régulier, en s'appuyant sur les évaluations des tendances futures des écosystèmes, diminue les risques pour les pêcheries (*degré de confiance moyen*) mais offre une capacité limitée de faire face aux changements dans les écosystèmes. {3.2.4, 3.5.2, 5.4.2, 5.5.2, 5.5.3, figure RID.5}

C.2.4 La restauration des écosystèmes de végétation côtière, comme les mangroves, les marais maritimes et les herbiers (« carbone bleu »), pourrait atténuer le changement climatique en augmentant l'absorption et le stockage de carbone à raison de 0,5 % des émissions mondiales annuelles actuelles (*degré de confiance moyen*). Une protection et une gestion améliorées peuvent réduire les émissions de carbone de ces écosystèmes. Conjuguées, ces mesures offrent également de multiples autres avantages, comme une protection renforcée contre les tempêtes et une amélioration de la qualité de l'eau, de la biodiversité et des ressources pour la pêche (*degré de confiance élevé*). L'amélioration de la quantification du stockage de carbone et des flux de gaz à effet de serre de ces écosystèmes côtiers réduira les incertitudes actuelles concernant leur mesure, notification et vérification (*degré de confiance élevé*). {Encadré 4.3, 5.4, 5.5.1, 5.5.2 ; annexe I : Glossaire}

C.2.5 Les énergies marines renouvelables peuvent contribuer à l'atténuation du changement climatique, et peuvent comprendre l'exploitation de l'énergie des vents marins, des marées, des vagues, des gradients thermiques et de salinité ou des biocarburants issus des algues. La demande émergente de sources d'énergie alternatives devrait ouvrir des possibilités économiques pour le secteur des énergies marines renouvelables (*degré de confiance élevé*), bien que leur potentiel puisse également être affecté par le changement climatique (*degré de confiance faible*). {5.4.2, 5.5.1, figure 5.23}

C.2.6 Les approches de gestion intégrée des ressources en eau à toutes les échelles spatiales peuvent être efficaces pour faire face aux impacts et exploiter les opportunités découlant des modifications de la cryosphère dans les régions de haute montagne. Ceci encourage la gestion des ressources en eau en permettant le développement et l'optimisation du stockage et des lâchers d'eau des réservoirs à diverses fins (*degré de confiance moyen*), en tenant compte des impacts potentiellement négatifs pour les écosystèmes et les communautés. La diversification des activités touristiques tout au long de l'année concourt à l'adaptation pour les économies de haute montagne (*degré de confiance moyen*). {2.3.1, 2.3.5}

C.3 Au regard de l'élévation du niveau de la mer, les populations côtières font face à des choix difficiles au moment d'élaborer des réponses intégrées et adaptées à chaque contexte, qui équilibrent les coûts, les bénéfices et les compromis associés aux différentes options disponibles, et qui puissent être ajustées au fil du temps (*degré de confiance élevé*). Toutes les catégories d'options, incluant la protection, l'accommodation, l'adaptation fondée sur les écosystèmes, l'avancée sur la mer et le recul stratégique, peuvent jouer un rôle important dans ces réponses intégrées (*degré de confiance élevé*). {4.4.2, 4.4.3, 4.4.4, 6.9.1, encadré thématique 9 ; figure RID.5}

C.3.1. Plus le niveau de la mer s'élève, plus la protection du littoral s'avère difficile en raison d'obstacles davantage économiques, financiers et sociaux que de limites techniques (*degré de confiance élevé*). Au cours des prochaines décennies, la diminution des facteurs locaux d'exposition et de vulnérabilité, tels que l'urbanisation du littoral et la subsidence due aux activités humaines, est une stratégie efficace (*degré de confiance élevé*). Lorsque l'espace est limité et que la valeur des biens exposés est élevée (dans les villes, par exemple), il est *probable* qu'une protection en dur (digue, etc.) constituera une option rentable au XXI^{e} siècle, en tenant compte des particularités propres à chaque contexte (*degré de confiance élevé*), mais les zones ayant des ressources limitées pourraient ne pas être en mesure de se permettre de tels investissements. Quand l'espace n'est pas limité, l'adaptation fondée sur les écosystèmes peut réduire les risques côtiers et procurer de multiples autres bénéfices, dont le stockage de carbone, l'amélioration de la qualité de l'eau, la sauvegarde de la biodiversité et l'accès à des moyens de subsistance (*degré de confiance moyen*). {4.3.2, 4.4.2, encadré 4.1, encadré thématique 9, figure RID.5}

C.3.2 Face aux niveaux marins actuels, certaines mesures d'aménagement du littoral, comme les systèmes d'alerte précoce et la protection des bâtiments contre les inondations, sont souvent peu coûteuses et très efficaces pour le niveau actuel des mers (*degré de confiance élevé*). L'élévation projetée de la montée des mers et l'augmentation des aléas côtiers rendent certaines de ces mesures moins efficaces si elles ne sont pas combinées à d'autres mesures (*degré de confiance élevé*). Toutes les catégories d'options envisageables, y compris la protection, l'accommodation, l'adaptation fondée sur les écosystèmes, l'avancée sur la mer et la relocalisation planifiée (si d'autres emplacements sont disponibles) peuvent jouer un rôle important dans ces réponses intégrées (*degré de confiance élevé*). Lorsque la communauté touchée est de petite taille ou à la suite d'une catastrophe, il est pertinent d'envisager de réduire les risques par une relocalisation planifiée, à condition que des lieux d'accueil sûrs soient disponibles. Une telle relocalisation planifiée peut se heurter à des obstacles de nature sociale, culturelle, financière et politique (*degré de confiance très élevé*). {4.4.2, encadré 4.1, encadré thématique 9, RID B3}

C.3.3 La réponse à l'élévation du niveau de la mer et la diminution des risques associés présentent d'immenses défis de gouvernance pour la société, en raison de l'incertitude sur l'ampleur et le rythme de l'élévation du niveau des mers à venir, et de compromis difficiles à trouver entre plusieurs objectifs sociétaux (sécurité, conservation, développement économique, équité entre les générations et au sein des générations, etc.), de ressources limitées et de valeurs et intérêts divergents parmi les parties prenantes (*degré de confiance élevé*). Il est possible d'alléger ces défis en conjuguant, selon les conditions locales, l'analyse décisionnelle, la planification de l'usage des terres, la participation du public, en combinant les différents types de savoirs, en mettant en œuvre des approches de résolution des conflits, et en les ajustant au fil du temps, en fonction des changements de circonstances (*degré de confiance élevé*). {Encadré thématique 5 du chapitre 1, 4.4.3, 4.4.4, 6.9}

C.3.4 En dépit des grandes incertitudes sur l'ampleur et le rythme d'élévation du niveau de la mer au-delà de 2050, de nombreuses décisions d'adaptation pour le littoral, à un horizon temporel de plusieurs décennies voire plus d'un siècle, sont prises dès aujourd'hui (infrastructures stratégiques, ouvrages de protection des côtes, plans d'urbanisme, par exemple) et peuvent être améliorées en tenant compte des projections d'élévation du niveau relatif de la mer, en favorisant des réponses flexibles (qui peuvent être adaptées au cours du temps) appuyées par des systèmes de surveillance des signaux d'alerte précoce, en révisant régulièrement les décisions (processus décisionnel adaptatif) et en faisant appel aux méthodes de prise de décisions robustes, à des avis d'experts, à la construction de scénarios et en utilisant de multiples types de savoirs (*degré de confiance élevé*).

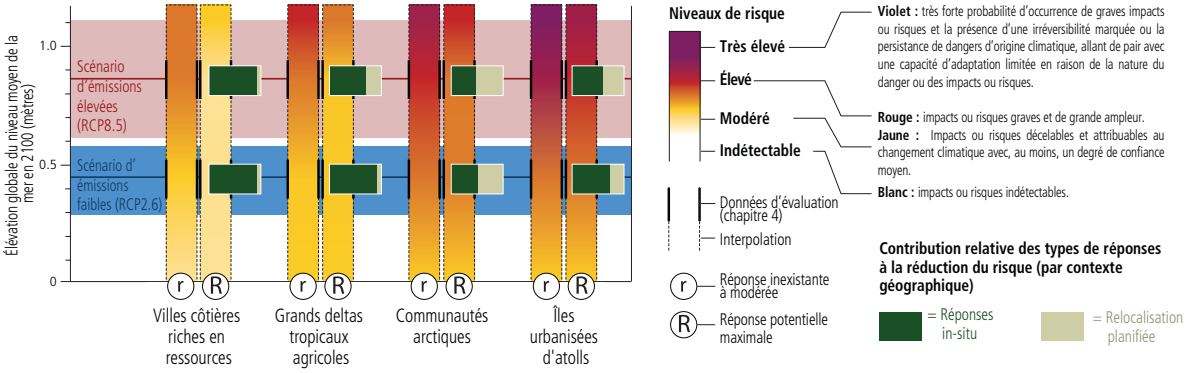
L'amplitude de l'élévation du niveau de la mer dont il faut tenir compte pour planifier et mettre en œuvre des réponses sur le littoral dépend du degré de tolérance au risque des parties prenantes. Les parties prenantes ayant une tolérance au risque plus élevée (par exemple, celles qui planifient des investissements qui peuvent très facilement être adaptés en cas de conditions imprévues) préfèrent souvent utiliser la fourchette de projections qualifiée de *probable*. Les parties prenantes présentant une tolérance au risque plus basse (par exemple, pour les décisions concernant une infrastructure critique) prennent également en compte une montée du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale et locale qui se situe au-delà de la limite supérieure de la fourchette *probable* (1,1 m à l'échelle du globe d'ici à 2100 selon le RCP8.5) et qui provient de méthodes caractérisées par un *degré de* confiance plus faible, comme la consultation d'experts. {1.8.1, 1.9.2, 4.2.3, 4.4.4, figure 4.2, encadré thématique 5 du chapitre 1, figure RID.5, RID B.3}

Risques et réponses face à l'élévation du niveau de la mer

Le terme réponse, et non adaptation, est employé ici car certaines réponses, tel le recul stratégique, peuvent ou non être considérées comme une adaptation

a) Risques en 2100 pour différents scénarios d'élévation du niveau de la mer et de réponses

Risques pour des exemples de contextes géographiques pour différents changements de niveau moyen de la mer *(degré de confiance moyen)*



Dans cette évaluation, le terme réponse renvoie à des mesures mises en œuvre *in situ* pour contrer l'élévation du niveau de la mer (ouvrages de protection des côtes, restauration des écosystèmes dégradés, limitation de la subsidence) et à la relocalisation planifiée. La relocalisation planifiée désigne ici le recul stratégique ou la réinstallation à titre préventif, à une échelle locale uniquement, en fonction du contexte particulier (dans le cas des îles urbanisées d'atolls par exemple : déplacement à l'intérieur de l'île, vers une île voisine ou sur une île artificielle). Les déplacements forcés et les migrations internationales sont exclus du cadre de cette évaluation.

Ces exemples de zones géographiques sont construits à partir d'un nombre limité d'études de cas bien documentées par des publications scientifiques. La réalisation du risque dépendra des spécificités du contexte.

Scénarios d'élévation du niveau de la mer : les scénarios RCP4.5 et RCP6.0 ne sont pas pris en compte pour cette analyse de risques car le corpus de publications scientifiques sous-tendant cette évaluation n'est disponible que pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5.

(b) Bénéfices de ces réponses à l'élévation du niveau de la mer et de l'atténuation du changement climatique

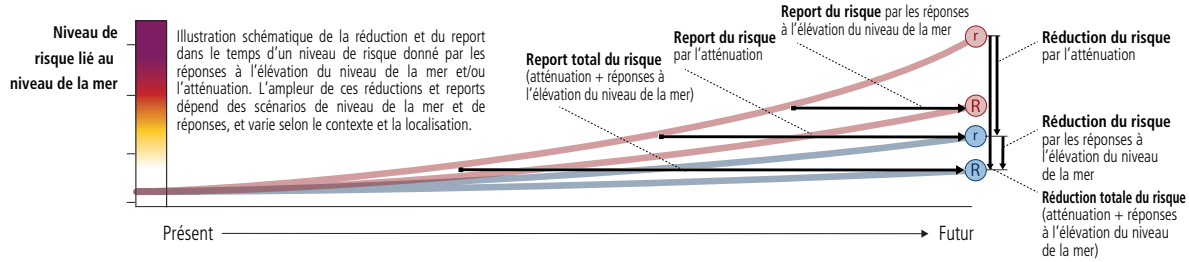


Figure RID.5 | a, b

c) Réponses face à l'élévation des niveaux marins moyens et extrêmes

Ce tableau présente certaines réponses et leurs caractéristiques. Il n'est pas exhaustif. La pertinence de chaque réponse dépend de la géographie et du contexte.
Degré de confiance (évalués pour l'efficacité) : ●●●● = Très élevé ●●● = Élevé ●● = Moyen ● = Faible

Réponses		Efficacité potentielle en terme de réduction des risques liés à l'élévation du niveau de la mer (limites techniques/biophysiques)	Avantages (en plus de la réduction du risque)	Co-bénéfices	Inconvénients	Efficience économique	Défis en matière de gouvernance
Défenses côtières artificielles		Efficace jusqu'à plusieurs mètres d'élévation du niveau de la mer (4.4.2.2.4) ●●●	Degré de protection prévisible (4.4.2.2.4)	Digues multi-fonctions, par exemple pour les loisirs, autres usages des terres (4.4.2.2.5)	Destruction d'habitats par compression côtière, inondation et érosion en aval du littoral, verrouillage technologique, conséquences catastrophiques en cas de rupture (4.3.2.4, 4.4.2.2.5)	Elevée si la valeur des biens protégés est élevée, comme dans beaucoup de zones côtières urbanisées et fortement peuplées (4.4.2.2.7)	Souvent inabordable dans les zones moins riches économique-ment. Conflits entre objectifs (conservation, sécurité et tourisme), conflits dans l'affectation des fonds publics, manque de financement (4.3.3.2, 4.4.2.2.6)
Protection fondée sur les sédiments		Efficace mais exige une disponibilité en sédiments (4.4.2.2.4) ●●●	Grande flexibilité (4.4.2.2.4)	Sauvegarde des plages pour les loisirs/le tourisme (4.4.2.2.5)	Destruction d'habitats là où les sédiments sont prélevés (4.4.2.2.5)	Elevée si les revenus tirés du tourisme sont élevés (4.4.2.2.7)	Conflits dans l'affectation des fonds publics (4.4.2.2.6)
Adaptation fondée sur les écosystèmes	**Conservation des coraux**	Efficace jusqu'à 0,5 cm/an d'élévation du niveau de la mer ●● Fortement limitée par le réchauffement et l'acidification de l'océan. Limitée avec un réchauffement de 1,5 °C, nulle à 2 °C à de nombreux emplacements (4.3.3.5.2, 4.4.2.3.2, 5.3.4) ●●●	Possibilité d'associer les communautés (4.4.2.3.1)	Gain d'habitat, de biodiversité, stockage de carbone, revenus du tourisme, hausse de la productivité des pêches, meilleure qualité de l'eau. Apport de nourriture, ingrédients médicinaux, carburant, bois et bénéfices culturels (4.4.2.3.5)	L'efficacité à long terme dépend du réchauffement de l'océan, de l'acidification et des scénarios d'émissions (4.3.3.5.2, 4.4.2.3.2)	Peu d'éléments probants sur le rapport coûts-bénéfices ; dépend de la densité de population et des terres disponibles (4.4.2.3.7)	Difficulté d'obtenir les permis de mise en œuvre. Manque de financements. Application insuffisante des politiques de conservation. Options d'adaptation fondée sur les écosystèmes écartées à cause d'intérêts économiques à court terme. Disponibilités de terres (4.4.2.3.6)
	Restauration des coraux						
	Conservation des zones humides (marais, mangroves)	Efficace jusqu'à 0,5–1 cm/an d'élévation du niveau de la mer ●● Moins efficace à 2 °C (4.3.3.5.1, 4.4.2.3.2. 5.3.7) ●●●			Degrés de protection moins prévisibles, bénéfices non concrétisés en matière de développement (4.4.2.3.5, 4.4.2.3.2)		
	Restauration des zones humides (marais, mangroves)				Degrés de protection moins prévisibles, beaucoup de terres requises, nécessité de lever les obstacles à l'expansion des écosystèmes vers les terres (4.4.2.3.5, 4.4.2.3.2)		
Avancée sur la mer		Efficace jusqu'à plusieurs mètres d'élévation du niveau des mers (4.4.2.2.4) ●●●	Degré de protection prévisible (4.4.2.2.4)	Création de terres, les revenus tirés de la vente peuvent servir à financer l'adaptation (4.4.2.4.5,)	Salinisation des eaux souterraines, accélération de l'érosion, disparition d'écosystèmes et d'habitats côtiers (4.4.2.4.5)	Très élevée si le prix des terrains est élevé, comme dans beaucoup de zones côtières urbanisées (4.4.2.4.7)	Souvent inabordable dans les zones moins riches économiquement. Conflits sociaux concernant l'accès et la distribution des nouvelles terres (4.4.2.4.6)
Aménagement du littoral (protection des bâtiments contre les inondations, systèmes d'alerte précoce pour les inondations, etc.)		Très efficace dans le cas d'une faible élévation du niveau de la mer (4.4.2.5.4) ●●●	Techniques parvenues à maturité ; le dépôt de sédiments pendant les inondations peut accroître l'altitude (4.4.2.5.5)	Sauvegarde de la connectivité des paysages (4.4.2.5.5)	N'empêche pas les inondations et les impacts (4.4.2.5.5)	Très élevée pour les systèmes d'alerte précoce et les interventions sur les bâtiments (4.4.2.5.7)	Les systèmes d'alerte précoce exigent des dispositifs institutionnels efficaces (4.4.2.6.6)
Recul stratégique	**Relocalisation planifiée**	Efficace s'il existe des localités d'accueil sûres par rapport à l'élévation du niveau de la mer (4.4.2.6.4) ●●●	Élimination des risques liés à l'élévation du niveau de la mer sur le lieu d'origine (4.4.2.6.4)	Accès à de meilleurs services (santé, éducation, logement) dans les zones de relocalisation, possibilités d'emploi et prospérité économique (4.4.2.6.5)	Perte de cohésion sociale, d'identité culturelle et de bien-être. Baisse des services (santé, éducation, logement), des possibilités d'emploi et de la prospérité économique (4.4.2.6.5)	Éléments probants limités (4.4.2.6.7)	Conciliation des intérêts divergents découlant du déplacement de personnes, de l'emplacement d'origine à destination (4.4.2.6.6)
	Déplacement forcé	Ne répond qu'au risque immédiat sur le lieu d'origine	Sans objet	Sans objet	De la perte de vies humaines à la perte de moyens de subsistance, et de la souveraineté (4.4.2.6.5)	Sans objet	Soulève des questions humanitaires complexes touchant les moyens de subsistance, les droits humains et l'équité (4.4.2.6.6)

d) Choix et mise en oeuvre de réponses face à l'élévation du niveau de la mer

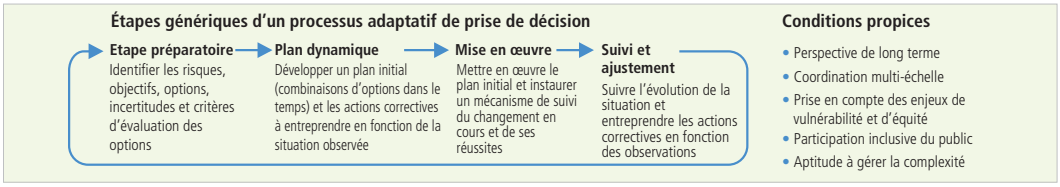


Figure RID.5 | c, d

Figure RID.5 | Élévation du niveau de la mer : risques et réponses. Le terme réponse, et non adaptation, est employé ici car certaines mesures, tel le recul stratégique, peuvent ou non être considérées comme de l'adaptation. La partie **(a)** montre le risque combiné de submersion marine, d'érosion côtière et de salinisation du littoral imputable à la variation des niveaux marins moyens et extrêmes, en 2100, pour divers contextes géographiques illustratifs et en fonction à la fois des RCP2.6 et RCP8.5 et de deux scénarios de réponse. Les risques afférents au RCP4.5 et au RCP6.0 n'ont pas été évalués faute de littérature scientifique suffisante sur les contextes géographiques retenus. L'évaluation ne tient pas compte des variations du niveau extrême qui ne résultent pas directement de l'élévation du niveau moyen de la mer ; le risque pourrait donc croître si l'on incluait d'autres changements dans ces valeurs extrêmes (découlant, par exemple, des changements dans l'intensité des cyclones). Dans le scénario socio-économique de la partie a), la densité de population sur le littoral est relativement stable au cours du siècle {SM4.3.2} Les risques qui pèsent sur les différents contextes géographiques considérés ont été évalués sur la base des variations relatives du niveau de la mer projetées dans une série d'exemples précis : New York, Shanghai et Rotterdam pour les villes côtières riches en ressources, couvrant une large gamme d'expériences de réponses ; Tarawa Sud, Fongafale et Malé pour les îles urbanisées d'atolls ; le Mékong et le Gange-Brahmapoutre-Meghna pour les grands deltas agricoles tropicaux ; Bykovskiy, Shishmaref, Kivalina, Tuktoyaktuk et Shingle Point pour les communautés arctiques non soumises à un ajustement isostatique rapide. {4.2, 4.3.4, SM4.2} L'évaluation examine deux scénarios distincts de réponse. Le scénario « réponse inexistante à modérée » correspond aux efforts déployés à ce jour (sans autre action majeure ou action d'un nouveau type). Le scénario « réponse maximale possible » représente une combinaison d'actions mises en œuvre dans toute leur ampleur et, par conséquent, des efforts supplémentaires importants par rapport à aujourd'hui, en supposant que les obstacles financiers, sociaux et politiques soient minimes. L'évaluation a porté sur chaque scénario d'élévation du niveau de la mer et de réponse, comme l'illustrent les dégradés de couleur de la figure ; les niveaux intermédiaires de risque ont été obtenus par interpolation. {4.3.3}. Les critères d'évaluation comprennent l'exposition et la vulnérabilité (densité des biens, degré de dégradation des écosystèmes tampons terrestres et marins), les aléas côtiers (submersion, érosion, salinisation), les réponses *in situ* (défenses côtières artificielles, restauration des écosystèmes ou création de nouvelles zones tampons naturelles, gestion de la subsidence) et la relocalisation planifiée. Ce dernier terme désigne le recul stratégique ou la réinstallation, comme l'explique le chapitre 4, c'est-à-dire une action préventive et locale visant à réduire le risque en déplaçant les personnes, les biens et les infrastructures. Le déplacement forcé n'est pas pris en compte dans cette évaluation. La partie **(a)** met également en évidence l'apport relatif des mesures *in situ* et de la relocalisation planifiée à la réduction du risque total. La partie **(b)** illustre de manière schématique la réduction du risque (flèches verticales) et la temporalité du risque (flèches horizontales) induites par l'atténuation et/ou les réponses à la montée du niveau de la mer. La partie **(c)** récapitule et évalue les types de réponse face à l'élévation du niveau de la mer quant à leur efficacité et leur coût, leurs co-bénéfices, leurs inconvénients, leur efficacité économique et leurs défis sur le plan de la gouvernance. {4.4.2} La partie **(d)** présente les étapes générales d'une approche adaptative de la prise de décision, ainsi que les conditions clés qui permettent de réagir face à l'élévation du niveau de la mer. {4.4.4 ; 4.4.5}

Conditions favorables

C.4 Favoriser la résilience face aux conséquences du changement climatique et un développement durable dépend de manière critique d'une réduction urgente et ambitieuse des émissions de gaz à effet de serre conjointement à la mise en place durable de mesures d'adaptation coordonnées et de plus en plus ambitieuses (*degré de confiance très élevé*). Parmi les conditions déterminantes pour la mise en œuvre de réponses efficaces aux changements de l'océan et la cryosphère liés au climat, figurent l'intensification de la coopération et de la coordination entre les instances dirigeantes à toutes les échelles spatiales et à tous les horizons de planification. D'autres aspects essentiels sont : l'éducation et la construction d'un socle commun de connaissances vis-à-vis du changement climatique, la surveillance et la prévision, l'utilisation de toutes les sources de savoirs disponibles, le partage des données, de l'informations et des connaissances, la finance, la prise en compte de la vulnérabilité sociale, le respect de l'équité et l'appui institutionnel. Ce type d'investissements favorise le renforcement de capacités, l'apprentissage social et la participation à des mesures d'adaptation spécifiques, de même que la négociation de compromis et l'obtention de co-bénéfices pour réduire les risques à court terme et renforcer la résilience et la soutenabilité à long terme (*degré de confiance élevé*). Ce rapport représente l'état actuel des connaissances scientifiques concernant l'océan et la cryosphère dans le contexte d'un réchauffement planétaire de faible ampleur (1,5 °C), comme l'ont fait les précédents rapports du GIEC et de l'IPBES. {1.1, 1,5, 1.8.3, 2.3.1, 2.3.2, 2.4, figure 2.7, 2.5, 3.5.2, 3.5.4, 4.4, 5.2.2, encadré 5.3, 5.4.2, 5.5.2, 6.4.3, 6.5.3, 6.8, 6.9, encadré thématique 9, figure RID.5}

C.4.1 Au regard des changements observés et projetés dans l'océan et la cryosphère, beaucoup de nations auront des difficultés à s'adapter, même avec des actions d'atténuation ambitieuses (*degré de confiance très élevé*). Dans le cas d'un scénario d'émissions élevées, il est projeté qu'un grand nombre de communautés dépendantes de l'océan et de la cryosphère devront faire face à des limites à leur adaptation (limites biophysiques, géographiques, financières, techniques, sociales, politiques et institutionnelles) au cours de la seconde moitié du XXIe siècle. En comparaison, les scénarios de fortes baisses d'émissions limitent les risques posés par les changements dans l'océan et la cryosphère au cours du siècle actuel et au-delà, et permettent la mise en œuvre de réponses plus efficaces (*degré de confiance élevé*) tout en offrant des co-bénéfices. Des transformations en profondeur de l'économie et des institutions permettront de construire des trajectoires de développement résilientes face au changement climatique dans le contexte de l'océan et de la cryosphère (*degré de confiance élevé*). {1.1, 1.4–1.7, encadrés thématiques 1 à 3 du chapitre 1, 2.3.1, 2.4, encadré 3.2, figure 3.4, encadré thématique 7 du chapitre 3, 3.4.3, 4.2.2, 4.2.3, 4.3.4, 4.4.2, 4.4.3, 4.4.6, 5.4.2, 5.5.3, 6.9.2, encadré thématique 9, figure RID.5}

C.4.2 L'intensification de la coopération et de la coordination entre les instances dirigeantes œuvrant à diverses échelles, juridictions, secteurs, domaines politiques et horizons de planification, peut permettre des réponses efficaces à l'élévation du niveau de la mer ainsi qu'aux changements qui touchent l'océan et la cryosphère (*degré de confiance élevé*). La coopération régionale, y compris par des traités et des conventions, peut soutenir les mesures d'adaptation ; toutefois, la capacité de réponse

aux impacts et aux pertes découlant des changements dans l'océan et la cryosphère par le biais de politiques régionales reste pour l'instant limitée (*degré de confiance élevé*). Les dispositifs institutionnels qui tissent à divers échelons des liens solides avec les communautés locales et autochtones sont bénéfiques pour l'adaptation (*degré de confiance élevé*). La coordination et la complémentarité des politiques nationales et régionales transfrontalières peuvent soutenir les efforts déployés pour faire face aux risques qui pèsent sur la protection et la gestion des ressources, telles l'eau et celles issues de la pêche (*degré de confiance moyen*). {2.3.1, 2.3.2, 2.4, encadré 2.4, 2.5, 3.5.2, 3.5.3, 3.5.4, 4.4.4, 4.4.5, tableau 4.9, 5.5.2, 6.9.2}

C.4.3 L'expérience acquise à ce jour – pour répondre à l'élévation du niveau de la mer, aux risques hydrologiques dans certaines régions de haute montagne, aux risques posés par le changement climatique dans l'Arctique, etc. – révèle également l'intérêt d'adopter une perspective à long terme lors de la prise de décisions à court terme, en tenant explicitement compte de l'incertitude sur les risques spécifiques à chaque contexte au-delà de 2050 (*degré de confiance élevé*), et de renforcer les capacités de gouvernance pour aborder des risques complexes (*degré de confiance moyen*). {2.3.1, 3.5.4, 4.4.4, 4.4.5, tableau 4.9, 5.5.2, 6.9, figure RID.5}

C.4.4 Les investissements dans l'éducation et le renforcement des capacités à différents niveaux et échelons facilite l'apprentissage social et renforcent la capacité à long terme de réagir en fonction du contexte pour réduire les risques et améliorer la résilience (*degré de confiance élevé*). Cela inclut spécifiquement l'intégration dans le processus décisionnel de plusieurs types de savoirs ainsi que des informations climatiques régionales, l'association des communautés locales, des peuples autochtones et des parties prenantes pertinentes aux dispositifs de gouvernance adaptative et aux cadres de planification (*degré de confiance moyen*). La promotion d'un socle commun de connaissances vis-à-vis du changement climatique et la mise à profit des types de savoirs locaux, autochtones et scientifiques sont propices à la sensibilisation du public, la compréhension et l'apprentissage social au sujet des spécificités des risques locaux et des réponses possibles pour y faire face (*degré de confiance élevé*). Ce type d'investissement peut permettre de développer, et, dans bien des cas, de transformer les institutions en place et de mettre en place des dispositifs pour une gouvernance éclairée, interactive et adaptative (*degré de confiance élevé*). {1.8.3, 2.3.2, figure 2.7, encadré 2.4, 2.4, 3.5.2, 3.5.4, 4.4.4, 4.4.5, tableau 4.9, 5.5.2, 6.9}

C.4.5 La surveillance et la prévision locales des changements dans l'océan et la cryosphère éclairent la planification et la mise en œuvre de l'adaptation, et facilitent la prise de décisions robustes quant aux compromis entre les gains à court et long terme (*degré de confiance moyen*). Le suivi continu à long terme, le partage des données, des informations et des connaissances et l'amélioration des prévisions adaptées aux contextes locaux, y compris les systèmes d'alerte précoce pour mieux prévoir les épisodes El Niño/La Niña plus intenses, les cyclones tropicaux et les vagues de chaleur marines, aident à gérer les impacts négatifs des changements de l'océan, comme les pertes pour les pêcheries, et les conséquences néfastes pour la santé humaine, la sécurité alimentaire, l'agriculture, les récifs coralliens, l'aquaculture, les feux de forêt, le tourisme, la conservation, la sécheresse et les inondations (*degré de confiance élevé*). {2.4, 2.5, 3.5.2, 4.4.4, 5.5.2, 6.3.1, 6.3.3, 6.4.3, 6.5.3, 6.9}

C.4.6 Accorder la priorité aux mesures permettant de remédier à la vulnérabilité sociale et prenant en compte l'équité étaye les efforts pour promouvoir une résilience climatique qui soit équitable et juste et un développement soutenable (*degré de confiance élevé*), et peut être facilité par la création de cadres communautaires sûrs permettant la participation active du public, la délibération et la résolution de conflits (*degré de confiance moyen*). {Encadré 2.4, 4.4.4, 4.4.5, tableau 4.9, figure RID.5}

C.4.7 Cette évaluation portant sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique révèle les bénéfices d'une atténuation ambitieuse et d'une adaptation efficace pour le développement durable et, à l'inverse, l'escalade des coûts et des risques inhérents à une action tardive. La possibilité de suivre des trajectoires de développement favorisant la résilience face au changement climatique varie selon et parmi les régions océaniques, les zones de haute montagne et les régions terrestres polaires, de même qu'à l'intérieur de celles-ci. Des transformations en profondeur sont nécessaires pour concrétiser cette possibilité. Cela souligne l'urgence de donner la priorité à une action rapide, ambitieuse, concertée et tenace. (*degré de confiance très élevé*) {1.1, 1.8, encadré thématique 1 du chapitre 1, 2.3, 2.4, 3.5, 4.2.1, 4.2.2, 4.3.4, 4.4, tableau 4.9, 5.5, 6.9, encadré thématique 9, figure RID.5}



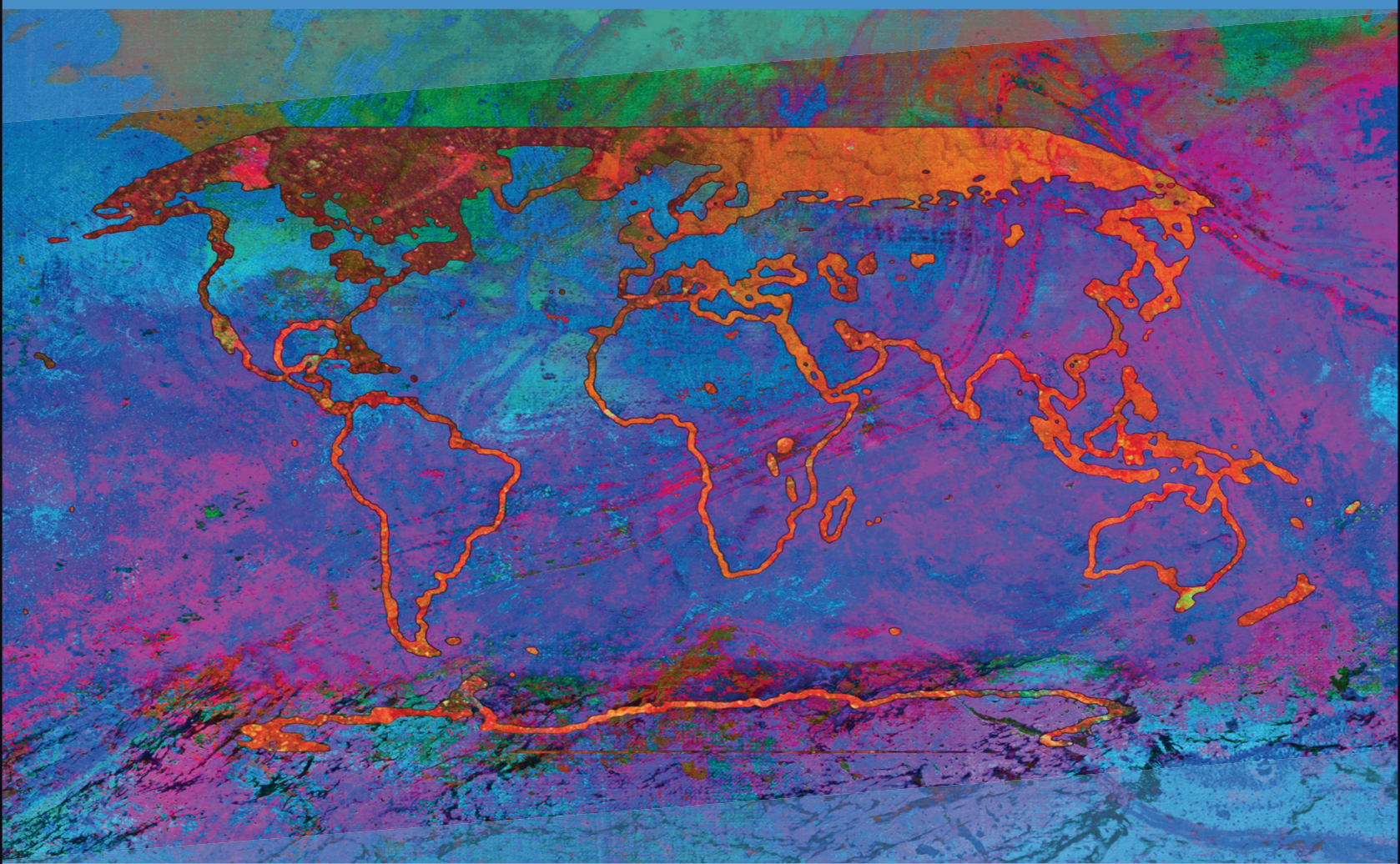
giec

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR l'évolution du climat

Changement climatique 2021

Les bases scientifiques physiques

Résumé à l'intention des décideurs



GTI

Contribution du Groupe de travail I
au sixième Rapport d'évaluation du Groupe
d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

OMM PNUE

Changement climatique 2021
Les bases scientifiques physiques

Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Publié sous la direction de

Valérie Masson-Delmotte
Coprésidente du Groupe de travail I

Panmao Zhai
Coprésident du Groupe de travail I

Anna Pirani
Responsable de l'unité d'appui technique

Sarah L. Connors
Responsable de l'équipe scientifique

Clotilde Péan
Responsable des opérations

Yang Chen
Conseiller scientifique senior

Leah Goldfarb
Conseillère scientifique senior

Melissa I. Gomis
Conseillère scientifique senior

J.B.Robin Matthews
Conseiller scientifique senior

Sophie Berger
Conseillère scientifique

Mengtian Huang
Conseillère scientifique

Ozge Yelekçi
Conseillère scientifique

Rong Yu
Conseillère scientifique

Baiquan Zhou
Conseiller scientifique

Elisabeth Lonnoy
Assistante de projet

Thomas K. Maycock
Rédacteur scientifique

Tim Waterfield
Responsable informatique

Katherine Leitzell
Responsable de la communication

Nada Caud
Responsable de la vulgarisation scientifique

Unité d'appui technique du Groupe de travail I

Illustration artistique de la couverture : *Changing (Changement)* par Alisa Singer. www.environmentalgraphiti.org © 2021 Alisa Singer

© 2021, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
Imprimé en octobre 2021 par le GIEC, Suisse.
Il est possible de se procurer des exemplaires électroniques du présent Résumé à l'intention des décideurs sur le site Web du GIEC www.ipcc.ch

ISBN 978-92-9169-258-3

Résumé à l'intention des décideurs



RID

Résumé à l'intention des décideurs

Équipe de rédaction:

Richard P. Allan (Royaume-Uni), Paola A. Arias (Colombie), Sophie Berger (France/Belgique), Josep G. Canadell (Australie), Christophe Cassou (France), Deliang Chen (Suède), Annalisa Cherchi (Italie), Sarah L. Connors (France/ Royaume-Uni), Erika Coppola (Italie), Faye Abigail Cruz (Philippines), Aïda Diongue-Niang (Sénégal), Francisco J. Doblas-Reyes (Espagne), Hervé Douville (France), Fatima Driouech (Maroc), Tamsin L. Edwards (Royaume-Uni), François Engelbrecht (Afrique du Sud), Veronika Eyring (Allemagne), Erich Fischer (Suisse), Gregory M. Flato (Canada), Piers Forster (Royaume-Uni), Baylor Fox-Kemper (États-Unis d'Amérique), Jan S. Fuglestvedt (Norvège), John C. Fyfe (Canada), Nathan P. Gillett (Canada), Melissa I. Gomis (France/Suisse), Sergey K. Gulev (Fédération de Russie), José Manuel Gutiérrez (Espagne), Rafiq Hamdi (Belgique), Jordan Harold (Royaume-Uni), Mathias Hauser (Suisse), Ed Hawkins (Royaume-Uni), Helene T. Hewitt (Royaume-Uni), Tom Gabriel Johansen (Norvège), Christopher Jones (Royaume-Uni), Richard G. Jones (Royaume-Uni), Darrell S. Kaufman (États-Unis d'Amérique), Zbigniew Klimont (Autriche/Pologne), Robert E. Kopp (États-Unis d'Amérique), Charles Koven (États-Unis d'Amérique), Gerhard Krinner (France/Allemagne, France), June-Yi Lee (République de Corée), Irene Lorenzoni (Royaume-Uni /Italie), Jochem Marotzke (Allemagne), Valérie Masson-Delmotte (France), Thomas K. Maycock (États-Unis d'Amérique), Malte Meinshausen (Australie/Allemagne), Pedro M.S. Monteiro (Afrique du Sud), Angela Morelli (Norvège/Italie), Vaishali Naik (États-Unis d'Amérique), Dirk Notz (Allemagne), Friederike Otto (Royaume-Uni /Allemagne), Matthew D. Palmer (Royaume-Uni), Izidine Pinto (Afrique du Sud/Mozambique), Anna Pirani (Italie), Gian-Kasper Plattner (Suisse), Krishnan Raghavan (Inde), Roshanka Ranasinghe (Pays Bas/Sri Lanka, Australie), Joeri Rogelj (Royaume-Uni/Belgique), Maisa Rojas (Chili), Alex C. Ruane (États-Unis d'Amérique), Jean-Baptiste Sallée (France), Bjørn H. Samset (Norvège), Sonia I. Seneviratne (Suisse), Jana Sillmann (Norvège/Allemagne), Anna A. Sörensson (Argentine), Tannecia S. Stephenson (Jamaïque), Trude Storelvmo (Norvège), Sophie Szopa (France), Peter W. Thorne (Irlande/ Royaume-Uni), Blair Trewin (Australie), Robert Vautard (France), Carolina Vera (Argentine), Noureddine Yassaa (Algérie), Sönke Zaehle (Allemagne), Panmao Zhai (Chine), Xuebin Zhang (Canada), Kirsten Zickfeld (Canada/Allemagne)

Auteurs contributeurs:

Krishna M. AchutaRao (Inde), Bhupesh Adhikary (Népal), Edvin Aldrian (Indonésie), Kyle Armour (États-Unis d'Amérique), Govindasamy Bala (Inde/États-Unis d'Amérique), Rondrotiana Barimalala (Afrique du Sud/ Madagascar), Nicolas Bellouin (Royaume-Uni/France), William Collins (Royaume-Uni), William D. Collins (États-Unis d'Amérique), Susanna Corti (Italie), Peter M. Cox (Royaume-Uni), Frank J. Dentener (EU/Pays-Bas), Claudine Dereczynski (Brésil), Alejandro Di Luca (Australie, Canada/Argentine), Alessandro Dosio (Italie), Leah Goldfarb (France/États-Unis d'Amérique), Irina V. Gorodetskaya (Portugal/Belgique, Fédération de Russie), Pandora Hope (Australie), Mark Howden (Australie), A. K. M. Saiful Islam (Bangladesh), Yu Kosaka (Japon), James Kossin (États-Unis d'Amérique), Svitlana Krakovska (Ukraine), Chao Li (Chine), Jian Li (Chine), Thorsten Mauritsen (Allemagne/Danemark), Sebastian Milinski (Allemagne), Seung-Ki Min (République de Corée), Thanh Ngo Duc (Vietnam), Andy Reisinger (Nouvelle Zélande), Lucas Ruiz (Argentine), Shubha Sathyendranath (Royaume-Uni/Canada, citoyen indien d'outre-mer), Aimée B. A. Slangen (Pays-Bas), Chris Smith (Royaume-Uni), Izuru Takayabu (Japon), Muhammad Irfan Tariq (Pakistan), Anne-Marie Treguier (France), Bart van den Hurk (Pays-Bas), Karina von Schuckmann (France/Allemagne), Cunde Xiao (Chine)

Résumé à référencer comme suit:

GIEC, 2021 : Résumé à l'intention des décideurs. In: *Changement climatique 2021: les bases scientifiques physiques.* Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [publié sous la direction de Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, et B. Zhou]. Cambridge University Press.

Introduction

Ce Résumé à l'intention des décideurs (RID) présente les principales conclusions de la contribution du Groupe de travail I (GTI) au sixième Rapport d'évaluation (AR6)[1] du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) concernant les bases scientifiques physiques du changement climatique. Ce Rapport s'appuie sur la précédente contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (AR5), en 2013, et sur les rapports spéciaux du GIEC de l'AR6 de 2018 et 2019[2] ; et il intègre de nouveaux éléments scientifiques postérieurs issus des sciences du climat[3].

Ce RID fournit un résumé de haut niveau de la compréhension de l'état actuel du climat, y compris la manière dont il est en train de changer et le rôle de l'influence humaine dans ces changements. Il présente également l'état des connaissances sur les évolutions futures possibles du climat, les informations climatiques pertinentes pour différentes régions et secteurs, ainsi que les conditions géophysiques permettant de limiter le changement climatique induit par les activités humaines.

En fonction des connaissances scientifiques, les conclusions principales peuvent être formulées comme des faits établis, ou être associées à un niveau de confiance, formulé selon le langage « calibré » défini par le GIEC[4].

Les bases scientifiques sur lesquelles se fonde chaque conclusion principale se trouvent dans les sections des chapitres du Rapport principal et leur synthèse intégrée présentée dans le Résumé technique (ci-après RT) ; ces références sont indiquées entre accolades. L'Atlas interactif du GTI de l'AR6 permet d'explorer cette synthèse des résultats clés et les informations sur le changement climatique qui les sous-tendent, dans les diverses régions de référence du GTI[5].

A. L'état actuel du climat

Depuis l'AR5, les améliorations apportées aux estimations issues des observations et aux informations extraites des archives paléoclimatiques fournissent une vue d'ensemble de chacune des composantes du système climatique et de leurs changements en cours. De nouvelles simulations issues de modèles climatiques, de nouvelles analyses, et des méthodes intégrant de multiples éléments probants ont permis de mieux comprendre l'influence humaine sur un plus grand jeu de variables climatiques, y compris les extrêmes météorologiques et climatiques. Les périodes examinées dans cette section dépendent de la disponibilité des produits d'observations, des archives paléoclimatiques et des études scientifiques évaluées par les pairs.

A.1 Il est sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, l'océan et les terres. Des changements généralisés et rapides se sont produits dans l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la biosphère. {2.2, 2.3, encadré thématique 2.3, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 5.2, 5.3, 6.4, 7.3, 8.3, 9.2, 9.3, 9.5, 9.6, encadré thématique 9.1} (figure RID.1, figure RID.2)

A.1.1 Les augmentations des concentrations de gaz à effet de serre (GES) bien mélangés dans l'atmosphère, observées depuis environ 1750, résultent, sans équivoque, des activités humaines. Depuis 2011 (date des dernières mesures prises en compte dans l'AR5), les concentrations atmosphériques ont continué à augmenter, pour atteindre, en 2019, des moyennes annuelles de 410 parties par million (ppm) pour le dioxyde de carbone (CO_2), 1866 parties par milliard (ppb) pour le méthane (CH_4) et 332 ppb pour le protoxyde d'azote (N_2O)[6]. Au cours des six dernières décennies, les terres émergées et l'océan ont absorbé une proportion

---

1 Décision GIEC/XLVI-2.

2 Les trois Rapports spéciaux sont les suivants: 1) « Réchauffement planétaire de 1,5 °C. Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté » (SR1.5) ; 2) « Changement climatique et terres émergées : Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres» (SRCCL) ; 3) « Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique » (SROCC).

3 Cette évaluation se fonde sur la littérature scientifique retenue pour publication à l'échéance du 31 janvier 2021.

4 Chaque conclusion se fonde sur une évaluation des éléments probants et de leur degré de concordance. Cinq qualificatifs sont utilisés pour exprimer le degré de confiance : très faible, faible, moyen, élevé et très élevé. Le degré de confiance d'un résultat est indiqué après celui-ci, entre parenthèses et en italique, comme ceci : *(degré de confiance moyen)*. Les qualificatifs ci-après sont utilisés pour indiquer la probabilité évaluée d'un résultat : *quasi-certain* (probabilité de 99 à 100 %), *très probable* (90 à 100 %), *probable* (66 à 100 %), à *peu près aussi probable qu'improbable* (33 à 66 %), *improbable* (0 à 33 %), *très improbable* (0 à 10 %), *extraordinairement improbable* (0 à 1 %). D'autres qualificatifs peuvent également être utilisés le cas échéant : *extrêmement probable* (95-100 %) ; *plus probable qu'improbable* (>50-100 %) ; et *extrêmement improbable* (0-5 %). La probabilité évaluée est indiqué en italique, par exemple : *très probable*. Cette terminologie est conforme à celle du cinquième Rapport d'évaluation (AR5). Sauf indication contraire, les crochets [de x à y] indiquent la fourchette estimée comme *très probable*, correspondant à l'intervalle de confiance à 90 %.

5 L'Atlas interactif est disponible sur le site https://interactive-atlas.ipcc.ch.

6 Pour les autres GES, les concentrations en 2019 étaient les suivantes : hydrocarbures perfluorés (PFC) : 109 parties par trillion (ppt) équivalent CF_4 ; hexafluorure de soufre (SF_6) : 10 ppt ; trifluorure d'azote (NF_3) : 2 ppt ; hydrofluorocarbones (HFC) : 237 ppt équivalent HFC-134a ; autres gaz du protocole de Montréal (principalement les chlorofluorocarbones (CFC) et les hydrochlorofluorocarbones (HCFC)) : 1032 ppt équivalent CFC-12. Les augmentations par rapport à 2011 sont de : 19 ppm pour le CO_2, 63 ppb pour le CH_4 et 8 ppb pour le N_2O.

presque constante des émissions de CO_2 d'origine anthropique (environ 56 % par an à l'échelle globale), avec des différences régionales (*degré de confiance élevé*)[7].
{2.2, 5.2, 7.3, RT.2.2, encadré RT.5}

A.1.2 Chacune des quatre dernières décennies a été successivement plus chaude que toutes celles qui l'ont précédée depuis 1850. La hausse de la température à la surface du globe[8] au cours des deux premières décennies du 21e siècle (2001–2020) est de 0,99 °C [0,84–1,10 °C] par rapport à 1850–1900[9]. Elle est plus élevée de 1,09 °C [0,95–1,20 °C] sur la période 2011–2020 qu'en 1850–1900, avec un réchauffement plus prononcé au-dessus des terres émergées (1,59 °C [1,34–1,83 °C]) qu'à la surface de l'océan (0,88 °C [0,68–1,01 °C]). La hausse estimée de la température à la surface du globe depuis l'AR5 est principalement due à la poursuite du réchauffement depuis la période 2003–2012 (+0,19 °C [0,16–0,22 °C]). En outre, des améliorations méthodologiques et l'utilisation de nouveaux jeux de données ont contribué pour environ 0,1 °C à l'estimation réactualisée du réchauffement dans l'AR6[10].
{2.3, encadré thématique 2.3} (figure RID.1)

A.1.3 La fourchette *probable* de l'augmentation de la température à la surface du globe due à l'ensemble des activités humaines entre 1850–1900 et 2010–2019[11] est de 0,8 °C à 1,3 °C, avec une meilleure estimation de 1,07 °C. La fourchette *probable* du réchauffement dû aux GES bien mélangés est de 1,0 °C à 2,0 °C, celle de l'effet refroidissant des autres facteurs humains (principalement les aérosols) est de 0,0 °C à 0,8 °C, l'effet des facteurs naturels se situe entre –0,1 °C et +0,1 °C et l'effet de la variabilité interne entre –0,2 °C et +0,2 °C. Il est *très probable* que les GES bien mélangés sont le principal facteur[12] du réchauffement de la troposphère depuis 1979 et *extrêmement probable* que l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique dû aux activités humaines a été le principal facteur du refroidissement de la basse stratosphère entre 1979 et le milieu des années 1990.
{3.3, 6.4, 7.3, RT 2.3, encadré thématique RT.1, RT.2.3} (figure RID.2)

A.1.4 Les précipitations moyennées à l'échelle mondiale sur les terres émergées ont *probablement* augmenté depuis 1950, avec un rythme plus rapide depuis les années 1980 (*degré de confiance moyen*). Il est *probable* que l'influence humaine a contribué à la structure spatiale des changements observés de précipitations depuis le milieu du 20e siècle et il est *extrêmement probable* qu'elle a contribué à la structure des changements observés de salinité de l'océan de surface. Les trajectoires des tempêtes aux latitudes moyennes se sont *probablement* déplacées vers les pôles dans les deux hémisphères depuis les années 1980, avec une forte saisonnalité de ces tendances (*degré de confiance moyen*). Dans l'hémisphère sud, l'influence humaine a *très probablement* contribué au déplacement vers le pôle du courant-jet extratropical (un phénomène étroitement lié aux trajectoires des tempêtes) durant l'été austral.
{2.3, 3.3, 8.3, 9.2, RT 2.3, RT 2.4, encadré RT 6}

A.1.5 L'influence humaine est *très probablement* le principal facteur du recul des glaciers à l'échelle planétaire depuis les années 1990 et de la diminution de l'étendue de la glace de mer de l'Arctique entre 1979–1988 et 2010–2019 (diminutions d'environ 40 % en septembre et d'environ 10 % en mars). L'étendue de la glace de mer de l'Antarctique ne montre pas de tendance significative entre 1979 et 2020, en raison de tendances régionales de signe opposé et d'une forte variabilité interne. L'influence humaine a *très probablement* contribué à la diminution du manteau neigeux printanier de l'hémisphère nord depuis 1950. Il est *très probable* qu'elle a contribué à la fonte en surface de la calotte glaciaire du Groenland observée au cours des deux dernières décennies, mais il n'existe que *des éléments probants limités*, avec un *degré de concordance moyen*, quant à l'influence humaine sur la perte de masse de la calotte glaciaire antarctique.
{2.3, 3.4, 8.3, 9.3, 9.5, RT.2.5}

A.1.6 Il est *quasi-certain* que la partie supérieure de l'océan mondial (0–700 m) s'est réchauffée depuis les années 1970 et il est *extrêmement probable* que l'influence humaine en est le principal facteur. Il est *quasi-certain* que les émissions de CO_2 d'origine

---

7 Les terres émergées et les océans ne sont pas des puits substantiels pour les autres GES.

8 Dans le présent RID, le terme « température à la surface du globe » désigne aussi bien la température moyenne à la surface du globe que la température moyenne de l'air à la surface du globe. Il est estimé, avec *un degré de confiance élevé*, que les changements de ces grandeurs physiques diffèrent d'au maximum 10 %, mais le *degré de confiance* concernant le signe d'une éventuelle différence entre leurs tendances à long terme est *faible*, en raison d'éléments contradictoires. {encadré thématique RT.1}

9 La période 1850–1900 est la période le plus ancienne pour laquelle les observations sont suffisamment complètes à l'échelle planétaire pour estimer la température à la surface du globe. Comme dans l'AR5 et le SR1.5, elle est utilisée ici comme une approximation des conditions préindustrielles.

10 Depuis l'AR5, des progrès méthodologiques et de nouveaux jeux de données ont permis une représentation spatiale plus complète des changements de la température de surface, y compris dans l'Arctique. Ces progrès, accompagnés d'autres améliorations, ont conduit à réévaluer à la hausse (d'environ 0,1 °C) l'estimation du changement de température à la surface du globe, mais cet ajustement ne représente donc pas un réchauffement physique supplémentaire depuis l'AR5.

11 La période mentionnée ici ne coïncide pas avec celle du paragraphe A.1.2, car les études d'attribution se fondent sur cette période légèrement antérieure. Le réchauffement observé jusqu'en 2010-2019 s'élève à 1,06 °C [0,88–1,21 °C].

12 Dans le présent RID, l'expression « principal facteur » signifie « responsable de plus de 50 % du changement ».

humaine sont le principal facteur de l'acidification actuelle des eaux de surface en haute mer à l'échelle mondiale. Depuis le milieu du 20e siècle, les niveaux d'oxygène ont chuté dans la couche supérieure de nombreuses régions océaniques (*degré de confiance élevé*), et l'influence humaine a contribué à cette diminution (*degré de confiance moyen*).
{2.3, 3.5, 3.6, 5.3, 9.2, RT.2.4}

A.1.7 Sur l'ensemble du globe, le niveau moyen de la mer s'est élevé de 0,20 m [0,15 à 0,25 m] entre 1901 et 2018. Le rythme moyen de cette élévation était de 1,3 mm/an [0,6 à 2,1 mm/an] entre 1901 et 1971. Il est passé à 1,9 mm/an [0,8–2,9 mm/an] entre 1971 et 2006, puis a encore augmenté pour atteindre 3,7 mm/an [3,2–4,2 mm/an] entre 2006 et 2018 (*degré de confiance élevé*). L'influence humaine est *très probablement* le principal facteur de cette élévation depuis au moins 1971.
{2.3, 3.5, 9.6, encadré thématique 9.1, encadré RT.4}

A.1.8 Les changements survenus dans la biosphère terrestre depuis 1970 sont cohérents avec le réchauffement planétaire : dans les deux hémisphères, les zones climatiques se sont déplacées vers les pôles, et la saison de croissance de la végétation s'est allongée en moyenne jusqu'à deux jours par décennie depuis les années 1950 dans les régions extratropicales de l'hémisphère nord (*degré de confiance élevé*).
{2.3, RT.2.6}

L'influence humaine a réchauffé le climat à un rythme sans précédent depuis au moins 2000 ans.

Changement de la température à la surface du globe par rapport à la période 1850–1900

a) Changement de la température à la surface du globe (moyenne décennale) reconstruit (1-2000) et **observé** (1850–2020)

b) Changement de la température à la surface du globe (moyenne annuelle) observé et simulé en considérant les facteurs humains et naturels et les facteurs naturels uniquement (1850–2020 pour les deux)

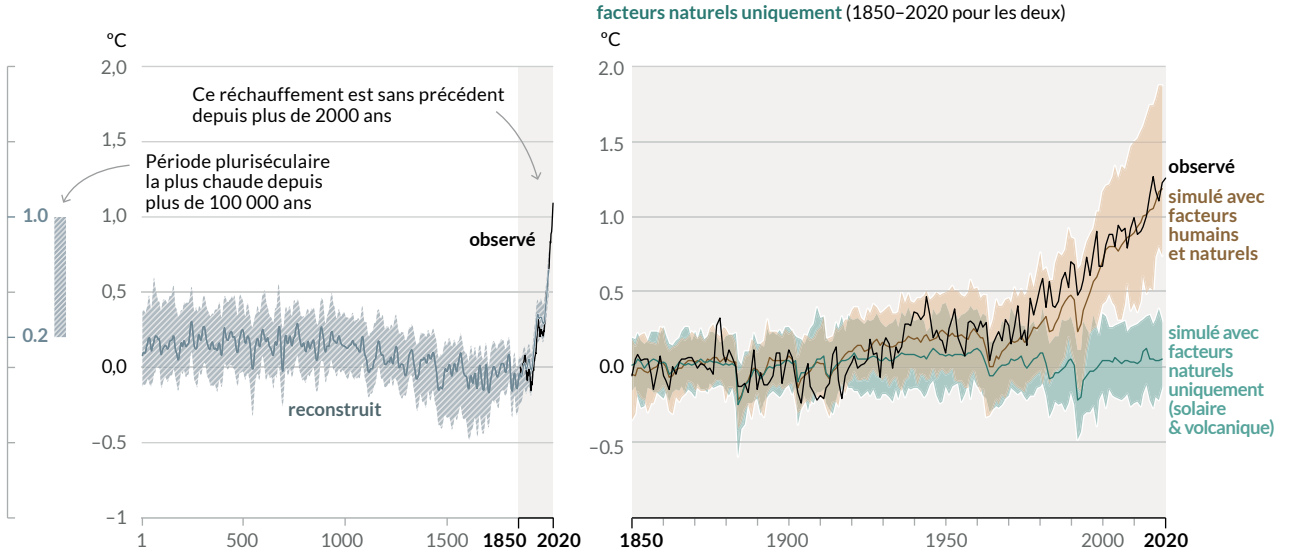


Figure RID.1 | Historique des changements de température à l'échelle planétaire et causes du réchauffement récent.

Panneau (a) Changements de la température à la surface du globe reconstruits à partir des archives paléoclimatiques (courbe grise pleine, années 1–2000) **et issus des observations directes** (courbe noire pleine, 1850–2020), par rapport à 1850–1900 et en moyenne décennale. La barre verticale de gauche indique les variations de température estimées (fourchette *très probable*) au cours de la période pluriséculaire la plus chaude depuis au moins 100 000 ans, et qui s'est produite il y a environ 6500 ans, pendant la période interglaciaire actuelle (Holocène). La dernière période interglaciaire, qui remonte à il y a environ 125 000 ans, est la précédente période passée la plus récente susceptible d'avoir connu une température plus élevée. Ces périodes chaudes passées ont été causées par des variations orbitales lentes (plurimillénaires). L'enveloppe grise hachurée, striée de lignes diagonales blanches, indique les fourchettes *très probables* des reconstructions de température.

Panneau (b) Changements de la température à la surface du globe au cours des 170 dernières années (ligne noire) par rapport à 1850–1900 et en moyenne annuelle, comparés aux changements simulés par les modèles climatiques de la phase 6 du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP6) (voir encadré RID.1) en réponse aux facteurs humains et naturels conjugués (ligne marron) ou aux facteurs naturels uniquement (activité solaire et volcanique, ligne verte). Les lignes pleines colorées indiquent la moyenne multi-modèle, et les enveloppes colorées indiquent la fourchette *très probable* des températures simulées. (Voir la figure RID.2 pour l'évaluation des 'contributions 'au réchauffement).

{2.3.1 ; encadré thématique 2.3 ; 3.3 ; RT.2.2 ; encadré thématique TS.1, figure 1a}

Le réchauffement observé est dû aux émissions issues des activités humaines, le réchauffement dû aux gaz à effet de serre étant partiellement masqué par le refroidissement dû aux aérosols

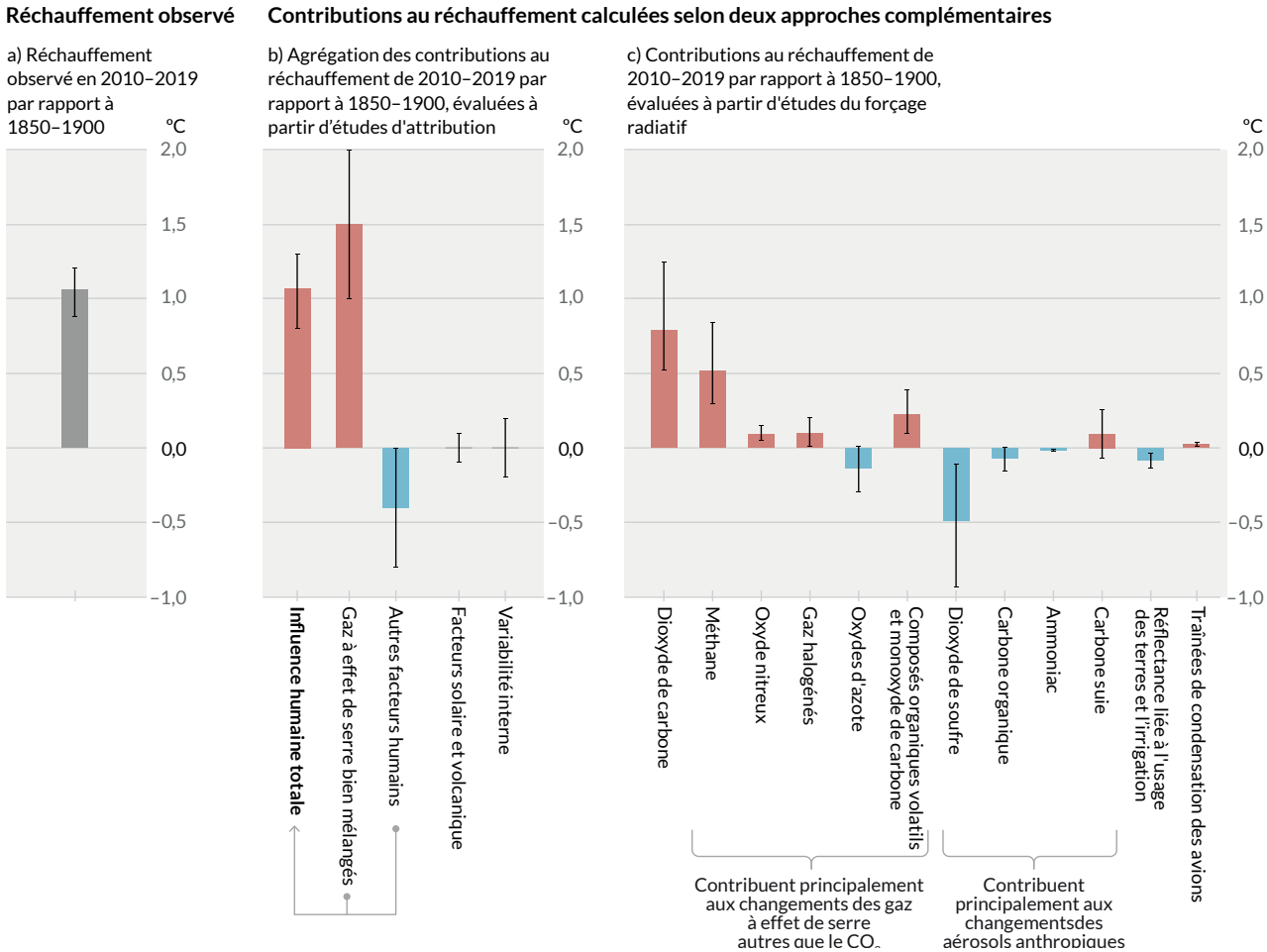


Figure RID.2 | Evaluation des contributions au réchauffement observé sur la période 2010–2019 par rapport à la période 1850–1900.

Panneau (a) Réchauffement planétaire observé (augmentation de la température à la surface du globe) et fourchette *très probable*.

Panneau (b) Eléments probants provenant des études d'attribution, qui synthétisent les informations provenant des modèles climatiques et des observations. Le panneau montre les changements de température attribuées : à l'influence humaine totale ; aux changements de concentration des gaz à effet de serre bien mélangés ; aux autres facteurs humains dus aux aérosols, à l'ozone et au changement d'affectation des terres (réfléctance liée à l'usage des terres), aux facteurs solaires et volcaniques, et à la variabilité interne du climat. Les moustaches indiquent les fourchettes *probables.*

Panneau (c) Eléments probants provenant de l'évaluation du forçage radiatif et de la sensibilité du climat. Ce panneau montre les changements de température dus à chaque composante de l'influence humaine : les émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols et de leurs précurseurs, les changements d'affectation des terres (réflectance liée à l'usage des terres et irrigation), et les traînées de condensation des avions. Les moustaches indiquent les fourchettes *très probables*. Les estimations tiennent compte des émissions directes dans l'atmosphère comme de leurs effets éventuels sur d'autres facteurs climatiques. En ce qui concerne les aérosols, tant les effets directs (*via* le rayonnement) que les effets indirects (*via* l'interaction avec les nuages) sont pris en compte.

{encadré thématique 2.3, 3.3.1, 6.4.2, 7.3}

A.2 L'ampleur des changements récents dans l'ensemble du système climatique, et l'état actuel de nombreux aspects du système climatique, sont sans précédent depuis plusieurs siècles à plusieurs milliers d'années. {2.2, 2.3, encadré thématique 2.1, 5.1} (figure RID.1)

A.2.1 En 2019, les concentrations atmosphériques de CO_2 ont été les plus élevées depuis au moins 2 millions d'années (*degré de confiance élevé*) et les concentrations de CH_4 et de N_2O ont été les plus élevées depuis au moins 800 000 ans (*degré de confiance très élevé*). Depuis 1750, les augmentations des concentrations de CO_2 (47 %) et de CH_4 (156 %) dépassent largement – et les augmentations de N_2O (23 %) sont similaires à – l'ampleur de leurs variations naturelles plurimillénaires entre les périodes glaciaires et interglaciaires des derniers 800 000 ans au moins (*confiance très élevée*).
{2.2, 5.1, RT.2.2}

A.2.2 La température à la surface du globe a augmenté plus rapidement depuis 1970 que sur toute autre période de 50 ans au cours des 2000 dernières années au moins (*degré de confiance élevé*). Les températures de la décennie la plus récente (2011–2020) ont dépassé celles de la période chaude pluriséculaire la plus récente, il y a environ 6500 ans[13] [avec une élévation de 0,2 °C à 1 °C par rapport à 1850–1900] (*degré de confiance moyen*). Il faut remonter à il y a environ 125 000 ans pour trouver une période chaude avec une variation de température pluriséculaire [+0,5 °C à 1,5 °C par rapport à 1850–1900] qui englobe celle observée pour la décennie la plus récente (*degré de confiance moyen*).
{2.3, encadré thématique 2.1, encadré thématique RT.1} (figure RID.1)

A.2.3 Sur la période 2011–2020, l'étendue moyenne annuelle de glace de mer de l'Arctique a atteint son niveau le plus bas depuis au moins 1850 (*degré de confiance élevé*). À la fin de l'été, l'étendue de la glace de mer arctique est la plus basse depuis au moins mille ans (*degré de confiance moyen*). Le caractère planétaire du recul des glaciers depuis les années 1950, un phénomène qui touche simultanément la quasi-totalité des glaciers du monde, est sans précédent depuis au moins 2000 ans (*degré de confiance moyen*).
{2.3, RT.2.5}

A.2.4 Le niveau moyen de la mer à l'échelle du globe s'est élevé plus rapidement depuis 1900 qu'au cours de tout autre siècle au cours des trois derniers millénaires (*degré de confiance élevé*). L'océan mondial s'est réchauffé plus rapidement au cours du siècle dernier que depuis la fin de la dernière déglaciation (il y a environ 11 000 ans) (*degré de confiance moyen*). Une augmentation du pH des eaux de surface en haute mer s'est produite à long terme au cours des 50 derniers millions d'années (*degré de confiance élevé*). Cependant, un pH des eaux de surface en haute mer aussi bas que celui des dernières décennies est inhabituel au cours des 2 derniers millions d'années (*degré de confiance moyen*).
{2.3, RT.2.4, encadré RT.4}

A.3 Le changement climatique d'origine humaine affecte déjà de nombreux extrêmes météorologiques et climatiques dans toutes les régions du monde. Les preuves des changements observés dans les extrêmes tels que les vagues de chaleur, les précipitations extrêmes, les sécheresses et les cyclones tropicaux, et notamment de leur attribution à l'influence humaine, se sont accumulées depuis l'AR5. {2.3, 3.3, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, encadré 8.1, encadré 8.2, encadré 9.2, 10.6, 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.7, 11.8, 11.9, 12.3} (figure RID.3)

A.3.1 Il est *quasi-certain* que les extrêmes chauds (y compris les vagues de chaleur) sont devenus plus fréquents et plus intenses dans la plupart des terres émergées depuis les années 1950, tandis que les extrêmes froids (y compris les vagues de froid) sont devenus moins fréquents et moins sévères, le changement climatique d'origine humaine étant, avec un *degré de confiance élevé*, le principal facteur[14] de ces changements. Certains extrêmes chauds observés au cours de la dernière décennie auraient été *extrêmement improbables* sans l'influence humaine sur le système climatique. La fréquence des vagues de chaleur marines a approximativement doublé depuis les années 1980 (*degré de confiance élevé*) et l'influence humaine a *très probablement* contribué à la plupart d'entre elles depuis au moins 2006.
{encadré 9.2, 11.2, 11.3, 11.9, TS.2.4, RT.2.6, encadré RT.10} (figure RID.3)

A.3.2 La fréquence et l'intensité des précipitations extrêmes ont augmenté depuis les années 1950 sur la plupart des terres émergées pour lesquelles les données d'observation sont suffisantes pour procéder à une analyse des tendances (*degré de confiance élevé*), et le changement climatique d'origine humaine en est *probablement* le principal facteur. Le changement climatique

13 Comme indiqué à la section B.1, même dans le cadre du scénario d'émissions très basses SSP1-1.9, il est estimé que les températures futures resteront plus élevées que celles de la décennie la plus récente jusqu'en 2100 au moins, et seront donc plus chaudes que celles de la période d'il y a 6500 ans, à l'échelle du siècle.

14 Dans le présent RID, « principal facteur » signifie « responsable de plus de 50 % du changement ».

d'origine humaine a contribué à l'augmentation des sécheresses de type agricole et écologique[15] dans certaines régions, en raison de l'augmentation de l'évapotranspiration[16] au-dessus des terres émergées (*degré de confiance moyen*). {8.2, 8.3, 11.4, 11.6, 11.9, RT.2.6, encadré RT.10} (figure RID.3)

A.3.3 La diminution des précipitations[17] de la mousson globale au-dessus des terres émergées entre les années 1950 et les années 1980 est en partie attribuée aux émissions d'aérosols d'origine humaine dans l'hémisphère nord, mais l'augmentation observée depuis lors est due à l'augmentation des concentrations de GES et à la variabilité interne décennale à pluri décennale (*degré de confiance moyen*). En Asie du Sud, en Asie de l'Est et en Afrique de l'Ouest, l'augmentation des précipitations de mousson due au réchauffement résultant des émissions de GES a été contrebalancée par une diminution des précipitations de mousson due au refroidissement entraîné par les émissions d'aérosols issus des activités humaines au cours du 20e siècle (*degré de confiance élevé*). L'augmentation des précipitations de la mousson d'Afrique de l'Ouest depuis les années 1980 est en partie due à l'influence croissante des GES et à la réduction de l'effet refroidissant produit par les émissions d'aérosols issus des activités humaines en Europe et en Amérique du Nord (*degré de confiance moyen*). {2.3, 3.3, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, encadré 8.1, encadré 8.2, 10.6, encadré RT.13}

A.3.4 Il est *probable* que la proportion de cyclones tropicaux majeurs (catégories 3–5), à l'échelle globale, a augmenté au cours des quatre dernières décennies et que la latitude à laquelle les cyclones tropicaux atteignent leur intensité maximale sur le bassin ouest du Pacifique Nord s'est déplacée vers le nord ; ces changements ne peuvent pas être expliqués par la seule variabilité interne (*degré de confiance moyen*). Un *degré de confiance faible* est associé à l'évaluation des tendances à long terme (pluridécennales à centennales) de la fréquence des cyclones tropicaux de toutes catégories. Les études d'attribution d'évènements et la compréhension physique indiquent que le changement climatique d'origine humaine entraîne une augmentation des précipitations extrêmes associées aux cyclones tropicaux (*degré de confiance élevé*), mais, les limitations des données d'observation disponibles empêchent de détecter clairement des tendances passées à l'échelle mondiale. {8.2, 11.7, encadré RT.10}

A.3.5 L'influence humaine a *probablement* augmenté l'occurrence d'événements extrêmes composites[18] depuis les années 1950. Cela comprend une fréquence accrue des vagues de chaleur coïncidant avec des sécheresses à l'échelle mondiale (*degré de confiance élevé*), des conditions météorologiques propices aux incendies dans plusieurs régions de tous les continents habités (*degré de confiance moyen*) et des inondations composites à certains endroits (*degré de confiance moyen*). {11.6, 11.7, 11.8, 12.3, 12.4, RT.2.6, tableau RT.5, encadré RT.10}

15 Sécheresse agricole et écologique (selon le biome affecté) : période caractérisée par un déficit anormal d'humidité du sol résultant d'un manque de précipitations conjugué à un excès d'évapotranspiration et qui, pendant la saison de croissance, affecte la production des cultures ou plus largement les fonctions écosystémiques. Les changements observés pour les sécheresses météorologiques (déficits de précipitations) et les sécheresses hydrologiques (déficits de ruissellement et débit des cours d'eau) sont distincts des changements observés pour les sécheresses agricoles et écologiques et sont traités dans le rapport complet de l'AR6 (chapitre 11).

16 Processus combinés par lesquels l'eau est transférée à l'atmosphère à partir des plans d'eau, des surfaces englacées, des sols nus et de la végétation qui composent la surface de la Terre (voir le glossaire).

17 Le domaine de la mousson globale est défini comme la zone où l'amplitude annuelle des précipitations (été local moins hiver local) est supérieure à 2,5 mm par jour (voir le glossaire). Les précipitations de la mousson globale au-dessus des terres émergées sont définies comme les précipitations moyennes associées à la mousson globale qui tombent sur les terres émergées.

18 Les événements extrêmes composites correspondent à la conjonction de multiples facteurs et/ou aléas contribuant à un risque pour la société ou l'environnement. On peut citer à titre d'exemple les vagues de chaleur coïncidant avec des sécheresses, les inondations composites (par exemple, une surcote marine due à une onde de tempête combinée à des précipitations et/ou un débit fluvial extrêmes), des conditions météorologiques composites propices aux incendies (par exemple, une conjonction de conditions chaudes, sèches et venteuses) ou des événements extrêmes simultanés en différents lieux.

Le changement climatique affecte déjà toutes les régions habitées de la planète, l'influence humaine contribuant à de nombreux changements observés des extrêmes météorologiques et climatiques

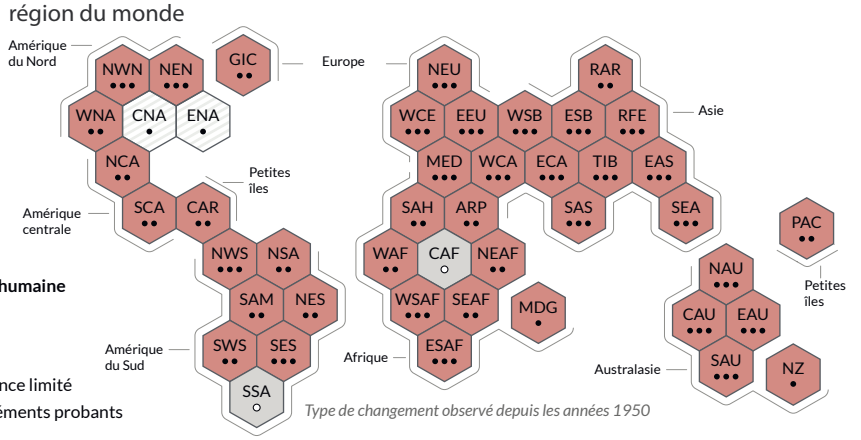
(a) Synthèse de l'évaluation des changements observés des **extrêmes chauds** et degré de confiance associé à la contribution humaine à ces changements, par région du monde

Type de changement observé
dans les extrêmes chauds

- Augmentation (41)
- Diminution (0)
- Faible degré de concordance pour ce type de changement (2)
- Données et/ou publications scientifiques limitées (2)

Degré de confiance associé à la contribution humaine
au changement observé

- ●●● Élevé
- ●● Moyen
- ● Faible en raison d'un degré de concordance limité
- ○ Faible en raison d'un nombre limité d'éléments probants



Type de changement observé depuis les années 1950

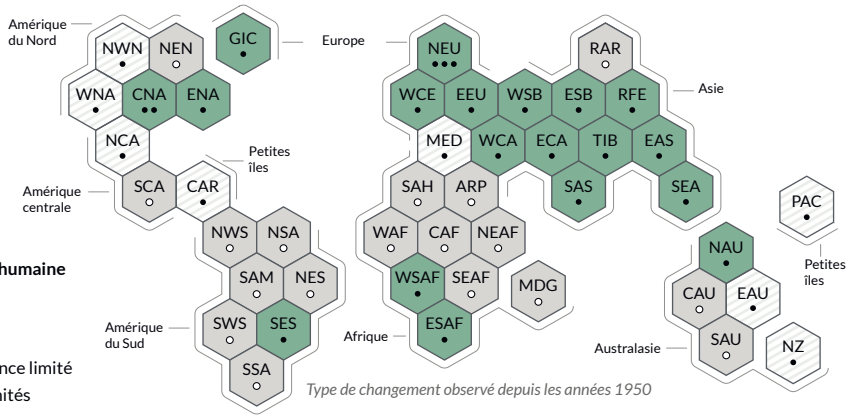
(b) Synthèse de l'évaluation des changements observés des **précipitations extrêmes** et degré de confiance associé à la contribution humaine à ces changements, par région du monde

Type de changement observé
dans les precipitations extrêmes

- Augmentation (19)
- Diminution (0)
- Faible degré de concordance pour ce type de changement (8)
- Données et/ou publications scientifiques limitées (18)

Degré de confiance associé à la contribution humaine
au changement observé

- ●●● Élevé
- ●● Moyen
- ● Faible en raison d'un degré de concordance limité
- ○ Faible en raison d'éléments probants limités



Type de changement observé depuis les années 1950

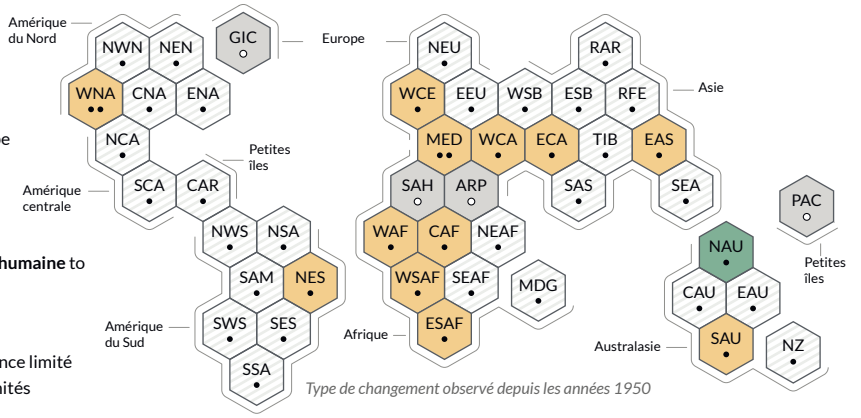
(c) Synthèse de l'évaluation des changements observés des **sécheresses de type agricole et écologique** et degré de confiance associé à la contribution humaine à ces changements, par région du monde

Type de changement observé
dans les sécheresses de type agricole et écologique

- Augmentation (12)
- Diminution (1)
- Faible degré de concordance pour le type de changement (28)
- Données et/ou publications scientifiques limitées (4)

Degré de confiance associé à la contribution humaine to
au changement observé

- ●●● Élevé
- ●● Moyen
- ● Faible en raison d'un degré de concordance limité
- ○ Faible en raison d'éléments probants limités



Type de changement observé depuis les années 1950

Chaque hexagone correspond à l'une des régions de référence du GTI du GIEC dans l'AR6.

NWN *Nord-Ouest Amérique du Nord*

Régions de référence du GTI du GIEC dans l'AR6 : **Amérique du Nord : NWN** *(Nord-Ouest de l'Amérique du Nord)*, ***NEN*** *(Nord-Est de l'Amérique du Nord)*, ***WNA*** *(Ouest de l'Amérique du Nord)*, ***CNA*** *(Centre de l'Amérique du Nord)*, ***ENA*** *(Est de l'Amérique du Nord)*, **Amérique centrale : NCA** *(Nord de Amérique centrale)*, ***SCA*** *(Sud de Amérique centrale)*, ***CAR*** *(Caraïbes)*, **Amérique du Sud : NWS** *(Nord-Ouest de l'Amérique du Sud)*, ***NSA*** *(Nord de l'Amérique du Sud)*, ***NES*** *(Nord-Est de l'Amérique du Sud)*, ***SAM*** *(Mousson d'Amérique du Sud)*, ***SWS*** *(Sud-Ouest de l'Amérique du Sud)*, ***SES*** *(Sud-Est de l'Amérique du Sud)*, ***SSA*** *(Sud de l'Amérique du Sud)*, **Europe : GIC** *(Groenland/Islande)*, ***NEU*** *(Nord de l'Europe)*, ***WCE*** *(Europe du centre et de l'ouest)*, ***EEU*** *(Est de l'Europe)*, ***MED*** *(Méditerranée)*, **Afrique : MED** *(Méditerranée)*, ***SAH*** *(Sahara)*, ***WAF*** *(Afrique de l'Ouest)*, ***CAF*** *(Afrique centrale)*, ***NEAF*** *(Nord-Est de l'Afrique)*, ***SEAF*** *(Sud de l'Afrique de l'Est)*, ***WSAF*** *(Sud-Ouest de l'Afrique)*, ***ESAF*** *(Est de l'Afrique du Sud)*, ***MDG*** *(Madagascar)*, **Asie : *RAR*** *(Arctique russe)*, ***WSB*** *(Ouest de la Sibérie)*, ***ESB*** *(Est de la Sibérie)*, ***RFE*** *(Extrême-Orient russe)*, ***WCA*** *(Ouest de l'Asie centrale)*, ***ECA*** *(Est de l'Asie centrale)*, ***TIB*** *(Plateau tibétain)*, ***EAS*** *(Est de l'Asie)*, ***ARP*** *(Péninsule arabique)*, ***SAS*** *(Sud de l'Asie)*, ***SEA*** *(Asie du Sud-Est)*, **Australasie : NAU** *(Nord de l'Australie)*, ***CAU*** *(Centre de l'Australie, **EAU** (Est de l'Australie)*, ***SAU*** *(Sud de l'Australie)*, ***NZ*** *(Nouvelle-Zélande)*, **Petites îles : *CAR*** *(Caraïbe)*, ***PAC*** *(Petites îles du Pacifique)*

Figure RID.3 | Synthèse de l'évaluation de changements régionaux observés et de leur attribution.

Les régions habitées faisant l'objet de l'évaluation par le GTI de l'AR6 du GIEC sont représentées sous forme d'**hexagones** de même taille, situés à leur emplacement géographique approximatif (voir la légende pour les acronymes régionaux). Toutes les évaluations sont effectuées pour l'ensemble de la région concernée et pour la période allant des années 1950 à aujourd'hui. Les évaluations effectuées à d'autres échelles temporelles ou à des échelles spatiales plus locales sont susceptibles de différer de celles qui sont présentées dans la figure. Les **couleurs** de chaque panneau correspondent aux quatre résultats de l'évaluation des changements observés. La présence de hachures (blanches et gris clair) dans un hexagone signale un *degré de cohérence faible* sur le type de changement pour la région dans son ensemble. La couleur grise indique des données et/ou des études publiées limitées, et, par conséquent, l'impossibilité d'établir une évaluation pour l'ensemble de la région. Les autres couleurs indiquent au minimum un *degré de confiance moyen* associé à la variation observée. Le **degré de confiance** avec lequel chacun des changements observés est attribué à l'influence humaine est établi sur la base de l'évaluation de la détection de tendances et de leur attribution, et des études publiées d'attribution d'événements. Il est indiqué par le nombre de points : trois points pour un *degré de confiance élevé*, deux points pour un *degré de confiance moyen* et un point pour un *degré de confiance faible* (un seul point plein : *degré de concordance limitée* ; cercle unique : *éléments probants limités*).

Panneau (a) Pour les extrêmes chauds, les éléments probants s'appuient principalement sur l'évolution de métriques basées sur les températures maximales quotidiennes ; les études menées à l'échelle régionale exploitant d'autres indices (durée, fréquence et intensité des vagues de chaleur) sont utilisées à titre complémentaire. Les hexagones rouges indiquent les régions où l'augmentation observée des extrêmes chauds est établie avec au minimum un ***degré de confiance moyen***.

Panneau (b) Pour les précipitations extrêmes, les éléments probants reposent principalement sur les changements d'indices basés sur les hauteurs de précipitations pour un jour ou pour cinq jours dans le cadre d'études menées à l'échelle mondiale ou régionale. Les hexagones verts indiquent les régions où l'augmentation observée des précipitations extrêmes est établie avec au minimum un *degré de confiance moyen*.

Panneau (c) Les sécheresses de type agricole et écologique sont évaluées sur la base des changements observés ou simulés de l'humidité de la colonne totale de sol, complétés par des éléments probants concernant les changements de l'humidité de surface du sol, du bilan hydrique (précipitations moins évapotranspiration) et d'indices déterminés par les précipitations et de la demande évaporative atmosphérique. Les hexagones jaunes indiquent les régions où l'augmentation observée de ce type de sécheresse est établie avec au minimum un *degré de confiance moyen*. Les hexagones verts indiquent les régions où la diminution observée des sécheresses de type agricole et écologique est établie avec au minimum un *degré de confiance moyen*.

Pour toutes les régions, le tableau RT 5 présente un éventail plus large de changements observés en plus de ceux illlustrés sur cette figure. Il convient de noter que le sud de l'Amérique du Sud (SSA) est la seule région qui ne présente pas de changements observés dans les métriques illustrées sur cette figure, mais qu'elle est affectée par une augmentation observée de la température moyenne, une diminution observée du gel et une augmentation observée des vagues de chaleur marines.

{11.9 ; Atlas.1.3.3 ; figure Atlas.2 ; tableau RT.5 ; encadré RT.10, figure.1}

A.4 L'amélioration de la compréhension des processus climatiques, des éléments probants paléoclimatiques, et de la réponse du système climatique au forçage radiatif croissant conduit à une meilleure estimation de la sensibilité climatique à l'équilibre établie à 3 °C, avec une fourchette plus étroite que dans l'AR5. {2.2, 7.3, 7.4, 7.5, 9.4, 9.5, 9.6, encadré 7.2, 9.4, 9.5, 9.6, encadré thématique 9.1}

A.4.1 Le forçage radiatif d'origine humaine, de 2,72 W m^{-2} [1,96 à 3,48 W m^{-2}] en 2019 par rapport à 1750, a réchauffé le système climatique. Ce réchauffement est principalement dû à l'augmentation des concentrations de GES, partiellement réduit par le refroidissement dû à l'augmentation des concentrations d'aérosols. Le forçage radiatif a augmenté de 0,43 W m^{-2} (19 %) par rapport à l'AR5, dont 0,34 W m^{-2} sont dus à l'accroissement des concentrations de GES depuis 2011. Le reste de l'écart est dû à une meilleure compréhension scientifique et à une modification de l'évaluation du forçage imputable aux aérosols, qui intègre la diminution de leur concentration et une amélioration de son calcul (*degré de confiance élevé*).
{2.2, 7.3, RT.2.2, RT.3.1}

A.4.2 Le forçage radiatif net d'origine humaine est positif et entraîne une accumulation d'énergie supplémentaire (réchauffement) dans le système climatique, qui est partiellement réduite par une perte d'énergie vers l'espace accrue, en réponse au réchauffement de surface. Le taux moyen d'accumulation d'énergie observée dans le système climatique est passé de 0,50 W m^{-2} [0,32 à 0,69 W m^{-2}] en 1971–2006[19] à 0,79 W m^{-2} [0,52 à 1,06 W m^{-2}] en 2006–2018[20] (*degré de confiance élevé*). Le réchauffement de l'océan représente 91 % de l'accumulation d'énergie dans le système climatique, tandis que le réchauffement des terres émergées, la fonte des glaces et le réchauffement de l'atmosphère en représentent respectivement environ 5 %, 3 % et 1 % (*degré de confiance élevé*).
{7.2, encadré 7.2, RT.3.1}

A.4.3 L'accumulation de chaleur dans le système climatique a provoqué l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe du fait de la fonte des glaces continentales et de la dilatation thermique due au réchauffement des océans. La dilatation thermique explique 50 % de l'élévation du niveau de la mer entre 1971 et 2018, tandis que la perte de masse des glaciers y a contribué à hauteur de 22 %, celle des calottes glaciaires à hauteur de 20 % et la variation du stockage d'eau terrestre à hauteur de 8 %. Le rythme de perte de masse des calottes glaciaires a augmenté d'un facteur 4 entre la période 1992–1999 et la période

19 Augmentation cumulée d'énergie de 282 ZJ [177 à 387 ZJ] sur la période 1971–2006 (1 ZJ = 10^{21} joules).

20 Augmentation cumulée d'énergie de 152 ZJ [100 à 205 ZJ] sur la période 2006–2018.

2010–2019. Ensemble, les pertes de masse des calottes glaciaires et des glaciers représentent la contribution prépondérante à l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe entre 2006 et 2018 (*degré de confiance élevé*).
{9.4, 9.5, 9.6, encadré thématique 9.1}

A.4.4 La sensibilité climatique à l'équilibre est une grandeur physique importante, utilisée pour quantifier la réponse du climat au forçage radiatif. Sur la base de multiples éléments probants[21], la fourchette *très probable* de la sensibilité climatique à l'équilibre se situe entre 2 °C (*degré de confiance élevé*) et 5 °C (*degré de confiance moyen*). La meilleure estimation résultant de l'évaluation de l'AR6 est de 3 °C, avec une fourchette *probable* de 2,5 °C à 4 °C (*degré de confiance élevé*), contre 1,5 °C à 4,5 °C dans l'AR5, qui n'avait pas fourni de meilleure estimation.
{7.4, 7.5, RT.3.2}

B. Futurs climatiques possibles

Un ensemble de cinq nouveaux scénarios d'émissions illustratifs a été choisi pour examiner de manière cohérente, au sein de ce rapport, la réponse du climat à un éventail plus large d'évolutions futures des gaz à effet de serre (GES), de l'affectation des terres et des polluants atmosphériques que celui considéré dans l'AR5. Cet ensemble de scénarios alimente les projections des modèles climatiques concernant les changements du système climatique. Ces projections tiennent compte de l'activité solaire et du forçage de fond dû aux volcans. Les résultats pour le 21e siècle sont fournis pour le court terme (2021–2040), le moyen terme (2041–2060) et le long terme (2081–2100) par rapport à la période 1850–1900, sauf indication contraire.

Encadré RID.1 | Scénarios, modèles climatiques et projections

Encadré RID.1.1 : Le présent rapport évalue la réponse du climat à cinq scénarios illustratifs qui couvrent l'éventail des évolutions futures possibles des facteurs anthropiques du changement climatique disponibles dans la littérature scientifique. Ces scénarios débutent en 2015 et incluent des scénarios[22] d'émissions de GES élevées et très élevées (SSP3-7.0 et SSP5-8.5), avec des émissions de CO_2 atteignant près du double des niveaux actuels d'ici à 2100 et 2050, respectivement, des scénarios d'émissions de GES intermédiaires (SSP2-4.5) avec des émissions de CO_2 qui restent proches des niveaux actuels jusqu'au milieu du siècle, et des scénarios d'émissions très basses et basses de GES, avec des émissions de CO_2 diminuant jusqu'à des émissions nettes égales à zéro vers ou après 2050, suivies de niveaux variables d'émissions nettes négatives de CO_2[23] (SSP1-1.9 et SSP1-2.6), comme l'illustre la figure RID 4. Les émissions varient d'un scénario à l'autre en fonction des hypothèses socio-économiques, du niveau d'atténuation du changement climatique et, s'agissant des aérosols, et des précurseurs non méthaniques d'ozone , des mesures de contrôle de la pollution atmosphérique. D'autres hypothèses peuvent aboutir à des émissions et des réponses climatiques similaires, mais les hypothèses socio-économiques et la faisabilité ou la probabilité des divers scénarios ne font pas partie de cette évaluation.
{1.6, encadré thématique 1.4, RT.1.3} (figure RID.4)

Encadré RID.1.2 : Ce rapport évalue les résultats des modèles climatiques participant à la phase 6 du Project d'intercompariason de modèles couplés (CMIP6) du Programme mondial de recherches sur le climat. Ces modèles bénéficient d'une représentation nouvelle et améliorée de processus physiques, chimiques et biologiques, ainsi qu'une résolution plus élevée, par rapport aux modèles climatiques examinés dans les précédents rapports d'évaluation du GIEC. Les simulations de l'état moyen récent de la plupart des indicateurs de grande échelle du changement climatique et de nombreux autres aspects au sein du système climatique s'en trouvent améliorées. Certaines différences persistent par rapport aux observations, par exemple vis-à-vis de la structure régionale des précipitations. Les simulations historiques CMIP6 évaluées dans ce rapport ont une moyenne d'ensemble du changement de la température à la surface du globe qui se situe à moins de 0,2 °C des observations sur la majeure partie de la période historique, et le réchauffement observé s'inscrit dans la fourchette *très probable* de l'ensemble CMIP6. Toutefois, certains modèles de CMIP6 simulent un réchauffement qui

21 La compréhension des processus climatiques, des enregistrements instrumentaux, des paléoclimats et des contraintes émergentes basées sur les modèles (voir le glossaire).

22 Dans le présent rapport, les cinq scénarios illustratifs sont désignés par l'abréviation SSPx-y, où "SSPx" renvoie à la trajectoire socio-économique partagée (SSP) décrivant les tendances socio-économiques à la base du scénario, et "y" renvoie au niveau approximatif du forçage radiatif (en watts par mètre carré, ou W m^{-2}) résultant du scénario en 2100. Une comparaison détaillée avec les scénarios utilisés dans les précédents rapports du GIEC est fournie dans la section RT 1.3, et les sections 1.6 et 4.6. Les SSP qui sous-tendent les scénarios de forçage spécifiquement utilisés pour forcer les modèles climatiques ne sont pas évaluées par le GTI. Néanmoins, le label SSPx-y assure la traçabilité par rapport aux publications scientifiques où ces trajectoires de forçage spécifiques sont utilisées en entrée des modèles climatiques. Le GIEC est neutre en ce qui concerne les hypothèses sous-jacentes aux SSP, qui ne recouvrent pas tous les scénarios possibles. Des scénarios alternatifs peuvent être envisagés ou élaborés.

23 Des émissions nettes négatives de CO_2 sont atteintes lorsque les éliminations anthropiques de CO_2 dépassent les émissions anthropiques (voir le glossaire).

se situe soit au-dessus, soit au-dessous de la fourchette évaluée comme *très probable* du réchauffement observé. {1.5, encadré thématique 2.2, 3.3, 3.8, RT.1.2, encadré thématique RT.1} (figure RID.1b, figure RID.2)

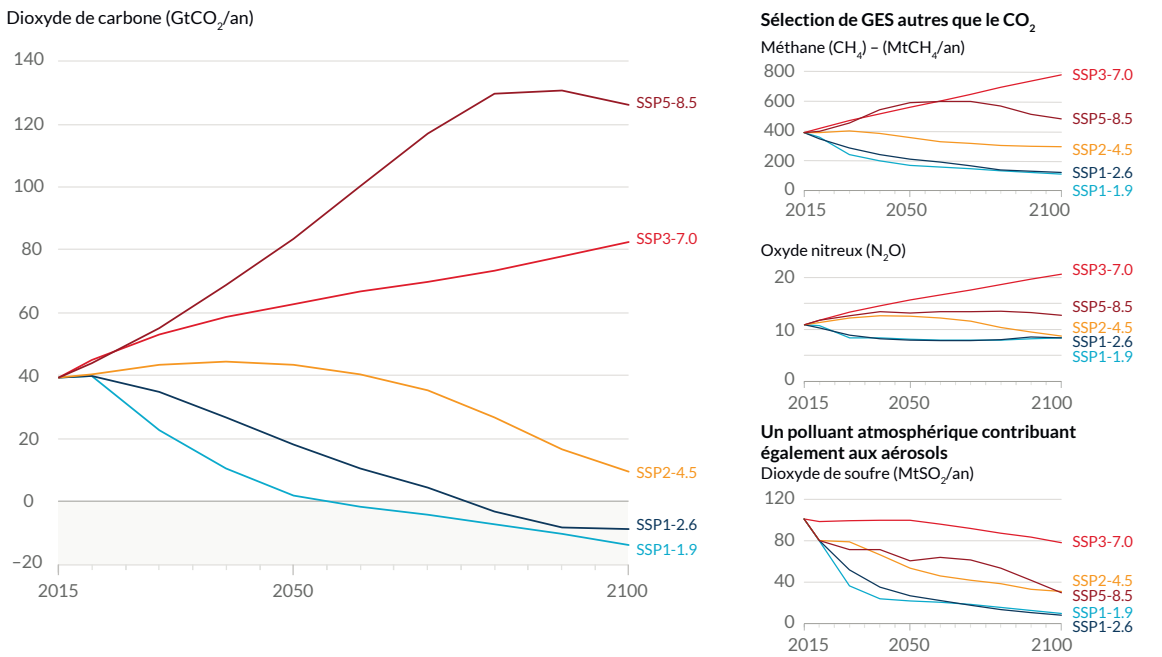
Encadré RID.1.3 : Les modèles CMIP6 pris en compte dans le présent rapport présentent une fourchette de sensibilité climatique plus large que celle des modèles CMIP5 et que la fourchette *très probable* évaluée dans l'AR6, établie à partir de multiples éléments probants. Ces modèles CMIP6 présentent également une sensibilité climatique moyenne plus élevée que les modèles CMIP5 et que la meilleure estimation résultant de l'évaluation de l'AR6. Les valeurs plus élevées de la sensibilité climatique de CMIP6 par rapport à CMIP5 peuvent être imputées à l'effet amplificateur de la rétroaction des nuages qui est plus important d'environ 20 % dans CMIP6.
{encadré 7.1, 7.3, 7.4, 7.5, RT.3.2}

Encadré RID.1.4 : Pour la première fois dans un rapport du GIEC, les évaluations des changements futurs de la température à la surface du globe, du réchauffement de l'océan et du niveau de la mer sont construites en combinant les projections multi-modèles avec des contraintes issues des observations s'appuyant sur le réchauffement passé simulé, ainsi que sur l'évaluation de la sensibilité climatique de l'AR6. Pour d'autres variables, il n'existe pas encore de méthodes aussi robustes permettant de contraindre les projections. Néanmoins, pour un niveau donné de réchauffement planétaire, il est possible d'identifier des structures géographiques robustes sont identifiées dans les projections de nombreuses variables, communes aux scénarios considérés, et indépendantes du moment où ce niveau de réchauffement planétaire est atteint.
{1.6, 4.3, 4.6, encadré 4.1, 7.5, 9.2, 9.6, encadré thématique 11.1, encadré thématique RT.1}

(Encadré RID.1 suite)

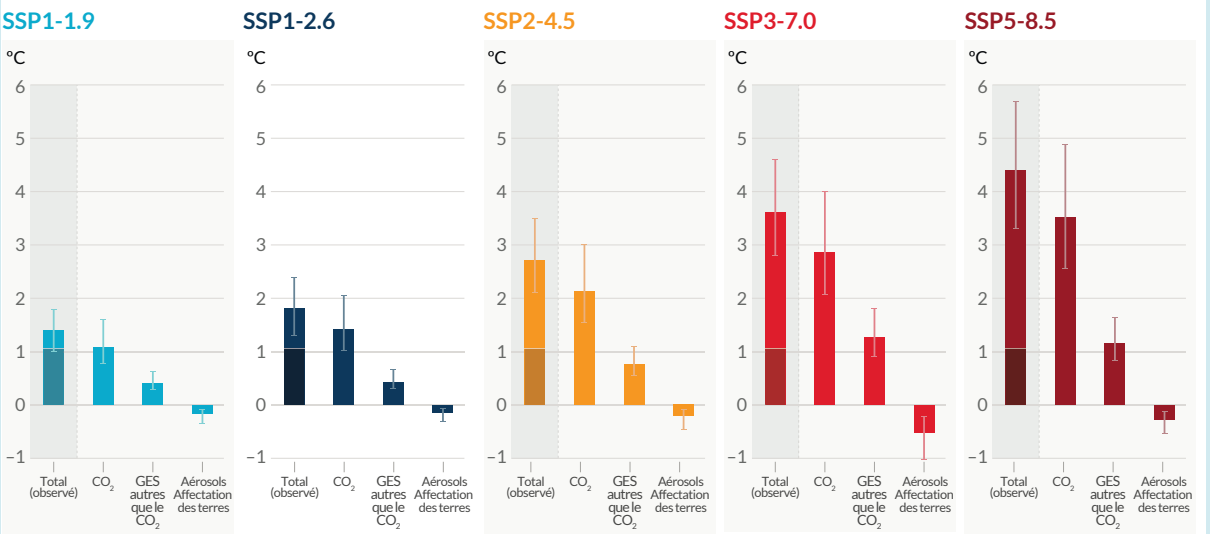
Les émissions futures entraînent un réchauffement supplémentaire à venir, le réchauffement total étant dominé par les émissions de CO_2 passées et à venir

(a) Emissions annuelle futures de CO_2 (à gauche) et d'un sous-ensemble de facteurs clés autres que le CO_2 (à droite), pour cinq scénarios illustratifs



(b) Contribution des différentes émissions à l'augmentation de la température à la surface du globe, et rôle dominant des émissions de CO_2

Changement de la température à la surface du globe en 2081–2100 par rapport à 1850–1900 (°C)



Réchauffement total (le réchauffement observé à ce jour est plus sombre), réchauffement dû au CO_2, réchauffement dû aux GES autres que le CO_2, refroidissement dû aux changements des aérosols et de affectation des terres.

Figure RID.4 | Émissions anthropiques futures des principaux facteurs du changement climatique et contributions au réchauffement par groupes de facteurs pour les cinq scénarios illustratifs utilisés dans ce rapport.

Les cinq scénarios sont SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5.

Panneau (a) Émissions anthropiques (d'origine humaine) annuelles sur la période 2015–2100. Sont représentées ici les trajectoires d'émissions de dioxyde de carbone (CO_2) de tous les secteurs ($GtCO_2$/an) (graphique de gauche) et d'un sous-ensemble de trois facteurs clés autres que le CO_2 pris en compte dans les scénarios : le méthane (CH_4, $MtCH_4$/an, graphique en haut à droite) ; le protoxyde d'azote (N_2O, Mt N_2O /an, graphique du milieu à droite) ; et le dioxyde de soufre (SO_2, $MtSO_2$/an, graphique en bas à droite, contribuant aux aérosols d'origine anthropique dans le panneau (b).

Panneau (b) Les contributions au réchauffement, par groupe de facteurs anthropiques et par scénario, sont indiquées par un changement de la température à la surface du globe (°C) en 2081–2100 par rapport à 1850–1900, avec indication du réchauffement observé à ce jour. Les barres et les moustaches représentent, respectivement, les valeurs médianes et la fourchette *très probable*. Dans les diagrammes à barres des divers scénarios, les barres représentent : le réchauffement planétaire total (°C ; barre « Total ») (voir tableau RID.1) ; les contributions au réchauffement (°C) dues aux variations du CO_2 (barre « CO_2 ») et aux gaz à effet de serre (GES) autres que le CO_2 ; (barre « GES autres que le CO_2 » : comprenant les gaz à effet de serre bien mélangés et l'ozone) ; et le refroidissement net dû à d'autres facteurs anthropiques (barre « Aérosols et affectation des terres » : aérosols anthropiques, changement de réflectance dû à des changements d'affectation des terres et d'irrigation, et traînées de condensation des avions) (voir la figure RID 2, panneau (c), pour les contributions au réchauffement à ce jour pour les divers facteurs). La meilleure estimation du réchauffement observé en 2010–2019 par rapport à 1850–1900 (voir figure RID 2, panneau (a) est représentée par la partie plus sombre de la barre « Total ». Dans le panneau (b), les contributions au réchauffement sont calculées selon la méthode présentée dans le tableau RID 1 pour la barre « Total ». Pour les autres barres, la contribution des différents groupes de facteurs au changement de température à la surface du globe est calculée à l'aide d'un émulateur des processus physiques du climat qui s'appuie sur les évaluations de la sensibilité climatique et du forçage radiatif.

{encadré thématique 1.4 ; 4.6 ; figure 4.35 ; 6.7 ; figures 6.18, 6.22 et 6.24 ; 7.3 ; encadré thématique 7.1 ; figure 7.7 ; encadré RT.7 ; figures RT.4 et RT.15}

B.1 La température à la surface du globe continuera à augmenter au moins jusqu'au milieu de ce siècle, dans tous les scénarios d'émissions considérés. Un réchauffement planétaire de 1,5 °C et 2 °C sera dépassé au cours du 21e siècle, sauf si des réductions importantes des émissions de CO_2 et d'autres gaz à effet de serre ont lieu au cours des prochaines décennies.

{2.3, encadré thématique 2.3, encadré thématique 2.4, 4.3, 4.4, 4.5} (figure RID.1, figure RID.4, figure RID.8, tableau RID.1, encadré RID.1)

B.1.1 En moyenne sur la période 2081–2100, la température à la surface du globe sera *très probablement* supérieure de 1,0 °C à 1,8 °C à celle de 1850–1900 pour le scénario de très basses émissions de GES (SSP1-1.9), de 2,1 °C à 3,5 °C pour le scénario d'émissions de GES intermédiaires (SSP2-4.5) et de 3,3 °C à 5,7 °C pour le scénario d'émissions très élevées de GES (SSP5-8.5)[24]. La dernière fois que la température à la surface du globe s'est maintenue à 2,5 °C ou plus au-dessus du niveau de 1850–1900 s'est produite il y a plus de 3 millions d'années (*degré de confiance moyen*).
{2.3, encadré thématique 2.4, 4.3, 4.5, encadré RT.2, encadré RT.4, encadré thématique RT.1} (tableau RID.1)

Tableau RID.1 | Evaluation des changements de la température à la surface du globe, sur la base de multiples éléments probants, pour une sélection de périodes de 20 ans et pour les cinq scénarios d'émissions illustratifs considérés. Les écarts de température par rapport à la température moyenne à la surface du globe durant la période 1850–1900 sont exprimés en °C. Ils incluent la réévaluation du réchauffement historique observé pour la période de référence 1986–2005 de l'AR5, qui est dans l'AR6 supérieur de 0,08 °C [– 0,01 à + 0,12 °C] à celui de l'AR5 (voir la note de bas de page 10). Les changements relatifs à la période de référence récente (1995–2014) peuvent être calculés approximativement en soustrayant 0,85 °C, correspondant à la meilleure estimation du réchauffement observé entre 1850–1900 et 1995–2014.
{Encadré thématique 2.3, 4.3, 4.4, encadré thématique RT.1}

	Court terme, 2021–2040		Moyen terme, 2041–2060		Long terme, 2081–2100	
Scénarios	Meilleure estimation (°C)	Fourchette *très probable* (°C)	Meilleure estimation (°C)	Fourchette *très probable* (°C)	Meilleure estimation (°C)	Fourchette *très probable* (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 to 1,7	1,6	1,2 to 2,0	1,4	1,0 to 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 to 1,8	1,7	1,3 to 2,2	1,8	1,3 to 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 to 1,8	2,0	1,6 to 2,5	2,7	2,1 to 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 to 1,8	2,1	1,7 to 2,6	3,6	2,8 to 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 to 1,9	2,4	1,9 to 3,0	4,4	3,3 to 5,7

B.1.2 D'après l'évaluation de multiples éléments probants, un réchauffement planétaire de 2 °C par rapport à 1850–1900 serait dépassé au cours du 21e siècle dans le cas des scénarios d'émissions de GES élevées et très élevées considérés dans ce rapport (SSP3-7.0 et SSP5-8.5, respectivement). Il est *extrêmement probable* qu'un réchauffement planétaire de 2 °C serait dépassé dans le cas du scénario intermédiaire d'émissions de GES (SSP2-4.5). Dans le cas des scénarios d'émissions très basses et basses de GES, il est *extrêmement improbable* qu'un réchauffement planétaire de 2 °C soit dépassé (SSP1-1.9) ou *improbable* qu'il le soit

24 Sauf indication contraire, les changements de la température à la surface du globe correspondent à des moyennes glissantes sur 20 ans.

(SSP1-2.6)[25]. Le franchissement d'un niveau de réchauffement planétaire de 2 °C à moyen terme (2041–2060) est *très probable* dans le cas du scénario d'émissions très élevées de gaz à effet de serre (SSP5-8.5), *probable* dans le cas du scénario d'émissions élevées (SSP3-7.0) et *plus probable qu'improbable* dans le cas du scénario d'émissions intermédiaires (SSP2-4.5)[26]. {4.3, encadré thématique RT 1} (tableau RID.1, figure RID.4, encadré RID.1)

B.1.3 Un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport à 1850–1900 serait dépassé au cours du 21e siècle dans le cas des scénarios d'émissions de GES intermédiaires, élevées et très élevées considérés dans ce rapport (SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5, respectivement). Pour les cinq scénarios illustratifs, à court terme (2021–2040), le fait de dépasser un niveau de réchauffement planétaire de 1,5 °C est *très probable* dans le cas du scénario d'émissions de GES très élevées (SSP5-8.5), *probable* dans le cas des scénarios d'émissions intermédiaires et élevées (SSP2-4.5 et SSP3-7.0), *plus probable qu'improbable* dans le cas du scénario d'émissions basses (SSP1-2.6) et le fait d'atteindre ce niveau de réchauffement est *plus probable qu'improbable* dans le cas du scénario avec des émissions de GES très basses (SSP1-1.9)[27]. De plus, pour ce scenario d'émissions très basses de GES (SSP1-1.9), il est *plus probable qu'improbable* que la température à la surface du globe redescende en-dessous de 1,5 °C vers la fin du 21e siècle, avec un dépassement temporaire de tout au plus 0,1 °C au-dessus d'un niveau de réchauffement de 1,5 °C. {4.3, encadré thématique RT.1} (tableau RID.1, figure RID.4)

B.1.4 Pour une année donnée, la température à la surface du globe peut fluctuer au-dessus ou en-dessous de la tendance à long terme d'origine humaine du fait de l'importante variabilité naturelle[28]. L'occurrence d'années individuelles pour lesquelles la température à la surface du globe dépasse un certain niveau, par exemple 1,5 °C ou 2 °C, par rapport à 1850–1900, n'implique pas que ce niveau de réchauffement planétaire ait été atteint[29]. {4.3, encadré thématique RT.1} (tableau RID.1, figure RID.4)

B.2 Il existe une relation directe entre l'amplification de nombreux changements au sein du système climatique et l'augmentation du réchauffement planétaire. Il s'agit notamment de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des extrêmes chauds, des vagues de chaleur marines, des précipitations extrêmes et, dans certaines régions, des sécheresses de type agricole et écologique ; de l'augmentation de la proportion de cyclones tropicaux intenses ; et de la diminution de la glace de mer de l'Arctique, du manteau neigeux et du pergélisol. {4.3, 4.5, 4.6, 7.4, 8.2, 8.4, encadré 8.2, 9.3, 9.5, encadré 9.2, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.7, 11.9, encadré thématique 11.1, 12.4, 12.5, encadré thématique 12.1, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11} (figure RID.5, figure RID.6, figure RID.8)

B.2.1 Il est *quasi-certain* que le réchauffement sera plus prononcé au-dessus des terres émergées qu'à la surface des océans (*probablement* 1,4 à 1,7 fois plus). Il est *quasi-certain* que le réchauffement de l'Arctique sera plus prononcé que le réchauffement à la surface du globe, avec un *degré de confiance élevé* que son rythme de réchauffement sera plus de deux fois supérieur au rythme de réchauffement planétaire. {2.3, 4.3, 4.5, 4.6, 7.4, 11.1, 11.3, 11.9, 12.4, 12.5, encadré thématique 12.1, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, encadré thématique RT.1, RT.2.6} (figure RID.5)

B.2.2 Chaque incrément supplémentaire de réchauffement planétaire entraîne la poursuite de l'amplification des changements dans les extrêmes. Par exemple, chaque demi-degré supplémentaire de réchauffement planétaire entraîne clairement une augmentation perceptible de l'intensité et de la fréquence des extrêmes chauds, y compris les vagues de chaleur (*très probable*), et des précipitations extrêmes (*degré de confiance élevé*), ainsi que des sécheresses de type agricole et écologique[30] dans certaines régions (*degré de confiance élevé*). Des changements perceptibles de l'intensité et de la fréquence des sécheresses météorologiques sont constatés dans certaines régions pour chaque demi-degré supplémentaire de réchauffement planétaire, avec davantage de régions présentant des augmentations que des diminutions (*degré de confiance moyen*). Dans certaines

25 Les scénarios SSP1-1.9 et SSP1-2.6, qui démarrent en 2015, correspondent à des émissions de GES respectivement très basses et basses, avec des émissions de CO_2 diminuant jusqu'à des émissions nettes égales à zéro vers ou après 2050, suivies de niveaux variables d'émissions nettes négatives de CO_2.

26 Sauf indication contraire, les changements de la température à la surface du globe correspondent à des moyennes glissantes sur 20 ans.

27 L'évaluation présentée dans l'AR6 pour déterminer le moment où un niveau donné de réchauffement planétaire sera franchi pour la première fois s'appuie sur la prise en compte des scénarios illustratifs, des multiples éléments probants intégrés dans l'évaluation de la réponse future de la température à la surface du globe au forçage radiatif, et de l'amélioration de l'estimation du réchauffement historique. L'évaluation présentée dans l'AR6 n'est donc pas directement comparable au RID du SR1.5, qui indiquait qu'un réchauffement planétaire de 1,5 °C serait *probablement* atteint entre 2030 et 2052, à partir d'une simple extrapolation linéaire du rythme de réchauffement du passé récent. En réponse à des scénarios similaires au SSP1-1.9 plutôt qu'avec une extrapolation linéaire, l'estimation du rapport SR1.5 du moment où un niveau de réchauffement planétaire de 1,5 °C est franchi pour la première fois est proche de la meilleure estimation de ce rapport.

28 La variabilité naturelle fait référence aux fluctuations climatiques qui se produisent sans aucune influence humaine, c'est-à-dire la variabilité interne du climat, combinée à sa réponse aux facteurs naturels externes tels que les éruptions volcaniques, les variations de l'activité solaire et, sur des échelles de temps plus longues, les effets orbitaux et la tectonique des plaques (voir le glossaire).

29 La variabilité interne, pour une une année donnée, est estimée à environ ± 0,25 °C (fourchette de 5 à 95 %, *degré de confiance élevé*).

30 Les projections de changements des sécheresses de type agricole et écologique sont principalement évaluées sur la base de l'humidité de la colonne totale de sol. Voir la note de bas de page 15 pour leur définition et leur lien avec les précipitations et l'évapotranspiration..

régions, la hausse du réchauffement planétaire accentue l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des sécheresses hydrologiques (*degré de confiance moyen*). L'occurrence de certains extrêmes, sans précédent dans les séries d'observations, augmentera pour chaque hausse supplémentaire du réchauffement planétaire, même pour un niveau de réchauffement de 1,5 °C. Dans les projections, les changements de fréquence, exprimés en pourcentage d'occurrence, sont plus importants pour les événements les plus rares (*degré de confiance élevé*).
{8.2, 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.9, encadré thématique 11.1, encadré thématique 12.1, RT.2.6} (figure RID.5, figure RID.6)

B.2.3 Il est projeté que certaines régions des latitudes moyennes, certaines régions semi-arides ainsi que la région de la mousson sud-américaine connaîtront l'augmentation la plus forte de la température des jours les plus chauds, à un rythme environ 1,5 à 2 fois plus important que celui du réchauffement planétaire (*degré de confiance élevé*). Il est projeté que l'Arctique connaîtra la plus forte augmentation de la température des jours les plus froids, à un rythme environ trois fois supérieur à celui du réchauffement planétaire (*degré de confiance élevé*). Pour chaque hausse supplémentaire du réchauffement planétaire, la fréquence des vagues de chaleur marines continuera à augmenter (*degré de confiance élevé*), en particulier dans l'océan tropical et l'Arctique (*degré de confiance moyen*).
{encadré 9.2, 11.1, 11.3, 11.9, encadré thématique 11.1, encadré thématique 12.1, 12.4, RT.2.4, RT.2.6} (figure RID.6)

B.2.4 Il est *très probable* que les précipitations extrêmes s'intensifieront et deviendront plus fréquents dans la plupart des régions pour chaque hausse supplémentaire du réchauffement planétaire. A l'échelle mondiale, il est projeté que les précipitations journalières extrêmes s'intensifieront d'environ 7 % pour chaque degré (°C) de réchauffement planétaire supplémentaire (*degré de confiance élevé*). Il est projeté que la proportion de cyclones tropicaux intenses (catégorie 4–5) et la vitesse maximale des vents des cyclones tropicaux les plus intenses augmenteront avec la hausse du réchauffement planétaire (*degré de confiance élevé*).
{8.2, 11.4, 11.7, 11.9, encadré thématique 11.1, encadré RT.6, RT.4.3.1} (figure RID.5, figure RID.6)

B.2.5 Dans les projections, tout réchauffement supplémentaire amplifie le dégel du pergélisol et la perte du manteau neigeux saisonnier, des glaces continentales et de la glace de mer arctique (*degré de confiance élevé*). Il est *probable* que l'Arctique sera pratiquement libre de glace de mer[31] au mois de septembre au moins une fois avant 2050 pour les cinq scénarios illustratifs considérés dans ce rapport – avec des récurrences plus fréquentes pour des niveaux de réchauffement plus élevés. Le *degré de confiance est faible* concernant la diminution projetée de la glace de mer de l'Antarctique.
{4.3, 4.5, 7.4, 8.2, 8.4, encadré 8.2, 9.3, 9.5, 12.4, encadré thématique 12.1, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.11, RT.2.5} (figure RID.8)

31 Une étendue moyenne mensuelle de glace de mer inférieure à 1 million de km², ce qui représente environ 15 % de l'étendue moyenne de la glace de mer observée en septembre entre 1979 et 1988.

Pour chaque incrément de réchauffement planétaire, les changements s'accentuent pour les moyennes régionales de la température, des précipitations et de l'humidité du sol

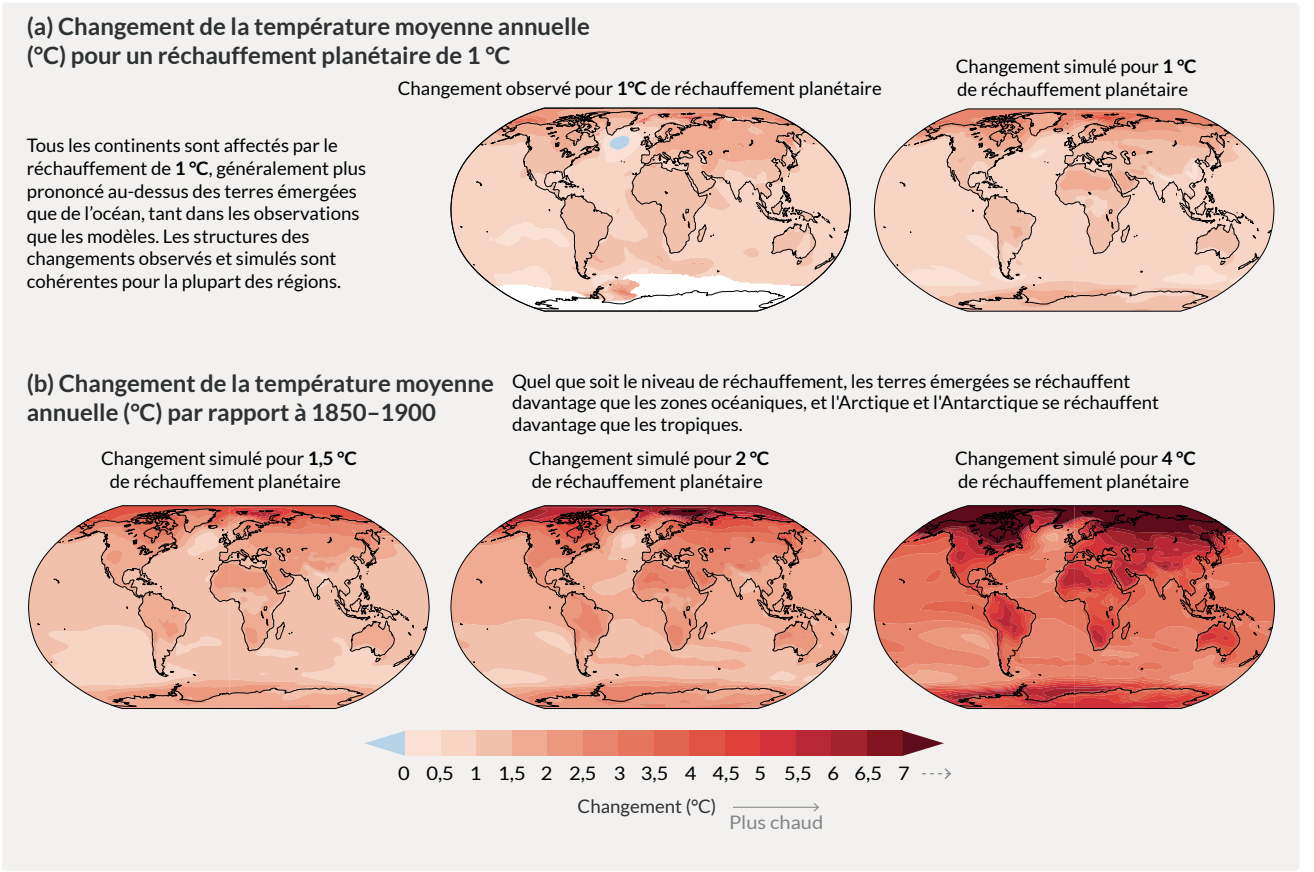


Figure RID.5 | Changements de la température moyenne annuelle en surface, des précipitations et de l'humidité du sol.

Panneau (a) Comparaison des changements observés et simulés de la température moyenne annuelle de surface. La **carte de gauche** montre les changements de la de température moyenne annuelle de surface observés au cours de la période 1850–2020 par degré Celsius de réchauffement planétaire (°C). Les changements de la température annuelle moyenne en surface observés localement (c'est-à-dire au point de grille) sont régressés linéairement par rapport à la température à la surface du globe pour la période 1850–2020. Les données relatives aux observations de température proviennent de Berkeley Earth, le jeu de données offrant la plus grande couverture spatiale et la plus haute résolution horizontale. La régression linéaire est appliquée à toutes les années pour lesquelles des données sont disponibles au point de grille correspondant. Cette méthode de régression a été utilisée pour prendre en compte l'intégralité des séries chronologiques d'observations et ainsi réduire le rôle de la variabilité interne à l'échelle des points de grille. Les zones marquées en blanc sont celles pour lesquelles la couverture temporelle est de 100 ans ou moins, et, donc, trop courte pour procéder à une régression linéaire fiable. La **carte de droite** est basée sur les simulations issues de modèles climatiques. Elle présente les changements multi-modèles des températures moyennes annuelles simulées pour un niveau de réchauffement planétaire de 1 °C (changement de la température à la surface du globe moyenné sur 20 ans par rapport à 1850–1900). Les triangles situés à chaque extrémité de la barre de couleur indiquent les valeurs hors limites, c'est-à-dire les valeurs supérieures ou inférieures aux bornes indiquées.

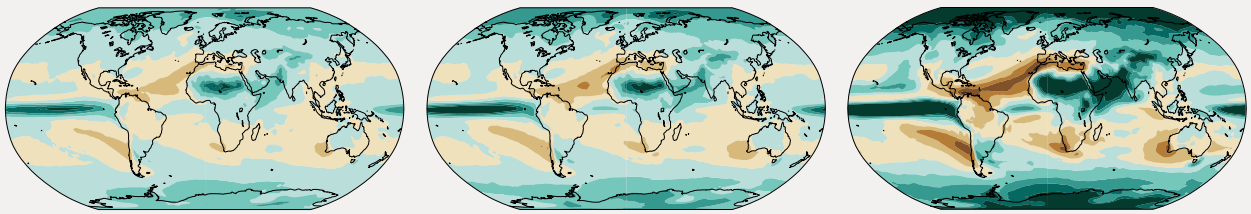
(c) Changement des précipitations moyennes annuelles (%) par rapport à 1850–1900

Il est projeté que les précipitations augmentent aux hautes latitudes, dans le Pacifique équatorial et dans certaines parties des régions de mousson, mais diminuent dans certaines parties des régions subtropicales et dans des zones limitées des tropiques

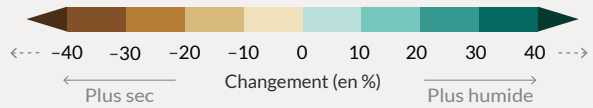
Changement simulé pour **1,5 °C** de réchauffement planétaire

Changement simulé pour **2 °C** de réchauffement planétaire

Changement simulé pour **4 °C** de réchauffement planétaire



Des changements absolus relativement faibles peuvent apparaître comme des changements importants lorsqu'ils sont exprimés en pourcentage pour des régions où les conditions de référence sont sèches



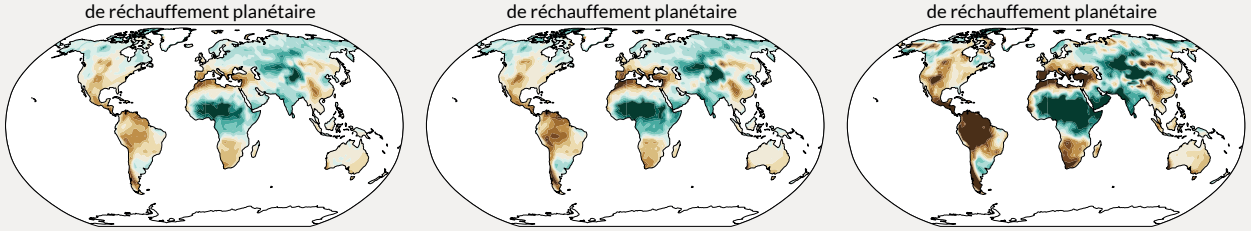
(d) Changement de l'humidité annuelle de la colonne totale de sol (écart-type)

Quel que soit le niveau de réchauffement, les changements de l'humidité du sol reflètent dans une large mesure les changements des précipitations avec néanmoins quelques différences en raison de l'influence de l'évapotranspiration.

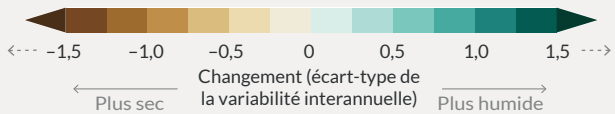
Changement simulé pour **1,5 °C** de réchauffement planétaire

Changement simulé pour **2 °C** de réchauffement planétaire

Changement simulé pour **4 °C** de réchauffement planétaire



Des changements absolus relativement faibles peuvent apparaître comme des changements importants lorsqu'ils sont exprimés en pourcentage pour des régions où les conditions de référence sont sèches



Panneau (b) Changement simulé de la moyenne annuelle de la température (en °C), panneau (c) des précipitations (en %), panneau (d) de l'humidité de la colonne totale du sol (en écart-type de la variabilité interannuelle) pour des niveaux de réchauffement planétaire de 1,5 °C, 2 °C et 4 °C (changement de la température à la surface du globe moyennée sur 20 ans, par rapport à 1850–1900). Les changements simulés correspondent au changement moyen multi-modèle de la phase 6 du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP6) (changement médian pour l'humidité du sol) pour le niveau de réchauffement planétaire correspondant, suivant la même méthode que pour la carte de droite du panneau (a). **Dans le panneau (c)**, des changements positifs élevés en pourcentage dans les régions sèches peuvent correspondre à des changements absolus faibles. **Dans le panneau (d)**, l'unité est l'écart-type de la variabilité interannuelle de l'humidité du sol sur la période 1850–1900. L'écart-type est une métrique couramment utilisée pour caractériser la sévérité des sécheresses. Une réduction projetée d'un écart-type de l'humidité moyenne du sol correspond à des conditions d'humidité du sol typiques de sécheresses qui se produisaient environ une fois tous les six ans en 1850–1900. Dans le panneau (d), de grands changements dans des régions sèches présentant une faible variabilité interannuelle dans les conditions de référence peuvent correspondre à un faible changement absolu. Les triangles situés à chacune des extrémités des barres de couleur indiquent les valeurs hors limites, c'est-à-dire les valeurs supérieures ou inférieures aux bornes indiquées. Les résultats de tous les modèles atteignant le niveau de réchauffement correspondant dans l'un des cinq scénarios illustratifs (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5) sont moyennés. Les cartes des changements de la température et des précipitations moyennes annuelles pour un niveau de réchauffement planétaire de 3 °C sont présentées dans les figure 4.31 et 4.32 de la section 4.6.Les cartes correspondant aux panneaux (b), (c) et (d), et comprenant des zones hachurées signalant le niveau de concordance entre les modèles à l'échelle de chaque point de grille, se trouvent respectivement aux figures 4.31, 4.32 et 11.19 ; comme le souligne l'encadré thématique Atlas.1, ces zones hachurées à l'échelle du point de grille ne fournissent pas d'informations pertinentes pour des échelles spatiales plus grandes (par exemple, pour les régions de référence de l'AR6) où les signaux agrégés sont moins affectés par la variabilité de petite échelle, ce qui entraîne une augmentation de la robustesse.

{figure 1.14, 4.6.1, encadré thématique 11.1, encadré thématique Atlas.1, RT.1.3.2, figures RT 3 et RT 5}

La fréquence et l'intensité des extrêmes augmentent, dans les projections, pour chaque incrément supplémentaire de réchauffement planétaire

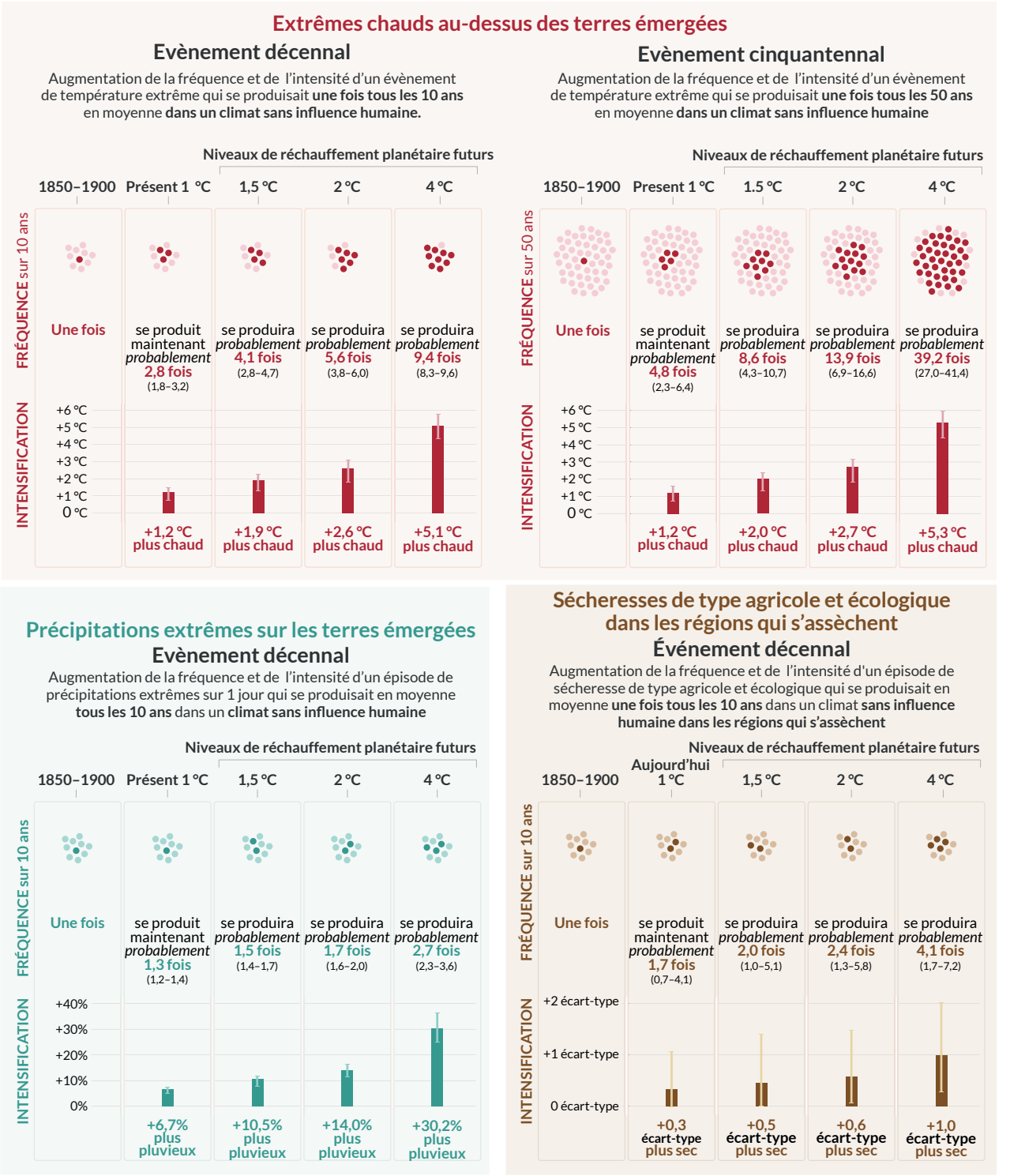


Figure RID.6 | Projections des changements de l'intensité et de la fréquence des extrêmes chauds et des précipitations extrêmes sur les terres émergées, ainsi que des sécheresses de type agricole et écologique dans les régions qui s'assèchent.

Les projections de ces changements sont présentées pour des niveaux de réchauffement planétaire (de 1 °C, 1,5 °C, 2 °C et 4 °C) par rapport à 1850–1900, période représentative d'un climat sans influence humaine. La figure indique la fréquence et l'intensification d'événements extrêmes ayant une période de retour de dix ou cinquante ans par rapport à la période de référence (1850–1900) pour différents niveaux de réchauffement planétaire.

Les extrêmes chauds sont définis par des températures maximales quotidiennes sur les terres émergées qui n'ont été dépassées en moyenne qu'une seule fois par décennie (événement décennal) ou qu'une fois en 50 ans (événement cinquantennal) au cours de la période de référence 1850–1900. Les **épisodes de précipitations extrêmes** se caractérisent par des hauteurs de précipitations quotidiennes sur les terres émergées qui n'ont été dépassées en moyenne qu'une

fois par décennie pendant la période de référence 1850–1900. Un épisode de sécheresse de type agricole et écologique est défini par une moyenne annuelle de l'humidité de la colonne totale du sol inférieure au 10e percentile de la période de référence (1850–1900). Ces extrêmes sont définis à l'échelle de la maille du modèle. Pour les extrêmes chauds et les précipitations extrêmes, les valeurs sont présentées pour l'ensemble des terres émergées. Pour les sécheresses de type agricole et écologique, les résultats sont présentés uniquement pour les régions qui s'assèchent, à savoir les régions de l'AR6 pour lesquelles une augmentation des sécheresses de type agricole et écologique est projetée avec au minimum un *degré de confiance moyen* pour un niveau de réchauffement de 2 °C par rapport à la période de référence 1850–1900, dans la phase 6 du Projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP6). Ces régions comprennent l'ouest de l'Amérique du Nord, le centre de l'Amérique du Nord, le nord de l'Amérique centrale, le sud de l'Amérique centrale, les Caraïbes, le nord de l'Amérique du Sud, le nord-est de l'Amérique du Sud, la zone de mousson sud-américaine, le sud-ouest de l'Amérique du Sud, le sud de l'Amérique du Sud, l'Europe du centre et de l'ouest, la Méditerranée, l'Afrique du sud-ouest, l'Afrique du sud-est, Madagascar, l'est de Australie, le sud de l'Australie (les Caraïbes n'ont pas été prises en compte pour l'élaboration de la figure du fait d'un trop petit nombre de mailles correspondant entièrement à des terres émergées). Les régions qui ne s'assèchent pas ne présentent ni augmentation ni diminution généralisées de l'intensité des sécheresses. Les projections de changements des sécheresses de type agricole et écologique de l'ensemble multi-modèles de la phase 5 de CMIP (CMIP5) diffèrent de celles de CMIP6 dans certaines régions, notamment dans certaines parties de l'Afrique et de l'Asie. Les évaluations des projections de changements relatifs aux sécheresses météorologiques et hydrologiques sont fournies au chapitre 11.

Dans la **section « fréquence »,** chaque année est représentée par un point. Les points sombres indiquent les années au cours desquelles le seuil défini comme extrême est dépassé, tandis que les points clairs sont les années où ce seuil ne l'est pas. Les valeurs correspondent aux médianes (en gras) et à leurs fourchettes respectives, de 5 à 95 %, qui s'appuient sur l'ensemble multi-modèles des simulations CMIP6 selon différents scénarios de trajectoires socio-économiques partagées. Par souci de cohérence, le nombre de points sombres est basé sur l'arrondi vers le haut de la médiane. Dans la **section « intensité »,** les médianes et leurs fourchettes respectives (de 5 à 95 %), qui se fondent également sur l'ensemble multi-modèles des simulations CMIP6, apparaissent sous la forme de barres, respectivement sombres et claires. Les changements d'intensité des extrêmes chauds et des précipitations extrêmes sont exprimés, respectivement, en degrés Celsius et en pourcentage. Pour ce qui est des sécheresses de type agricole et écologique, les changements d'intensité sont exprimés sous forme de fractions de l'écart-type de l'humidité du sol moyenne annuelle.

{11.1 ; 11.3 ; 11.4 ; 11.6 ; 11.9 ; figures 11.12, 11.15, 11.6, 11.7 et 11.18}

B.3 Il est projeté que la poursuite du réchauffement planétaire intensifiera davantage le cycle global de l'eau, notamment sa variabilité, les précipitations de la mousson globale et la sévérité des épisodes humides et secs.

{4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, encadré 8.2, 11.4, 11.6, 11.9, 12.4, Atlas.3} (figure RID.5, figure RID.6)

B.3.1 Le renforcement des éléments probants depuis l'AR5 montre que le cycle global de l'eau continuera à s'intensifier à mesure de la hausse de la température planétaire (*degré de confiance élevé*), les projections indiquant une augmentation de la variabilité des précipitations et des écoulements d'eau de surface dans la plupart des régions continentales, au cours d'une même saison (*degré de confiance élevé*) et d'une année à l'autre (*degré de confiance moyen*). Il est projeté, d'ici à 2081–2011, par rapport à 1995–2014, que les précipitations annuelles moyennes sur les terres émergées à l'échelle mondiale augmenteront de 0 à 5 % dans le cas du scénario de très basses émissions de GES (SSP1-1.9), de 1,5 à 8 % dans le cas du scénario d'émissions de GES intermédiaires (SSP2-4.5) et de 1 à 13 % dans le cas du scénario d'émissions très élevées de GES (SSP5-8.5) (*fourchettes probables*). Il est projeté que les précipitations augmenteront aux hautes latitudes, dans le Pacifique équatorial et dans certaines parties des régions de mousson, mais diminueront dans certaines parties des régions subtropicales et dans des zones limitées des tropiques pour les scénarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 (*très probable*). Dans les projections, la portion des terres émergées de la planète présentant une augmentation ou une diminution détectable des hauteurs moyennes de précipitations saisonnières augmentera (*degré de confiance moyen*). Dans les régions dominées par la neige, à l'échelle mondiale, il y a *un degré de confiance élevé* dans un début plus précoce de la fonte des neiges printanière, avec des débits de pointe plus élevés, au détriment des écoulements d'été.
{4.3, 4.5, 4.6, 8.2, 8.4, Atlas.3, RT.2.6, RT.4.3, encadré RT.6} (figure RID.5)

B.3.2 Un climat plus chaud intensifiera les évènements météorologiques et climatiques ainsi que les saisons très humides et très secs, avec des implications pour les inondations ou les sécheresses (*degré de confiance élevé*), mais l'emplacement et la fréquence de ces évènements dépendent des projections de changements de la circulation atmosphérique à l'échelle régionale, notamment les moussons et les trajectoires des tempêtes aux latitudes moyennes. Il est *très probable* que la variabilité des précipitations liée à El Niño-oscillation australe sera amplifiée d'ici à la seconde moitié du 21e siècle, dans le cas des scénarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5.
{4.3, 4.5, 4.6, 8.2, 8.4, 8.5, 11.4, 11.6, 11.9, 12.4, RT.2.6, RT.4.2, encadré RT.6} (figure RDI.5, figure RDI.6)

B.3.3 Dans les projections, les précipitations de mousson augmentent à moyen ou long terme à l'échelle mondiale, en particulier en Asie du Sud et du Sud-Est, en Asie de l'Est et en Afrique de l'Ouest, à l'exception de l'extrême ouest du Sahel (*degré de confiance élevé*). Il est projeté que le démarrage de la saison de mousson sera plus tardif en Amérique du Nord, en Amérique du Sud et en Afrique de l'Ouest (*degré de confiance élevé*) et son retrait plus tardif en Afrique de l'Ouest (*degré de confiance moyen*).
{4.4, 4.5, 8.2, 8.3, 8.4, encadré 8.2, encadré RT.13}

B.3.4 Aux moyennes latitudes de l'hémisphère sud, le déplacement vers le sud et l'intensification des trajectoires des tempêtes estivales et des précipitations associées sont *probables* dans le cas des scénarios d'émissions élevées de GES (SSP3-7.0, SSP5-8.5), mais,

à court terme, l'effet de la reconstitution de la couche d'ozone stratosphérique contrebalance ces changements (*degré de confiance élevé*). Il y a un *degré de confiance moyen* quant à la poursuite du déplacement vers le pôle des tempêtes et des précipitations associées dans le Pacifique Nord, tandis qu'il y a *un degré de confiance faible* quant aux changements projetés de trajectoires des tempêtes dans l'Atlantique Nord.
{4.4, 4.5, 8.4, RT.2.3, RT.4.2}

B.4 Pour les scénarios où les émissions de CO_2 augmentent, il est projeté que les puits de carbone océaniques et terrestres seront moins efficaces pour ralentir l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère. {4.3, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6} (Figure RID.7)

B.4.1 Alors qu'il est projeté que les puits de carbone naturels terrestres et océaniques absorbent, en termes absolus, une quantité de plus en plus grande de CO_2 dans les scénarios d'émissions plus élevées, que dans les scénarios d'émissions plus basses, ces puits de carbone deviennent moins efficaces, c'est-à-dire que la proportion des émissions absorbées par les terres émergées et l'océan diminue à mesure que le cumul des émissions de CO_2 augmente. Il en résulte, dans les projections, une fraction plus élevée du CO_2 émis restant dans l'atmosphère (*degré de confiance élevé*).
{5.2, 5.4, encadré RT.5} (figure RID.7)

B.4.2 Dans le cas du scénario intermédiaire qui stabilise les concentrations de CO_2 dans l'atmosphère au cours de ce siècle (SSP2-4.5), les projections climatiques montrent une diminution des taux d'absorption du CO_2 par les terres émergées et l'océan au cours de la seconde moitié du 21e siècle (*degré de confiance élevé*). Dans le cas de scénarios d'émissions de GES très basses ou basses (SSP1-1.9, SSP1-2.6), qui entraînent un pic, puis une diminution des concentrations de CO_2 au cours du 21e siècle, les terres émergées et l'océan commenceraient à absorber moins de carbone en réponse à la baisse de concentrations du CO_2 dans l'atmosphère (*degré de confiance élevé*) pour devenir une faible source nette d'ici à 2100 dans le cas du scénario SSP1-1.9 (*degré de confiance moyen*). Il est très *improbable* que l'ensemble des puits terrestre et océanique se transforme en source d'ici 2100 dans le cas de scénarios sans émissions nettes négatives (SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)[32].
{4.3, 5.4, 5.5, 5.6, encadré RT.5, RT.3.3}

B.4.3 L'ampleur des rétroactions entre le changement climatique et le cycle du carbone s'accroît, mais devient aussi plus incertaine, pour les scénarios d'émissions élevées de CO_2 (*degré de confiance très élevé*). Toutefois, les projections des modèles climatiques montrent que les incertitudes relatives aux concentrations atmosphériques de CO_2 d'ici à 2100 sont dominées par les différences entre les scénarios d'émissions (*degré de confiance élevé*). D'autres réponses des écosystèmes au réchauffement qui ne sont pas encore entièrement prises en compte dans les modèles climatiques, comme les flux de CO_2 et de CH_4 provenant des zones humides, du dégel du pergélisol et des incendies de forêt, renforceraient encore l'augmentation des concentrations de ces gaz dans l'atmosphère (*degré de confiance élevé*).
{5.4, encadré RT.5, RT.3.2}

32 Ces projections d'ajustements des puits de carbone en réponse à la stabilisation ou à la diminution du CO_2 atmosphérique sont pris en compte dans le calcul des budgets carbone résiduels.

La proportion des émissions de CO_2 absorbée par les puits de carbone terrestres et océaniques est plus faible pour les scénarios correspondant à des émissions cumulées de CO_2 plus élevées

Émissions totales cumulées de CO_2 **absorbées par les terres émergées et l'océan** (couleurs) et restant dans l'atmosphère (gris) selon les cinq scénarios illustratifs entre 1850 et 2100.

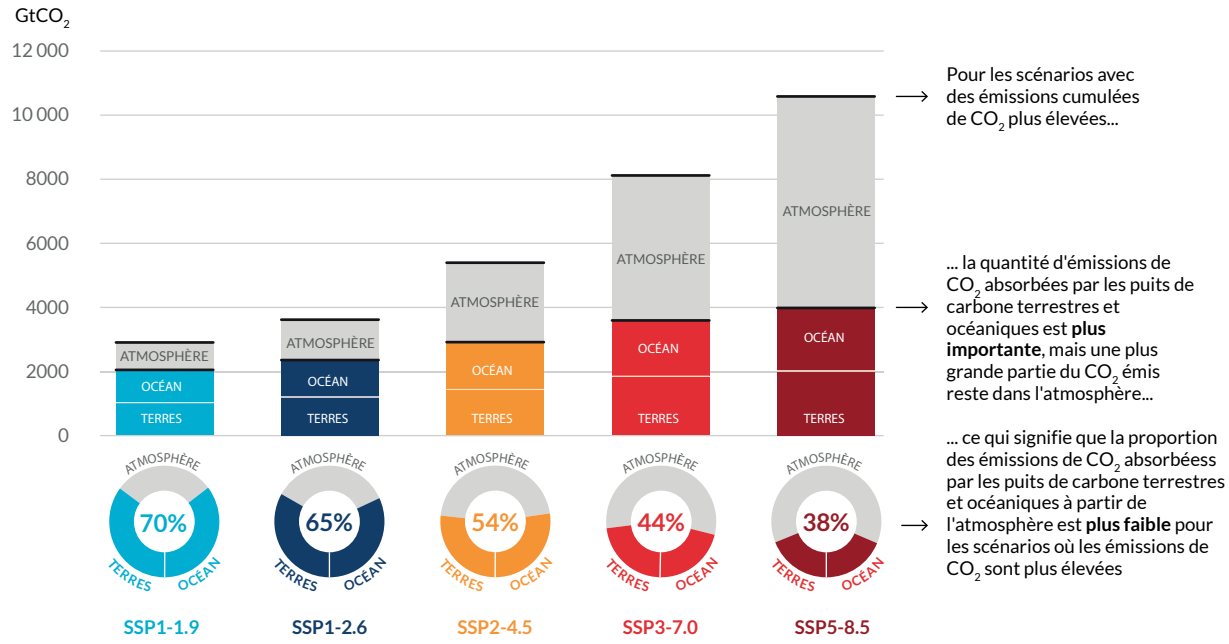


Figure RID.7 | Émissions anthropiques cumulées de CO_2 absorbées par les puits terrestres et océaniques d'ici à 2100 pour les cinq scénarios illustratifs.

Les émissions cumulées de dioxyde de carbone (CO_2) anthropiques (d'origine humaine) absorbées par les puits terrestres et océaniques sont simulées de 1850 à 2100 pour les cinq scénarios illustratifs (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5) par les modèles climatiques de la phase 6 du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP6) dans des configurations où les concentrations sont prescrites. Les puits de carbone terrestres et océaniques répondent aux émissions passées, actuelles et futures ; ce sont donc les puits cumulés de 1850 à 2100 qui sont présentés ici. Au cours de la période historique (1850–2019), les puits terrestres et océaniques observés ont absorbé 1430 $GtCO_2$ (59 % des émissions).

Le **diagramme en barres** illustre les quantités cumulées entre 1850 et 2100 d'émissions de CO_2 ($GtCO_2$) d'origine anthropique restant dans l'atmosphère (partie grise) et absorbées par les terres émergées et l'océan (partie colorée) en 2100 selon les projections. **Le diagramme circulaire** illustre la proportion des émissions anthropiques cumulées de CO_2 absorbées par les puits terrestres et océaniques et celle restant dans l'atmosphère en 2100. Les valeurs en pourcentage indiquent la proportion des émissions cumulées de CO_2 d'origine anthropique absorbées par l'ensemble des puits terrestres et océaniques combinés en 2100. Le total des émissions de carbone d'origine anthropique est calculé en ajoutant les émissions mondiales nettes liées à l'usage des terres de la base de données des scénarios CMIP6 aux autres émissions sectorielles calculées sur la base des simulations de modèles climatiques avec des concentrations prescrites de CO_2[33]. La quantité de CO_2 absorbé par les terres émergées et l'océan depuis 1850 est calculée sur la base de la productivité nette des biomes terrestres, corrigée des pertes de CO_2 dues aux changements d'affectation des terres par l'ajout des émissions correspondantes, et du flux net de CO_2 océanique.

{5.2.1 ; tableau 5.1 ; 5.4.5 ; figure 5.25 ; encadré RT.5 ; encadré RT.5, figure 1}

B.5 De nombreux changements dus aux émissions de gaz à effet de serre passées et à venir sont irréversibles à l'échelle de siècles à millénaires, en particulier les changements concernant l'océan, les calottes glaciaires et le niveau de la mer à l'échelle du globe. {2.3, encadré thématique 2.4, 4.3, 4.5, 4.7, 5.3, 9.2, 9.4, 9.5, 9.6, encadré 9.4} (figure.RID.8)

B.5.1 Les émissions passées de GES depuis 1750 entraînent inexorablement un réchauffement de l'océan mondial qui va se poursuivre à l'avenir (*degré de confiance élevé*). L'ampleur du réchauffement *probable* de l'océan varie de 2 à 4 (SSP1-2.6) à 4 à 8 fois (SSP5-8.5) celui survenu entre 1971 et 2018. Sur la base de multiples éléments probants, la stratification des couches supérieures de l'océan (*quasi-certain*), l'acidification de l'océan (*quasi-certain*) et la désoxygénation de l'océan (*degré de confiance élevé*) continueront à augmenter au cours du 21e siècle, le rythme de ces changements dépendant des émissions futures. Les changements de température de l'océan mondial (*degré de confiance très élevé*), l'acidification de l'océan profond (*degré de*

33 Les autres émissions sectorielles sont calculées comme étant le résidu de la quantité nette de CO_2 absorbée par les terres émergées et l'océan ainsi que les changements des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère prescrits pour les simulations CMIP6. Ces émissions calculées sont des valeurs nettes, qui ne distinguent pas les émissions brutes d'origine anthropique des quantités éliminées, qui sont incluses implicitement.

confiance très élevé) et la désoxygénation de l'océan profond (*degré de confiance moyen*) sont irréversibles à l'échelle de siècles à millénaires.
{4.3, 4.5, 4.7, 5.3, 9.2, RT.2.4} (figure RID.8)

B.5.2 Les glaciers de montagne et les glaciers polaires vont inexorablement continuer à fondre pendant des décennies ou des siècles (*degré de confiance très élevé*). La perte de carbone du pergélisol entraînée par son dégel est irréversible à l'échelle de siècles (*degré de confiance élevé*). Au cours du 21e siècle, il est *quasi-certain* que la perte de glace de la calotte glaciaire du Groenland se poursuivra, et cela est *probable* pour la calotte glaciaire Antarctique. Il y a un *degré de confiance élevé* sur le fait que le total de la perte de glace de la calotte glaciaire de l'Antarctique augmentera avec le cumul des émissions. Il existe des *éléments probants limités* concernant des éventualités de faible probabilité mais à fort impact (résultant de processus d'instabilité des calottes glaciaires, caractérisés par une incertitude profonde, et, dans certains cas, faisant intervenir des points de bascule) qui augmenteraient fortement la perte de glace de la calotte glaciaire antarctique durant des siècles dans le cas de scénarios d'émissions élevées de GES[34].
{4.3, 4.7, 5.4, 9.4, 9.5, encadré 9.4, encadré RT.1, RT.2.5}

B.5.3 Il est *quasi-certain* que l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe se poursuivra au cours du 21e siècle. Par rapport à 1995–2014, l'élévation *probable* du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe d'ici à 2100 est de 0,28 à 0,55 m dans le cas du scénario de très basses émissions de GES (SSP1-1.9) ; de 0,32 à 0,62 m dans le cas du scénario de basses émissions de GES (SSP1-2.6) ; de 0,44 à 0,76 m dans le cas du scénario d'émissions de GES intermédiaires (SSP2-4.5) ; et de 0,63 à 1,01 m dans le cas du scénario d'émissions de GES très élevées (SSP5-8.5). Par rapport à la même période de référence, l'élévation *probable* d'ici à 2150 est de 0,37 à 0,86 m dans le cas du scénario d'émissions très faibles (SSP1-1.9) ; de 0,46 à 0,99 m dans le cas du scénario d'émissions faibles (SSP1-2.6) ; de 0,66 à 1,33 m dans le cas du scénario intermédiaire (SSP2-4.5) ; et de 0,98 à 1,88 m dans le cas du scénario d'émissions très élevées (SSP5-8.5) (*degré de confiance moyen*)[35]. Une élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe supérieure à la fourchette *probable* – approchant 2 m d'ici à 2100 et 5 m d'ici à 2150 dans le cas d'un scénario d'émissions de GES très élevées (SSP5-8.5) (*degré de confiance faible*) – ne peut être exclue en raison de l'incertitude profonde liée aux processus des calottes glaciaires.
{4.3, 9.6, encadré 9.4, encadré RT 4} (figure RID.8)

B.5.4 À plus long terme, le niveau de la mer va inéluctablement continuer à s'élever pendant des siècles à des millénaires, du fait de la poursuite du réchauffement de l'océan profond et de la fonte des calottes glaciaires, et restera élevé pendant des milliers d'années (*degré de confiance élevé*). Au cours des 2000 prochaines années, le niveau moyen de la mer à l'échelle globale s'élèvera d'environ 2 à 3 m si le réchauffement est limité à 1,5 °C, de 2 à 6 m s'il est limité à 2 °C et de 19 à 22 m pour un réchauffement de 5 °C, et continuera à augmenter au cours des millénaires suivants (*degré de confiance faible*). Les projections de l'élévation plurimillénaire du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe moyen de la mer sont cohérentes avec les niveaux reconstruits pendant les périodes climatiques chaudes du passé : une élévation *probable* de 5 à 10 m de plus qu'aujourd'hui il y a environ 125 000 ans, lorsque les températures planétaires étaient supérieures de 0,5 °C à 1,5 °C (*très probable*) à celles de 1850–1900 ; et une élévation *très probable* de 5 à 25 m de plus qu'aujourd'hui il y a environ 3 millions d'années, lorsque les températures planétaires étaient de 2,5 à 4 °C plus élevées (*degré de confiance moyen*).
{2.3, encadré thématique 2.4, 9.6, encadré RT.2, encadré RT.4, encadré RT.9}

34 Les éventualités de faible probabilité mais à fort impact sont des évènements dont la probabilité d'occurrence est faible ou mal connue (comme dans le contexte d'une incertitude profonde) mais dont les impacts potentiels sur la société et les écosystèmes seraient considérables. Un point de bascule est un seuil critique au-delà duquel un système se réorganise, souvent de manière soudaine et/ou irréversible (voir le glossaire). {1.4, encadré thématique 1.3, 4.7}

35 Pour comparer à la période de référence 1986–2005 utilisée dans l'AR5 et le SROCC, ajouter 0,03 m à ces estimations de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe. Pour comparer à la période de référence de 1900 utilisée à la figure RID 8, ajouter 0,16 m.

Les activités humaines affectent toutes les composantes majeures du système climatique, certaines réagissant pendant des décennies et d'autres pendant des siècles.

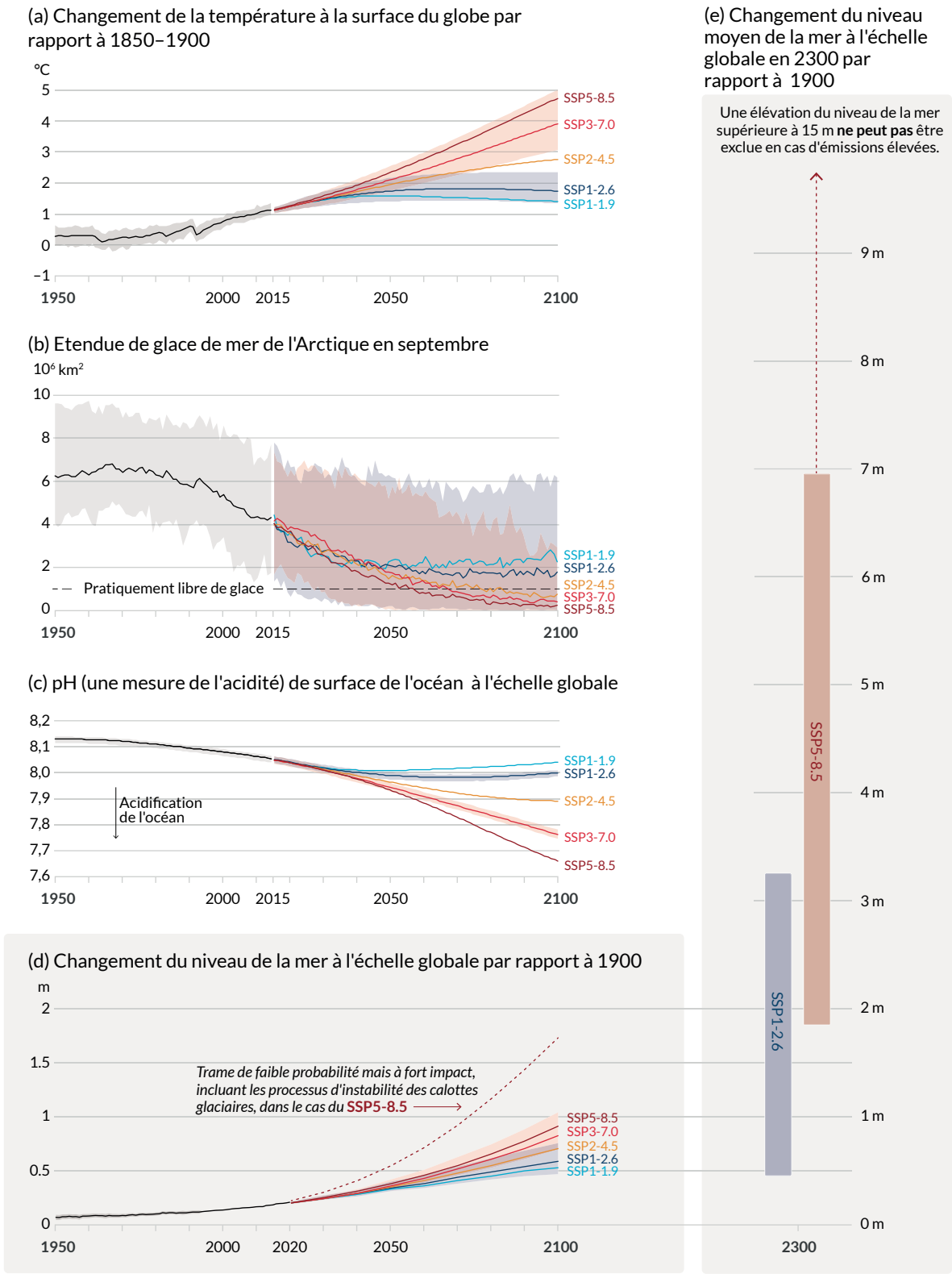


Figure RID.8 | Sélection d'indicateurs du changement climatique planétaire, pour les cinq scénarios illustratifs utilisés dans ce rapport.

Les projections pour chacun des cinq scénarios sont indiquées en couleur. Les zones ombrées représentent les fourchettes d'incertitude. Plus de détails sont fournis pour chaque panneau ci-dessous. Les courbes noires correspondent aux simulations historiques (panneaux a, b, c) ou aux observations (panneau (d). Ces valeurs historiques sont incluses dans tous les graphiques pour fournir le contexte des changements projetés.

Panneau (a) Changements de la température à la surface du globe en °C par rapport à 1850–1900. Ces changements ont été obtenus en combinant les simulations des modèles CMIP6 (Phase 6 du Projet d'intercomparaison de modèles couplés), aux contraintes issues des observations basées sur le réchauffement passé simulé, et à la réévaluation de la sensibilité climatique à l'équilibre (voir encadré RID 1). Les changements par rapport à 1850–1900, basés sur des moyennes sur des périodes de 20 ans, sont calculés en ajoutant 0,85 °C (la hausse de la température à la surface du globe entre 1850–1900 et 1995–2014) aux changements simulés par rapport à 1995–2014. Les fourchettes *très probables* sont indiquées pour les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0.

Panneau (b) Etendue de glace de mer de l'Arctique en septembre, en 10^6 km^2, issue des simulations des modèles CMIP6. Les fourchettes *très probables* sont indiquées pour les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0. Dans le cas des des scénarios avec des émissions de GES intermédiaires ou élevées, il est projeté que l'Arctique sera pratiquement libre de glace vers le milieu de ce siècle.

Panneau (c) pH de surface de l'océan à l'échelle globale (une mesure de l'acidité) issu sur des simulations des modèles CMIP6. Les fourchettes *très probables* sont indiquées pour les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0.

Panneau (d) Changement du niveau moyen de la mer à l'échelle globale en mètres, par rapport à 1900. Les changements historiques sont issus des observations (à l'aide de marégraphes avant 1992, puis d'altimètres par la suite) et les changements futurs sont évalués de manière cohérente avec l es contraintes issues des observations à partir de l'émulation de CMIP, et de modèles de calottes glaciaires et de glaciers. Les fourchettes *probables* sont indiquées pour les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0. Seules les fourchettes *probables* sont évaluées pour les changements du niveau de la mer en raison de la difficulté à estimer la distribution résultant de processus associés à une incertitude profonde. La courbe en pointillés indique l'impact potentiel de ces processus associés à une incertitude profonde. Elle représente le 83e percentile des projections SSP5-8.5 incluant des processus liés aux calottes glaciaires de faible probabilité mais à fort impact, qui ne peuvent être exclus ; du fait du *faible degré de confiance* qui accompagne les projections de ces processus, cette courbe ne s'inscrit pas dans une fourchette *probable*. Les changements par rapport à 1900 sont calculées en ajoutant 0,158 m (élévation moyenne du niveau de la mer à l'échelle globale, observée entre 1900 et la période 1995–2014) aux changements simulés et observée par rapport à la période 1995–2014.

Panneau (e) Changement du niveau moyen de la mer à l'échelle globale en 2300, exprimée en mètres, par rapport à 1900. Seuls les scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8.5 font l'objet de projections à l'horizon 2300, car les simulations qui s'étendent au-delà de 2100 sont trop peu nombreuses pour que les résultats soient robustes. Les fourchetttes entre le 17e et le 83e percentile sont ombrées. La flèche en pointillés illustre le 83e percentile des projections SSP5-8.5 incluant des processus liés aux calottes glaciaires à faible probabilité mais à fort impact, qui ne peuvent être exclus.

Le panneau (b) comme le panneau (c) sont basés sur des simulations uniques de chacun des modèles et comportent donc une composante de variabilité interne. Les panneaux (a), (d) et (e) sont basés sur des moyennes à long terme, avec par conséquent des contributions basses de la variabilité interne.

{4.3 ; figures 4.2, 4.8 et 4.11 ; 9.6 ; figure 9.27 ; figures.RT 8 et RT.11 ; encadré RT.4, figure 1}

C. Informations climatiques pour l'évaluation des risques et l'adaptation régionale

Les informations climatiques physiques caractérisent la manière dont le système climatique répond aux interactions entre l'influence humaine, les facteurs naturels et la variabilité interne. Les connaissances portant sur la réponse du climat et l'éventail des éventualités, y compris celles à faible probabilité mais à fort impact, éclairent les services climat iques dans le cadre de l'évaluation des risques liés au climat et de la planification des mesures d'adaptation. Les informations climatiques physiques, que ce soit à l'échelle mondiale, régionale ou locale, sont élaborées sur la base de multiples éléments probants, notamment des produits d'observation, des résultats de modèles climatiques et des diagnostics sur mesure.

C.1 Les facteurs naturels et la variabilité interne moduleront les changements d'origine humaine, en particulier à l'échelle régionale et à court terme, mais auront peu d'effet sur le réchauffement planétaire à l'échelle du siècle. Il est important de tenir compte de ces modulations pour se préparer à tout l'éventail des changements possibles.

{1.4, 2.2, 3.3, encadré thématique 3.1, 4.4, 4.6, encadré thématique 4.1, encadré 7.2, 8.3, 8.5, 9.2, 10.3, 10.4, 10.6, 11.3, 12.5, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, encadré thématique Atlas.2}

C.1.1 L'enregistrement historique de la température à la surface du globe montre que la variabilité décennale a renforcé et masqué les changements sous-jacents à long terme d'origine humaine, et cette variabilité persistera à l'avenir (*degré de confiance très élevé*). Par exemple, la variabilité interne décennale et les variations des facteurs solaires et volcaniques ont partiellement masqué le réchauffement de surface d'origine humaine durant la période 1998–2012, avec des empreintes régionales et saisonnières prononcées (*degré de confiance élevé*). Néanmoins, l'accumulation de chaleur dans le système climatique s'est poursuivie au cours de cette période, comme en témoignent à la fois le réchauffement continu de l'océan mondial (*degré de confiance très élevé*) et l'accroissement continu des extrêmes chauds sur les terres émergées (*degré de confiance moyen*).
{1.4, 3.3, encadré thématique 3.1, 4.4, encadré 7.2, 9.2, 11.3, encadré thématique RT.1} (figure RID.1)

C.1.2 Les changements dus à l'influence humaine projetés pour le climat moyen et les facteurs climatiques générateurs d'impacts (CID, pour "climatic impact-drivers"[36]), seront soit amplifiés soit atténués par la variabilité interne (*degré de confiance élevé*)[37]. Un refroidissement à court terme par rapport au climat actuel pourrait se produire en tout lieu et serait cohérent avec l'augmentation de la température à la surface du globe due à l'influence humaine (*degré de confiance élevé*).
{1.4, 4.4, 4.6, 10.4, 11.3, 12.5, Atlas.5, Atlas.10, Atlas.11, RT.4.2}

C.1.3 Pour les précipitations moyennes de nombreuses régions terrestres, la variabilité interne est en grande partie responsable de l'amplification et l'amoindrissement des changements d'origine humaine à l'échelle décennale à multi décennale observés (*degré de confiance élevé*). Aux échelles globale et régionale, les variations à court terme des moussons seront dominées par les effets de la variabilité interne (*degré de confiance moyen*). En plus de l'influence de la variabilité interne, les projections des changements à court terme des précipitations à l'échelle mondiale comme régionale sont incertaines en raison de l'incertitude des modèles et de l'incertitude des forçages liés aux aérosols d'origine naturelle et anthropique (*degré de confiance moyen*).
{1.4, 4.4, 8.3, 8.5, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, Atlas.4, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, encadré thématique Atlas.2, RT.4.2, encadré RT.6, encadré RT.13}

C.1.4 Sur la base des éléments probants paléoclimatiques et historiques, il est *probable* qu'au moins une grande éruption volcanique explosive se produira au cours du 21e siècle[38]. Une telle éruption entraînerait une diminution de la température à la surface du globe et des précipitations, en particulier sur les terres émergées, pendant un à trois ans, altérerait la circulation de la mousson globale, modifierait les précipitations extrêmes et affecterait de nombreux CID (*degré de confiance moyen*). Si une telle éruption se produisait, elle masquerait donc temporairement et partiellement le changement climatique d'origine humaine.
{2.2, 4.4, encadré thématique 4.1, 8.5, RT.2.1}

C.2 Avec la poursuite du réchauffement climatique, il est projeté que chaque région subira de plus en plus de changements multiples et simultanés de facteurs climatiques générateurs d'impacts. Les changements de plusieurs de ces facteurs seraient plus généralisés pour 2 °C que pour 1,5 °C de réchauffement planétaire et encore plus généralisés et/ou prononcés pour des niveaux de réchauffement planétaire plus élevés.
{8.2, 9.3, 9.5, 9.6, encadré 10.3, 11.3, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7, 11.9, encadré 11.3, encadré 11.4, encadré thématique 11.1, 12.2, 12.3, 12.4, 12.5, encadré thématique 12.1, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11} (tableau RID.1, figure RID.9)

C.2.1 Il est projeté que toutes les régions[39] vont subir de nouvelles augmentations des CID chauds et de nouvelles diminutions des CID froids (*degré de confiance élevé*). De nouvelles réductions sont projetées pour le pergélisol, la neige, les glaciers et les calottes glaciaires, la glace de lac, et la glace de mer arctique (*degré de confiance moyen à élevé*)[40]. Ces changements seraient plus importants pour un réchauffement planétaire de 2 °C ou davantage que pour 1,5 °C (*degré de confiance élevé*). Par exemple, il est projeté que les seuils de chaleur extrême critiques pour l'agriculture et la santé seront dépassés plus fréquemment pour les niveaux de réchauffement planétaire les plus élevés (*degré de confiance élevé*).
{9.3, 9.5, 11.3, 11.9, encadré thématique 11.1, 12.3, 12.4, 12.5, encadré thématique 12.1, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, RT 4.3} (tableau RID.1, figure RID.9)

C.2.2 Pour un réchauffement planétaire de 1,5 °C, il est projeté que les précipitations extrêmes et les inondations associées s'intensifieront et deviendront plus fréquentes dans la plupart des régions d'Afrique et d'Asie (*degré de confiance élevé*), d'Amérique du Nord (*degré de confiance moyen à élevé*)[39] et d'Europe (*degré de confiance moyen*). De plus, il est projeté que les sécheresses de type agricole et écologique deviendront plus fréquentes et/ou plus sévères que durant la période 1850–1900 dans quelques régions de tous les continents habités, à l'exception de l'Asie (*degré de confiance moyen*) ; il est projeté que les sécheresses météorologiques augmenteront également dans quelques régions (*degré de confiance moyen*). Il est projeté qu'un petit nombre de régions subira une augmentation ou une diminution des précipitations moyennes (*degré de confiance moyen*).
{11.4, 11.5, 11.6, 11.9, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, RT.4.3} (tableau RID.1)

---

36 Les facteurs climatiques générateurs d'impact (CID, pour « climatic impact-drivers ») sont des conditions physiques du système climatique (par exemple des moyennes, des évènements ou des extrêmes) qui affectent la société ou les écosystèmes d'une certaine façon. Selon la tolérance du système concerné, ces facteurs et leurs changements peuvent avoir un effet préjudiciable, bénéfique, neutre ou un mélange de ces aspects sur l'ensemble des éléments de ce système et des régions qui sont en interaction. Les catégories de CID incluent la chaleur et le froid, l'humidité et la sécheresse, le vent, la neige et la glace, le littoral et la haute mer.

37 Les principaux phénomènes impliqués dans la variabilité interne sont El Niño-oscillation australe, la variabilité décennale du Pacifique et la variabilité atlantique pluridécennale, du fait de leur influence régionale.

38 Sur la base des reconstructions des derniers 2500 ans, les éruptions avec un forçage négatif plus fort que -1 W m^{-2} se produisent en moyenne deux fois par siècle.

39 Les régions dont il est question ici sont les régions de référence du GTI de l'AR6, qui sont utilisées dans ce rapport pour présenter synthétiquement les informations à l'échelle de régions sous-continentales et océaniques. Sauf indication contraire, les changements sont comparés aux moyennes des 20 à 40 dernières années. {1.4, 12.4, Atlas.1}.

40 Le degré de confiance ou de probabilité spécifique dépend de la région considérée. Ces précisions sont disponibles dans le Résumé technique et dans le rapport complet.

C.2.3 Pour un réchauffement planétaire de 2 °C ou davantage, le niveau de confiance associé aux changements de sécheresses, de précipitations moyennes et et extrêmes augmente, tout comme l'ampleur de ces changements, par rapport à leurs caractéristiques pour un réchauffement de 1,5 °C. Il est projeté que les précipitations extrêmes et les inondations associées deviendront plus intenses et plus fréquentes dans les îles du Pacifique et dans de nombreuses régions d'Amérique du Nord et d'Europe (*degré de confiance moyen à élevé*)[39]. Des tendances similaires sont également attendues dans certaines régions d'Australasie et d'Amérique centrale et du Sud (*degré de confiance moyen*). Pour plusieurs régions d'Afrique, d'Amérique du Sud et d'Europe, il est projeté que les sécheresses de type agricole et écologique deviendront plus fréquentes et/ou plus sévères (*degré de confiance moyen à élevé*)[39] ; des augmentations similaires sont également attendues en Australasie, en Amérique centrale et du Nord, et dans les Caraïbes (*degré de confiance moyen*). Il est projeté qu'un petit nombre de régions d'Afrique, d'Australasie, d'Europe et d'Amérique du Nord seront affectées par une augmentation des sécheresses hydrologiques, et il est projeté que plusieurs régions connaîtront une augmentation ou une diminution des sécheresses météorologiques, avec davantage de régions concernées par une augmentation (*degré de confiance moyen*). Il est projeté que les précipitations moyennes augmenteront dans toutes les régions polaires, de même que dans toutes les régions du nord de l'Europe et d'Amérique du Nord, dans la plupart des régions d'Asie et dans deux régions d'Amérique du Sud (*degré de confiance élevé*).
{11.4, 11.6, 11.9, encadré thématique 11.1, 12.4, 12.5, encadré thématique 12.1, Atlas.5, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.11, RT 4.3} (tableau RID.1, figure RID.5, figure RID.6, figure RID.9)

C.2.4 Il est projeté qu'un plus grand nombre de CID changeront dans un plus grand nombre de régions pour 2 °C par rapport à 1,5 °C de réchauffement planétaire (*degré de confiance élevé*). Les changements affectant spécifiquement certaines régions comprennent l'intensification des cyclones tropicaux et/ou des tempêtes extratropicales (*degré de confiance moyen*), l'augmentation des inondations fluviales (*degré de confiance moyen à élevé*)[40], la diminution des précipitations moyennes et l'augmentation de l'aridité (*degré de confiance moyen à élevé*)[40], et l'augmentation des conditions météorologiques propices aux incendies (*degré de confiance moyen à élevé*)[40]. Dans la plupart des régions, un degré de confiance faible est associé aux changements potentiels futurs d'autres CID, tels que la grêle, les pluies verglaçantes, les orages violents, les tempêtes de sable, les chutes de neige extrêmes et les glissements de terrain.
{11.7, 11.9, encadré thématique 11.1, 12.4, 12.5, encadré thématique 12.1, Atlas.4, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.10, RT.4.3.1, TS.4.3.2, RT.5} (tableau RID.1, figure RID.9)

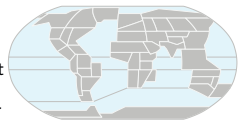
C.2.5 Il est *très probable*, voire *quasi-certain*[40], que l'élévation relative moyenne régionale du niveau de la mer se poursuivra tout au long du 21e siècle, sauf dans quelques régions où le taux de soulèvement géologique du sol est important. Pour environ deux tiers du littoral mondial, les projections de l'élévation relative régionale du niveau de la mer se situent à ± 20 % de l'élévation moyenne à l'échelle du globe (*degré de confiance moyen*). En raison de l'élévation relative du niveau de la mer, il est projeté que les événements de niveau marin extrême qui, dans un passé récent, se produisaient une fois par siècle, se produiront au minimum annuellement d'ici à 2100, pour plus de la moitié des sites où se trouvent des marégraphes (*degré de confiance élevé*). L'élévation relative du niveau de la mer contribue à l'accroissement de la fréquence et la sévérité des inondations côtières dans les zones de faible altitude et à l'érosion côtière le long de la plupart des littoraux sableux (*degré de confiance élevé*).
{9.6, 12.4, 12.5, encadré thématique 12.1, encadré RT.4, RT.4.3} (figure RID.9)

C.2.6 Les villes intensifient localement le réchauffement dû aux activités humaines. La poursuite de l'urbanisation, conjuguée à l'augmentation de la fréquence des extrêmes chauds, augmentera la sévérité des vagues de chaleur (*degré de confiance très élevé*). L'urbanisation entraîne également une augmentation des précipitations moyennes et extrêmes au-dessus et en aval des villes (*degré de confiance moyen*) ainsi qu'une intensification du ruissellement qui en résulte (*degré de confiance élevé*). Dans les villes côtières, la conjonction de l'augmentation de la fréquence des événements de niveau marin extrême (en raison de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête) et des évènements de précipitations /écoulements fluviaux extrêmes augmentera la probabilité d'occurrence d'inondations (*degré de confiance élevé*).
{8.2, encadré 10.3, 11.3, 12.4, encadré RT.14}

C.2.7 Il est projeté que de nombreuses régions subiront une augmentation de la probabilité d'événements composites avec un réchauffement planétaire plus élevé (*degré de confiance élevé*). En particulier, il est probable que la concomitance de vagues de chaleur et de sécheresses sera plus fréquente. Les évènements extrêmes se produisant simultanément en plusieurs lieux, y compris dans des zones de production agricole, deviennent plus fréquents pour 2 °C ou davantage que pour 1,5 °C de réchauffement planétaire (*degré de confiance élevé*).
{11.8, encadré 11.3, encadré 11.4, 12.3, 12.4, encadré thématique 12.1, RT.4.3} (tableau RID.1)

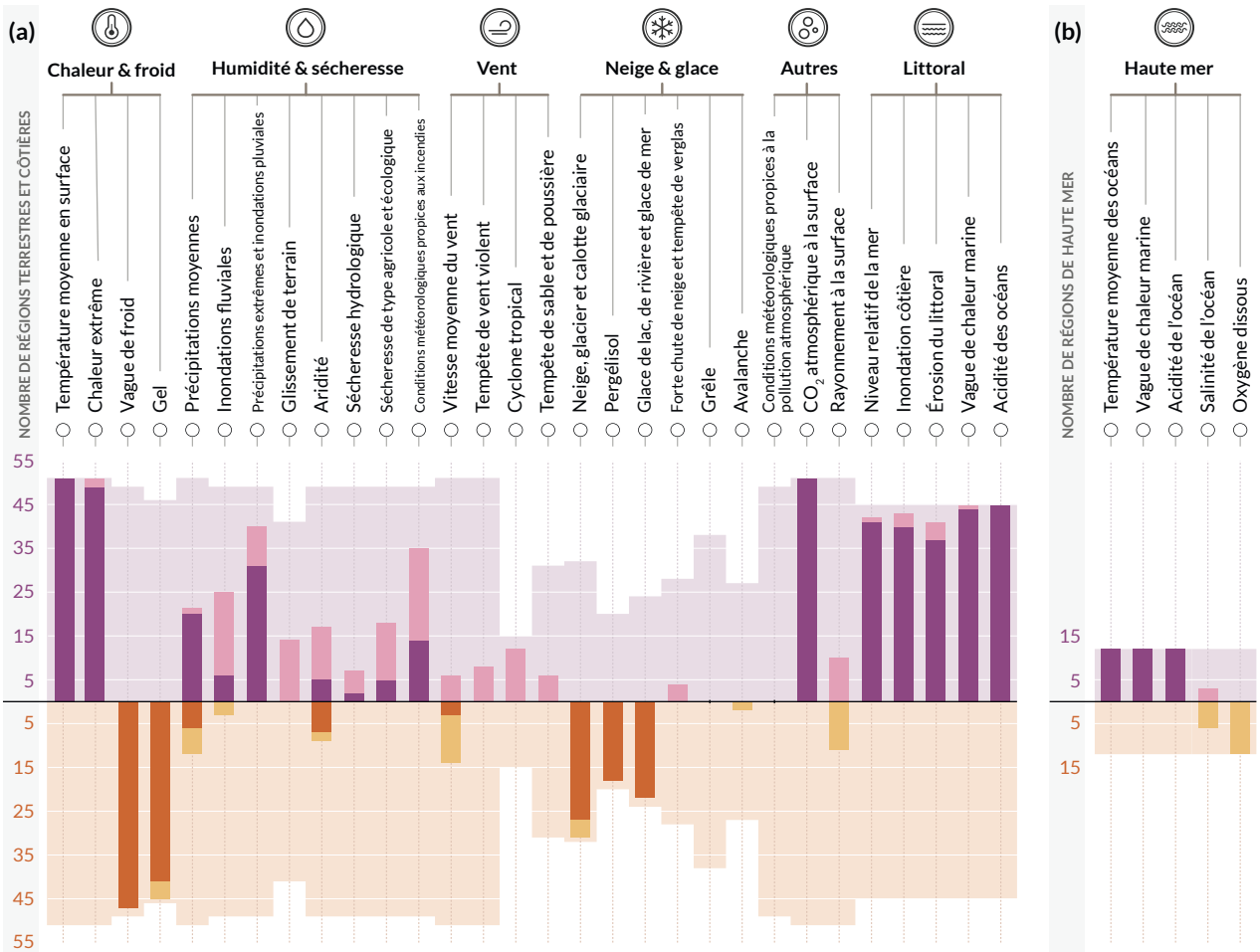
Des changements de multiples **facteurs climatiques générateurs d'impact** sont projetés **dans toutes les régions du monde**

Les **facteurs climatiques générateurs d'impact (CID)** sont des conditions physiques du système climatique (par exemple des moyennes, des évènements, des extrêmes) qui affectent la société ou les écosystèmes d'une certaine façon. Selon la tolérance du système concerné, ces facteurs et leurs changements peuvent avoir un effet préjudiciable, bénéfique, neutre ou un mélange de ces aspects sur l'ensemble des éléments de ce système et des régions qui sont en interaction. Les CID sont groupés en sept types, qui sont récapitulés sous les icônes de la figure. Il est projeté que toutes les régions subiront des changements d'au moins 5 CID. Il est projeté que presque toutes les régions (96 %) connaîtront des changements d'au moins 10 CID, et la moitié des régions seront concernées par des changements d'au moins 15 CID. Pour de nombreux CID, leurs changements sont très variables selon la zone géographique, et il est donc projeté que chaque région connaîtra une combinaison spécifique de changements de CID. Chaque barre du graphique représente une combinaison géographique spécifique de changements qui peuvent être explorés dans l'Atlas interactif du GTI.



interactive-atlas.ipcc.ch

Nombre de régions terrestres et côtières (a) et de **régions de haute mer (b)** pour lesquelles il est projeté une **augmentation** ou une **diminution** de chaque facteur climatique générateur d'impact (CID), avec un *degré de confiance* **élevé** (ombrage foncé) ou un *degré de confiance* ***moyen*** (ombrage clair).



LÉGENDE DU DIAGRAMME EN BARRES

- Régions avec une **augmentation** associée à un *degré de confiance* ***élevé***
- Régions avec une **augmentation** associée à un *degré de confiance* ***moyen***
- Régions avec une **diminution** associée à un *degré de confiance* ***élevé***
- Régions avec une **diminution** associée à un *degré de confiance* ***moyen***

LÉGENDE DE L'ENVELOPPE OMBRAGÉE CLAIRE

La hauteur de l'enveloppe claire autour de chaque barre représente le nombre maximal de régions pour lesquelles le CID est pertinent. Cette enveloppe est symétrique par rapport à l'axe des x, indiquant le nombre maximal possible de régions susceptibles de connaître une augmentation (partie supérieure) ou une diminution (partie inférieure) de ce CID.

EVALUATION DES CHANGEMENTS FUTURS

Les changements se rapportent à une période de 20 à 30 ans centrée autour de 2050 et/ou correspondant à un réchauffement planétaire de 2 °C par rapport à une période similaire entre 1960-2014 ou 1850-1900.

Figure RID.9 | Synthèse du nombre de régions de référence du GTI de l'AR6 pour lesquelles sont projetés des changements des facteurs climatiques générateurs d'impacts.

Au total, 35 facteurs climatiques générateurs d'impact (CID) regroupés en sept types sont présentés : chaleur & froid ; humidité & sécheresse ; vent ; neige & glace ; littoral ; haute mer ; autres. Pour chaque CID, la barre du diagramme ci-dessous indique le nombre de régions de référence du GTI de l'AR6 où un changement est projeté. Les **couleurs** indiquent le sens du changement et le degré de confiance associé à ce changement : le violet indique une augmentation, tandis que le brun indique une diminution. Une couleur foncée indique un *degré de confiance élevé*. Une couleur claire indique un *degré de confiance moyen*. Les plages plus claires qui entourent les barres indiquent le nombre maximum de régions concernées dans leur ensemble par chaque CID.

Le **panneau (a)** montre les 30 CID pertinents pour les **régions terrestres et côtières**, tandis que le **panneau (b)** montre les cinq CID pertinents pour les **régions de haute mer**. Les vagues de chaleur marines et l'acidité de l'océan sont évaluées pour les régions côtières dans le panneau (a) et pour les régions de haute mer dans le panneau (b). Les changements se rapportent à une période de 20 à 30 ans autour de 2050 et/ou correspondant à un réchauffement planétaire de 2 °C par rapport à

une période similaire entre les années 1960 et 2014, à l'exception des sécheresses hydrologiques et des sécheresses de type agricole et écologique, pour lesquelles les comparaisons se rapportent à la période 1850–1900. Les régions sont définies dans l'Atlas.1 et l'Atlas interactif (voir https://interactive-atlas.ipcc.ch/).
{11.9, 12.2, 12.4, Atlas.1, tableau RT.5, figures RT.22 et RT.25} (tableau RID.1)

C.3 Des éventualités à faible probabilité, telles que des effondrements de calotte glaciaire, des changements abrupts de circulation océanique, certains événements extrêmes composites ainsi qu'un réchauffement nettement supérieur à la fourchette évaluée comme *très probable* du réchauffement futur, ne peuvent être exclues et font partie de l'évaluation des risques.
{1.4, encadré thématique 1.3, 4.3, 4.4, 4.8, encadré thématique 4.1, 8.6, 9.2, encadré 9.4, 11.8, encadré 11.2, encadré thématique 12.1} (tableau RID.1)

C.3.1 Si le réchauffement planétaire est supérieur à la fourchette évaluée comme *très probable* pour un scénario d'émissions de GES donné, y compris pour les scénarios d'émissions de GES faibles, alors les changements à l'échelle mondiale comme régionale de nombreux aspects du système climatique, tels que les précipitations régionales et d'autres CID, dépasseront également leurs fourchettes évaluées comme *très probables* (*degré de confiance élevé*). De telles éventualités de fort réchauffement, à faible probabilité, sont associées à des impacts potentiellement très importants, notamment du fait de vagues de chaleur et des précipitations extrêmes plus fréquentes et plus intenses, et des risques élevés pour les systèmes humains et écologiques, en particulier pour les scénarios d'émissions élevées de GES.
{encadré thématique 1.3, 4.3, 4.4, 4.8, encadré 9.4, encadré 11.2, encadré thématique 12.1, RT.1.4, encadré RT.3, encadré RT.4} (Tableau RID.1)

C.3.2 Des éventualités à faible probabilité, mais à fort impact[34] pourraient se produire à l'échelle mondiale et régionale, même pour un réchauffement planétaire situé dans la fourchette *très probable* pour un scénario d'émissions de GES donné. La probabilité que surviennent des éventualités de faible probabilité mais à fort impact augmente avec le niveau de réchauffement planétaire (*degré de confiance élevé*). Des réponses abruptes et des points de bascule du système climatique, tels qu'une forte augmentation de la fonte de la calotte glaciaire de l'Antarctique et du dépérissement des forêts, ne peuvent être exclus (*degré de confiance élevé*).
{1.4, 4.3, 4.4, 4.8, 5.4, 8.6, encadré 9.4, encadré thématique 12.1, RT.1.4, RT.2.5, encadré RT.3, encadré RT.4, encadré RT.9} (Tableau RID.1)

C.3.3 Si le réchauffement planétaire s'accentue, certains événements extrêmes composites[18] à faible probabilité d'occurrence dans le contexte climatique passé ou actuel deviendront plus fréquents, et il y aura une plus forte probabilité que se produisent des événements d'une intensité, d'une durée, et/ou d'une étendue spatiale sans précédent dans les séries d'observations (*degré de confiance élevé*).
{11.8, encadré 11.2, encadré thématique 12.1, encadré RT.3, encadré RT.9}

C.3.4 Pour l'ensemble des scénarios d'émissions, il est *très probable* que la circulation méridienne océanique de l'Atlantique s'affaiblira au cours du 21e siècle. Si cet affaiblissement au cours du 21e siècle est caractérisé par un *degré de confiance élevé*, il n'y a qu'un *degré de confiance faible* concernant l'amplitude de cette tendance. Il y a un *degré de confiance moyen* dans le fait qu'il n'y aura pas d'effondrement abrupt de cette circulation avant 2100. Un tel effondrement, s'il devait se produire, entraînerait *très probablement* des modifications abruptes de caractéristiques régionales du climat et du cycle de l'eau, tels qu'un déplacement vers le sud de la ceinture des précipitations tropicales, un affaiblissement des moussons africaines et asiatiques, un renforcement des moussons de l'hémisphère sud et un assèchement de l'Europe.
{4.3, 8.6, 9.2, RT.2.4, encadré RT.3}

C.3.5 Des phénomènes naturels imprévisibles et rares qui ne sont pas liés à l'influence humaine sur le climat peuvent engendrer des éventualités de faible probabilité mais à fort impact. Par exemple, une succession de grandes éruptions volcaniques explosives en quelques décennies s'est produite dans le passé, provoquant d'importantes perturbations climatiques à l'échelle mondiale et régionale pendant plusieurs décennies. De tels événements ne peuvent être exclus à l'avenir, mais, en raison de leur imprévisibilité inhérente, ils ne sont pas inclus dans le jeu de scénarios illustratifs pris en compte dans ce rapport.
{2.2, encadré thématique 4.1, encadré RT.3} (encadré RID.1)

D. Limiter le changement climatique à venir

Depuis la publication de l'AR5, les estimations des budgets carbone résiduels ont été améliorées grâce à une nouvelle méthodologie, présentée pour la première fois dans le SR1.5, à des données actualisées et à l'intégration des résultats issus de multiples éléments probants. Un large éventail de niveaux possibles de contrôle de la pollution de l'air dans les scénarios est utilisé pour évaluer de manière cohérente les effets de diverses hypothèses sur les projections du climat et de la pollution atmosphérique. Un aspect novateur est la capacité à déterminer le moment où les réponses du climat à des réductions d'émissions deviendraient discernables vis-à-vis de la variabilité climatique naturelle, y compris la variabilité interne et les réponses aux facteurs naturels.

D.1 Du point de vue des sciences physiques, limiter le réchauffement planétaire d'origine humaine à un niveau donné nécessite de limiter les émissions cumulées de CO_2, en atteignant au minimum des émissions nettes de CO_2 égales à zéro , tout en réduisant fortement les émissions des autres gaz à effet de serre. Diminuer fortement, rapidement et de manière soutenue les émissions de CH_4 limiterait également l'effet de réchauffement induit par la baisse de la pollution due aux aérosols et améliorerait la qualité de l'air.
{3.3, 4.6, 5.1, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6, encadré 5.2, encadré thématique 5.1, 6.7, 7.6, 9.6} (figure RID.10, tableau RID.2)

D.1.1 Ce rapport réaffirme avec un *degré de confiance élevé* la conclusion de l'AR5 selon laquelle il existe une relation quasi-linéaire entre les émissions anthropiques cumulées de CO_2 et le réchauffement planétaire qu'elles provoquent. Il est évalué que chaque tranche de 1000 $GtCO_2$ d'émissions cumulées de CO_2 provoque une élévation *probable* de 0,27 °C à 0,63 °C de la température à la surface du globe, la meilleure estimation étant de 0,45 °C[41]. Cette fourchette est plus étroite que dans l'AR5 et le SR1.5. Cette grandeur est désignée par le terme *réponse transitoire du climat aux émissions cumulées de* CO_2 (TCRE). Cette relation implique qu'il est nécessaire d'atteindre des émissions anthropiques[42] nettes de CO_2 égales à zéro pour stabiliser l'élévation de la température planétaire d'origine humaine à quelque niveau que ce soit, mais que limiter la hausse de la température planétaire à un niveau donné impliquerait de respecter un budget carbone correspondant à une limitation des émissions cumulées de CO_2[43]. {5.4, 5.5, RT.1.3, RT.3.3, encadré RT.5} (figure RID.10)

41 Dans les publications scientifiques, les données sont présentées en utilisant des unités de degrés Celsius par pétagrammes de carbone (°C / 1000 PgC), et la fourchette *probable* de la TCRE rapportée dans l'AR6 est de 1,0 °C à 2,3 °C par 1000 PgC, la meilleure estimation étant de 1,65 °C.

42 Situation dans laquelle les émissions anthropiques de CO_2 sont compensées par les éliminations anthropiques de CO_2 sur une période donnée.

43 Le terme « budget carbone » désigne la quantité maximale d'émissions anthropiques mondiales nettes cumulées de CO_2 qui permettrait de limiter le réchauffement planétaire à un niveau donné avec une probabilité donnée, compte tenu de l'effet des autres forçages climatiques anthropiques. Cette quantité est appelée *budget carbone total* quand elle est exprimée à partir de la période préindustrielle, et *budget carbone résiduel*, quand elle est exprimée à partir d'une date récente donnée (voir le glossaire). Les émissions cumulées historiques de CO_2 ont déterminé dans une large mesure le niveau de réchauffement à ce jour, tandis que les émissions futures provoqueront un réchauffement supplémentaire à l'avenir. Le budget carbone résiduel indique la quantité de CO_2 qui pourrait encore être émise tout en maintenant le réchauffement au-dessous d'un niveau de température donné.

Chaque tonne d'émissions de CO_2 accroît le réchauffement de la planète

Augmentation de la température à la surface du globe depuis 1850–1900 (°C) en fonction des émissions cumulées de CO_2 ($GtCO_2$)

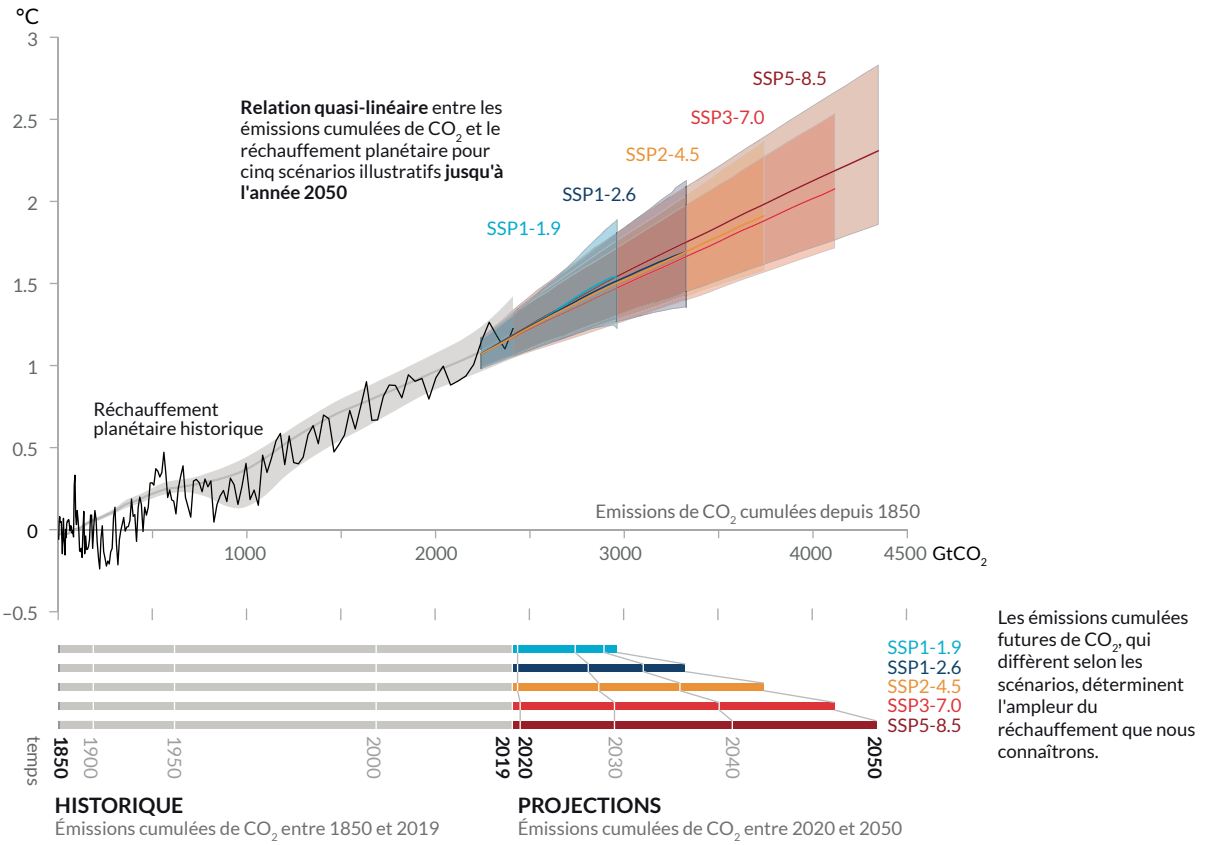


Figure RID.10 | Relation quasi-linéaire entre les émissions cumulées de CO_2 et l'augmentation de la température à la surface du globe.

Panneau supérieur : les données historiques (fine courbe noire) indiquent l'élévation observée de la température à la surface du globe (exprimée en degrés Celsius, °C) depuis 1850–1900 en fonction des émissions historiques cumulées de dioxyde de carbone (CO_2) exprimées en $GtCO_2$ entre 1850 et 2019. La plage grise autour de sa courbe centrale donne une estimation correspondante du réchauffement de surface historique dû aux activités humaines (voir figure RID 2). Les zones colorées indiquent la fourchette *très probable* des projections de température à la surface du globe et les lignes centrales colorées plus épaisses donnent l'estimation médiane en fonction des émissions cumulées de CO_2 entre 2020 et 2050 pour l'ensemble des scénarios illustratifs (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 ; voir la figure RID 4). Les projections se fondent sur les émissions cumulées de CO_2 de chaque scénario respectif, et la projection du réchauffement planétaire prend en compte l'influence de tous les forçages anthropiques. La relation est illustrée pour la gamme d'émissions cumulées de CO_2 pour laquelle la réponse transitoire du climat aux émissions cumulées de CO_2 (TCRE) restera constante avec un *degré de confiance élevé*, et pour la période entre 1850 et 2050 au cours de laquelle les émissions mondiales nettes de CO_2 restent positives dans tous les scénarios illustratifs, car l'application quantitative de la TCRE pour estimer l'évolution de la température n'est étayée que par des éléments probants limités dans le cas d'émissions nettes négatives de CO_2.

Panneau inférieur: Valeurs historiques et projections des émissions cumulées de CO_2 (exprimées en $GtCO_2$) pour les divers scénarios.

{Section 5.5, figure 5.31, figure RT.18}

D.1.2 Au cours de la période 1850–2019, un total de 2390 ± 240 (fourchette *probable*) $GtCO_2$ de CO_2 anthropique a été émis. Les budgets carbone résiduels ont été estimés pour plusieurs limites de température planétaire et divers niveaux de probabilité, à partir de la valeur estimée de la TCRE et de son incertitude, des estimations du réchauffement historique, des variations du réchauffement projeté dû aux émissions autres que le CO_2, des rétroactions du système climatique (telles que les émissions dues au dégel du pergélisol) et du changement de la température à la surface du globe après l'atteinte d'émissions anthropiques mondiales de CO_2 nettes égales à zéro.
{Sections 5.1, 5.5, encadré 5.2, RT.3.3} (Tableau RID.2)

Réchauffement planétaire entre 1850–1900 et 2010–2019 (°C)		Émissions historiques cumulées de CO_2 de 1850 à 2019 ($GtCO_2$)					
1,07 (0,8–1,3 ; fourchette *probable*)		2390 (± 240 ; fourchette *probable*)					
Réchauffement planétaire approximatif par rapport à 1850–1900 jusqu'à la limite de température (°C)[a]	Réchauffement planétaire supplémentaire par rapport à 2010–2019 jusqu'à la limite de température (°C)	Estimation des budgets carbone résiduels à partir du début de 2020 ($GtCO_2$) *Probabilité de limiter le réchauffement planétaire à la limite de température*[b]					Variations des réductions des émissions autres[c] que le CO_2
		17%	*33%*	*50%*	*67%*	*83%*	
1,5	0,43	900	650	500	400	300	Une réduction plus ou moins importante des émissions connexes autres que le CO_2 peut augmenter ou diminuer les valeurs indiquées à gauche de 220 $GtCO_2$ ou plus.
1,7	0,63	1450	1050	850	700	550	
2,0	0,93	2300	1700	1350	1150	900	

Tableau RID.2 | Estimations des émissions historiques de dioxyde de carbone (CO_2) et des budgets carbone résiduels. Les budgets carbone résiduels estimés sont calculés à partir du début de l'année 2020 et s'étendent jusqu'à ce que des émissions nettes mondiales de CO_2 égales à zéro soient atteintes. Ils font référence aux émissions de CO_2, tout en tenant compte de l'effet sur le réchauffement planétaire des émissions autres que celles de CO_2. Dans ce tableau, le réchauffement planétaire fait référence à l'augmentation de la température à la surface du globe due aux activités humaines, ce qui exclut l'effet de la variabilité naturelle sur la température à l'échelle globale au cours d'années individuelles.

{Tableau 3.1, 5.5.1, 5.5.2, encadré 5.2, tableau 5.1, tableau 5.7, tableau 5.8, tableau RT.3}

[a] Les valeurs pour chaque incrément de 0,1 °C de réchauffement sont disponibles dans les tableaux RT 3 et 5.8.

[b] Ce degré de probabilité se fonde sur l'incertitude liée à la réponse transitoire du climat aux émissions cumulées de CO_2 (TCRE) et sur les rétroactions supplémentaires du système Terre, et indique la probabilité que le réchauffement planétaire ne dépasse pas les niveaux de température indiqués dans les deux colonnes de gauche. Les incertitudes liées au réchauffement historique (± 550 $GtCO_2$), au forçage non imputable au CO_2 et à la réponse aux forçages autres que CO_2 (± 220 $GtCO_2$) sont partiellement prises en compte dans l'incertitude évaluée dans la TCRE, mais les incertitudes liées aux émissions récentes depuis 2015 (±20 $GtCO_2$) et à la réponse du climat lorsque des émissions nettes de CO_2 égales à zéro sont atteintes (±420 $GtCO_2$) sont distinctes.

[c] Les estimations du budget carbone résiduel tiennent compte du réchauffement dû aux facteurs autres que le CO_2, selon les implications des scénarios évalués dans le SR1.5. Dans sa contribution à l'AR6, le Groupe de travail 3 évaluera l'atténuation des émissions autres que le CO_2.

D.1.3 Plusieurs facteurs qui déterminent les estimations du budget carbone résiduel ont été réévalués et leurs mises à jour sont minimes depuis le SR1.5. Une fois révisées pour tenir compte des émissions enregistrées depuis les rapports précédents, les estimations des budgets carbone résiduels sont donc semblables à celles du SR1.5, mais plus importantes que celles de l'AR5 en raison des améliorations méthodologiques[44].
{5.5, encadré 5.2, RT.3.3} (tableau RID.2)

D.1.4 L'élimination anthropique de CO_2 (CDR) a le potentiel d'éliminer du CO_2 de l'atmosphère et de le stocker durablement dans des réservoirs (*degré de confiance élevé*). La CDR vise à compenser des émissions résiduelles pour atteindre des émissions nettes de CO_2 ou de GES égales à zéro ou, si elle est mise en œuvre à une échelle telle que les éliminations anthropiques dépassent les émissions anthropiques, pour abaisser la température de surface. Les méthodes de CDR peuvent avoir des effets potentiellement considérables sur les cycles biogéochimiques et le climat, ce qui peut soit affaiblir soit renforcer le potentiel de ces méthodes pour éliminer du CO_2 et amoindrir le réchauffement, et peut également affecter la disponibilité et la qualité de l'eau, la production alimentaire et la biodiversité[45] (*degré de confiance élevé*).
{5.6, encadré thématique 5.1, RT.3.3}

D.1.5 Une élimination anthropique de CO_2 (CDR, pour *« carbon dioxide removal »*) conduisant à des émissions mondiales nettes négatives abaisserait la concentration atmosphérique de CO_2 et inverserait l'acidification de l'océan de surface (*degré de confiance élevé*). Les éliminations et les émissions anthropiques de CO_2 sont partiellement compensées par respectivement des relargages ou des absorptions de CO_2 depuis ou par les réservoirs de carbone terrestres et océaniques (*degré de confiance très élevé*). La CDR diminuerait le CO_2 atmosphérique d'une quantité approximativement égale à l'augmentation due à une émission anthropique de la même ampleur (*degré de confiance élevé*). La diminution du CO_2 atmosphérique résultant d'éliminations

44 Par rapport à l'AR5, et compte tenu des émissions enregistrées depuis l'AR5, les estimations de l'AR6 sont supérieures d'environ 300 à 350 $GtCO_2$ pour le budget carbone résiduel compatible avec une limitation du réchauffement à 1,5 °C ; pour 2 °C, la différence est d'environ 400-500 $GtCO_2$.

45 Les effets négatifs et positifs potentiels du CDR pour la biodiversité, l'eau et la production alimentaire sont spécifiques à chaque méthode et dépendent souvent considérablement du contexte local, des modalités de gestion, de l'utilisation antérieure des terres et de l'échelle de mise en oeuvre. Les Groupes de travail 2 et 3 du GIEC évaluent le potentiel de CDR et les effets écologiques et socio-économiques des méthodes de CDR dans le cadre de leurs contributions à l'AR6.

anthropiques de CO_2 pourrait être jusqu'à 10 % inférieure à l'augmentation du CO_2 atmosphérique résultant d'une quantité équivalente d'émissions de CO_2, selon la quantité totale de CDR (*degré de confiance moyen*).
{5.3, 5.6, RT.3.3}

D.1.6 Si des émissions mondiales de CO_2 nettes négatives étaient atteintes et maintenues, l'augmentation de la température de surface globale induite par le CO_2 s'inverserait progressivement, mais d'autres changements climatiques se poursuivraient selon leur tendance actuelle pendant des décennies à des millénaires (*degré de confiance élevé*). Par exemple, il faudrait plusieurs siècles à millénaires pour que l'évolution du niveau moyen de la mer à l'échelle globale s'inverse, même en cas d'émissions nettes négatives de CO_2 considérables (*degré de confiance élevé*).
{4.6, 9.6, RT.3.3}

D.1.7 Dans les cinq scénarios illustratifs, les changements simultanés des émissions de CH_4 et de précurseurs d'aérosols et d'ozone, qui contribuent également à la pollution atmosphérique, entraînent un réchauffement planétaire net en surface à court et à long terme (*degré de confiance élevé*). À long terme, ce réchauffement net est moindre dans les scénarios intégrant des mesures de contrôles de la pollution de l'air combinées à une réduction forte et soutenue des émissions de CH_4 (*degré de confiance élevé*). Dans les scénarios d'émissions de GES basses ou très basses, les réductions présumées des émissions d'aérosols anthropiques entraînent un réchauffement net, tandis que les réductions des émissions de CH_4 et des autres précurseurs d'ozone induisent un refroidissement net. En raison de la courte durée de vie du CH_4 et des aérosols, leurs effets climatiques se compensent partiellement, et les réductions des émissions de CH_4 contribuent également à l'amélioration de la qualité de l'air par la baisse à l'échelle planétaire de l'ozone de surface (*degré de confiance élevé*).
{6.7, encadré RT.7} (figure RID.2, encadré RID.1)

D.1.8 Atteindre des émissions mondiales nettes de CO_2 égales à zéro, de sorte que les émissions anthropiques de CO_2 soient contrebalancées par des éliminations anthropiques de CO_2, est indispensable pour stabiliser l'élévation de la température à la surface du globe induite par le CO_2. Cela n'est pas la même chose que de ramener les émissions nettes de GES à zéro, lorsque les émissions anthropiques de GES, pondérées par une métrique, sont égales aux éliminations anthropiques de GES, pondérées par la même métrique. Pour une trajectoire d'émissions de GES donnée, les trajectoires de chaque GES déterminent la réponse du climat[46], tandis que le choix de la métrique[47] d'émissions utilisée pour calculer les émissions et les éliminations agrégées des différents GES affecte le moment auquel ce calcul des émissions nettes agrégées des GES atteint zéro. Les trajectoires d'émissions de GES qui atteignent et maintiennent une valeur nette égale à zéro définie par le potentiel de réchauffement global sur 100 ans entraînent une baisse de la température de surface après un pic antérieur (*degré de confiance élevé*).
{4.6, 7.6, encadré 7.3, RT.3.3}

D.2 Les scénarios d'émissions de GES très basses ou basses (SSP1-1.9 et SSP1-2.6) aboutissent, en quelques années, à des effets discernables sur les concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols et sur la qualité de l'air, par rapport aux scénarios d'émissions de GES élevées et très élevées (SSP3-7.0 ou SSP5-8.5). Entre ces scénarios contrastés, des différences discernables commenceraient à émerger de la variabilité naturelle sur une vingtaine d'années pour les tendances de la température à la surface du globe, et sur des périodes plus longues pour de nombreux autres facteurs climatiques générateurs d'impact (*degré de confiance élevé*).
{4.6, 6.6, 6.7, encadré thématique 6.1, 9.6, 11.2, 11.4, 11.5, 11.6, encadré thématique 11.1, 12.4, 12.5} (figure RID.8, figure RID.10)

D.2.1 En 2020, les baisses d'émissions liées aux mesures visant à limiter la propagation du COVID-19 ont eu des effets temporaires mais détectables sur la pollution atmosphérique (*degré de confiance élevé*), associés à une légère augmentation transitoire du forçage radiatif total, principalement due à la diminution du refroidissement causé par les aérosols provenant des activités humaines (*degré de confiance moyen*). Les réponses du climat à l'échelle mondiale et régionale à ce forçage transitoire ne sont toutefois pas détectables au-dessus de la variabilité naturelle (*degré de confiance élevé*). Les concentrations de CO_2 atmosphérique ont continué à augmenter en 2020, sans diminution détectable du taux de croissance du CO_2 observé (*degré de confiance moyen*)[48].
{encadré thématique 6.1, RT.3.3}

46 Terme général désignant la manière dont le système climatique répond à un forçage radiatif (voir le glossaire).

47 Le choix de la métrique d'émissions dépend des objectifs pour lesquels ces gaz ou agents de forçage sont comparés. Le présent rapport inclut les valeurs réactualisées des métriques d'émissions et évalue de nouvelles méthodes pour l'agrégation des gaz.

48 Pour les autres GES, il n'a pas été possible d'évaluer les changements détectables de leur taux de croissance atmosphérique en 2020 faute de publications scientifiques disponibles au moment de l'évaluation.

D.2.2 Réduire les émissions de GES entraîne également une amélioration de la qualité de l'air. Toutefois, à court terme[49], même dans les scénarios avec une forte réduction des GES, tels que les scénarios d'émissions de GES basses et très basses (SSP1-2.6 et SSP1-1.9), ces améliorations ne sont pas suffisantes, dans de nombreuses régions polluées, pour respecter les lignes directrices sur la qualité de l'air définies par l'Organisation mondiale de la santé (*degré de confiance élevé*). Les scénarios comprenant des réductions ciblées d'émissions de polluants atmosphériques conduisent à des améliorations plus rapides de la qualité de l'air, en quelques années, que ceux qui ne visent que la réduction des émissions de GES. Toutefois, à partir de 2040, des améliorations supplémentaires sont projetées dans les scénarios combinant les efforts de réduction de la pollution atmosphérique et et des émissions de GES, l'ampleur des effets positifs variant selon les régions (*degré de confiance élevé*).
{6.6, 6.7, encadré RT.7}

D.2.3 Les scénarios avec des émissions très basses ou basses de GES (SSP1-1.9 et SSP1-2.6) auraient des effets rapides et soutenus pour limiter le changement climatique d'origine anthropique , par rapport aux scénarios avec des émissions de GES élevées ou très élevées (SSP3-7.0 ou SSP5-8.5), mais les réponses précoces du système climatique peuvent être masquées par la variabilité naturelle. En ce qui concerne la température à la surface du globe, il est *probable* que des différences pour ses tendances sur 20 ans émergeraient à court terme entre un scénario avec très basses émissions de GES (SSP1-1.9) et un scénario de fortes ou très fortes émissions de GES (SSP3-7.0 ou SSP5-8.5). La réponse de nombreuses autres variables climatiques émergerait de la variabilité naturelle ultérieurement à différents moments au cours du 21e siècle (*degré de confiance élevé*).
{4.6, encadré thématique RT.1} (figure RID.8, figure RID.10)

D.2.4 Les scénarios avec de très basses ou basses émissions de GES (SSP1-1.9 et SSP1-2.6) entraîneraient, au-delà de 2040 pour un ensemble de CID[36], des changements bien moindres que les scénarios avec des émissions de GES élevées ou très élevées (SSP3-7.0 et SSP5-8.5). D'ici à la fin du siècle, les scénarios avec de très basses ou basses émissions de GES limiteraient fortement les changements de plusieurs CID, tels que l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes de niveau marin, des précipitations extrêmes et des inondations pluviales, et des dépassements de seuils de chaleur dangereux, tout en limitant le nombre de régions où ces dépassements surviennent, par rapport aux scénarios avec de fortes émissions de GES (*degré de confiance élevé*). Ces changements seraient également plus restreints dans le cas de scénarios de très basses émissions que dans le cas de scénarios de basses émissions, ainsi que dans le cas de scénarios d'émissions intermédiaires (SSP2-4.5) par rapport à des scénarios d'émissions élevées ou très élevées (*degré de confiance élevé*).
{9.6, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 11.6, 11.9, encadré thématique 11.1, 12.4, 12.5, RT.4.3}

49 Court terme : 2021–2040

Summary for Policymakers

SPM

Summary for Policymakers

Drafting Authors: Hans-O. Pörtner (Germany), Debra C. Roberts (South Africa), Helen Adams (UK), Carolina Adler (Switzerland/Chile/Australia), Paulina Aldunce (Chile), Elham Ali (Egypt), Rawshan Ara Begum (Malaysia/Australia/Bangladesh), Richard Betts (UK), Rachel Bezner Kerr (Canada/USA), Robbert Biesbroek (The Netherlands), Joern Birkmann (Germany), Kathryn Bowen (Australia), Edwin Castellanos (Guatemala), Guéladio Cissé (Mauritania/Switzerland/France), Andrew Constable (Australia), Wolfgang Cramer (France), David Dodman (Jamaica/UK), Siri H. Eriksen (Norway), Andreas Fischlin (Switzerland), Matthias Garschagen (Germany), Bruce Glavovic (New Zealand/South Africa), Elisabeth Gilmore (USA/Canada), Marjolijn Haasnoot (The Netherlands), Sherilee Harper (Canada), Toshihiro Hasegawa (Japan), Bronwyn Hayward (New Zealand), Yukiko Hirabayashi (Japan), Mark Howden (Australia), Kanungwe Kalaba (Zambia), Wolfgang Kiessling (Germany), Rodel Lasco (Philippines), Judy Lawrence (New Zealand), Maria Fernanda Lemos (Brazil), Robert Lempert (USA), Debora Ley (Mexico/Guatemala), Tabea Lissner (Germany), Salvador Lluch-Cota (Mexico), Sina Loeschke (Germany), Simone Lucatello (Mexico), Yong Luo (China), Brendan Mackey (Australia), Shobha Maharaj (Germany/Trinidad and Tobago), Carlos Mendez (Venezuela), Katja Mintenbeck (Germany), Vincent Möller (Germany), Mariana Moncassim Vale (Brazil), Mike D Morecroft (UK), Aditi Mukherji (India), Michelle Mycoo (Trinidad and Tobago), Tero Mustonen (Finland), Johanna Nalau (Australia/Finland), Andrew Okem (SouthAfrica/Nigeria), Jean Pierre Ometto (Brazil), Camille Parmesan (France/USA/UK), Mark Pelling (UK), Patricia Pinho (Brazil), Elvira Poloczanska (UK/Australia), Marie-Fanny Racault (UK/France), Diana Reckien (The Netherlands/Germany), Joy Pereira (Malaysia), Aromar Revi (India), Steven Rose (USA), Roberto Sanchez-Rodriguez (Mexico), E. Lisa F. Schipper (Sweden/UK), Daniela Schmidt (UK/Germany), David Schoeman (Australia), Rajib Shaw (Japan), Chandni Singh (India), William Solecki (USA), Lindsay Stringer (UK), Adelle Thomas (Bahamas), Edmond Totin (Benin), Christopher Trisos (South Africa), Maarten van Aalst (The Netherlands), David Viner (UK), Morgan Wairiu (Solomon Islands), Rachel Warren (UK), Pius Yanda (Tanzania), Zelina Zaiton Ibrahim (Malaysia)

Drafting Contributing Authors: Rita Adrian (Germany), Marlies Craig (South Africa), Frode Degvold (Norway), Kristie L. Ebi (USA), Katja Frieler (Germany), Ali Jamshed (Germany/Pakistan), Joanna McMillan (German/Australia), Reinhard Mechler (Austria), Mark New (South Africa), Nicholas P. Simpson (South Africa/Zimbabwe), Nicola Stevens (South Africa)

Visual Conception and Information Design: Andrés Alegría (Germany/Honduras), Stefanie Langsdorf (Germany)

This Summary for Policymakers should be cited as:

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.

SPM

Table of Contents

A: Introduction 5

Box SPM.1 | AR6 Common Climate Dimensions, Global Warming Levels and Reference Periods 7

B: Observed and Projected Impacts and Risks 8

Observed Impacts from Climate Change 9
Vulnerability and Exposure of Ecosystems and People 12
Risks in the near term (2021–2040) 13
Mid to Long-term Risks (2041–2100) 14
Complex, Compound and Cascading Risks 18
Impacts of Temporary Overshoot 19

C: Adaptation Measures and Enabling Conditions 20

Current Adaptation and its Benefits 20
Future Adaptation Options and their Feasibility 21
Limits to Adaptation 26
Avoiding Maladaptation 27
Enabling Conditions 27

D: Climate Resilient Development 28

Conditions for Climate Resilient Development 29
Enabling Climate Resilient Development 29
Climate Resilient Development for Natural and Human Systems 31
Achieving Climate Resilient Development 33

A: Introduction

This Summary for Policymakers (SPM) presents key findings of the Working Group II (WGII) contribution to the Sixth Assessment Report (AR6) of the IPCC[1]. The report builds on the WGII contribution to the Fifth Assessment Report (AR5) of the IPCC, three Special Reports[2], and the Working Group I (WGI) contribution to the AR6 cycle.

This report recognizes the interdependence of climate, ecosystems and biodiversity[3], and human societies (Figure SPM.1) and integrates knowledge more strongly across the natural, ecological, social and economic sciences than earlier IPCC assessments. The assessment of climate change impacts and risks as well as adaptation is set against concurrently unfolding non-climatic global trends e.g., biodiversity loss, overall unsustainable consumption of natural resources, land and ecosystem degradation, rapid urbanisation, human demographic shifts, social and economic inequalities and a pandemic.

The scientific evidence for each key finding is found in the 18 chapters of the underlying report and in the 7 cross-chapter papers as well as the integrated synthesis presented in the Technical Summary (hereafter TS) and referred to in curly brackets {}. Based on scientific understanding, key findings can be formulated as statements of fact or associated with an assessed level of confidence using the IPCC calibrated language[4]. The WGII Global to Regional Atlas (Annex I) facilitates exploration of key synthesis findings across the WGII regions.

The concept of risk is central to all three AR6 Working Groups. A risk framing and the concepts of adaptation, vulnerability, exposure, resilience, equity and justice, and transformation provide alternative, overlapping, complementary, and widely used entry points to the literature assessed in this WGII report.

Across all three AR6 working groups, **risk**[5] provides a framework for understanding the increasingly severe, interconnected and often irreversible impacts of climate change on ecosystems, biodiversity, and human systems; differing impacts across regions, sectors and communities; and how to best reduce adverse consequences for current and future generations. In the context of climate change, risk can arise from the dynamic interactions among climate-related **hazards**[6] (see Working Group I), the **exposure**[7] and **vulnerability**[8] of affected human and ecological systems. The risk that can be introduced by human responses to climate change is a new aspect considered in the risk concept. This report identifies 127 key risks[9]. {1.3, 16.5}

The vulnerability of exposed human and natural systems is a component of risk, but also, independently, an important focus in the literature. Approaches to analysing and assessing vulnerability have evolved since previous IPCC assessments. Vulnerability is widely understood to differ within communities and across societies, regions and countries, also changing through time.

Adaptation[10] plays a key role in reducing exposure and vulnerability to climate change. Adaptation in ecological systems includes autonomous adjustments through ecological and evolutionary processes. In human systems, adaptation can be anticipatory or reactive, as well as incremental

---

1 Decision IPCC/XLVI-3, The assessment covers scientific literature accepted for publication by 1 September 2021.

2 The three Special Reports are: 'Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (SR1.5)'; 'Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (SRCCL)'; 'IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)'.

3 Biodiversity: Biodiversity or biological diversity means the variability among living organisms from all sources including, among other things, terrestrial, marine and other aquatic ecosystems, and the ecological complexes of which they are part; this includes diversity within species, between species, and of ecosystems.

4 Each finding is grounded in an evaluation of underlying evidence and agreement. A level of confidence is expressed using five qualifiers: very low, low, medium, high and very high, and typeset in italics, e.g., *medium confidence*. The following terms have been used to indicate the assessed likelihood of an outcome or a result: virtually certain 99–100% probability, very likely 90–100%, likely 66–100%, as likely as not 33–66%, unlikely 0–33%, very unlikely 0–10%, exceptionally unlikely 0–1%. Assessed likelihood is typeset in italics, e.g., *very likely*. This is consistent with AR5 and the other AR6 Reports.

5 Risk is defined as the potential for adverse consequences for human or ecological systems, recognising the diversity of values and objectives associated with such systems.

6 Hazard is defined as the potential occurrence of a natural or human-induced physical event or trend that may cause loss of life, injury, or other health impacts, as well as damage and loss to property, infrastructure, livelihoods, service provision, ecosystems and environmental resources. Physical climate conditions that may be associated with hazards are assessed in Working Group I as climatic impact-drivers.

7 Exposure is defined as the presence of people; livelihoods; species or ecosystems; environmental functions, services and resources; infrastructure; or economic, social or cultural assets in places and settings that could be adversely affected.

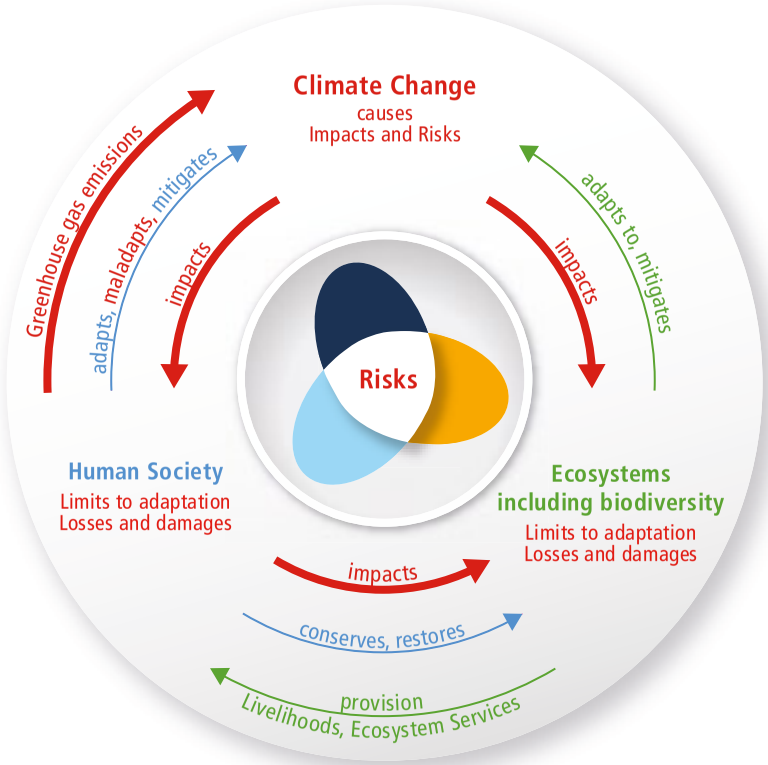
8 Vulnerability in this report is defined as the propensity or predisposition to be adversely affected and encompasses a variety of concepts and elements, including sensitivity or susceptibility to harm and lack of capacity to cope and adapt.

9 Key risks have potentially severe adverse consequences for humans and social-ecological systems resulting from the interaction of climate related hazards with vulnerabilities of societies and systems exposed.

10 Adaptation is defined, in human systems, as the process of adjustment to actual or expected climate and its effects in order to moderate harm or take advantage of beneficial opportunities. In natural systems, adaptation is the process of adjustment to actual climate and its effects; human intervention may facilitate this.

From climate risk to climate resilient development: climate, ecosystems (including biodiversity) and human society as coupled systems

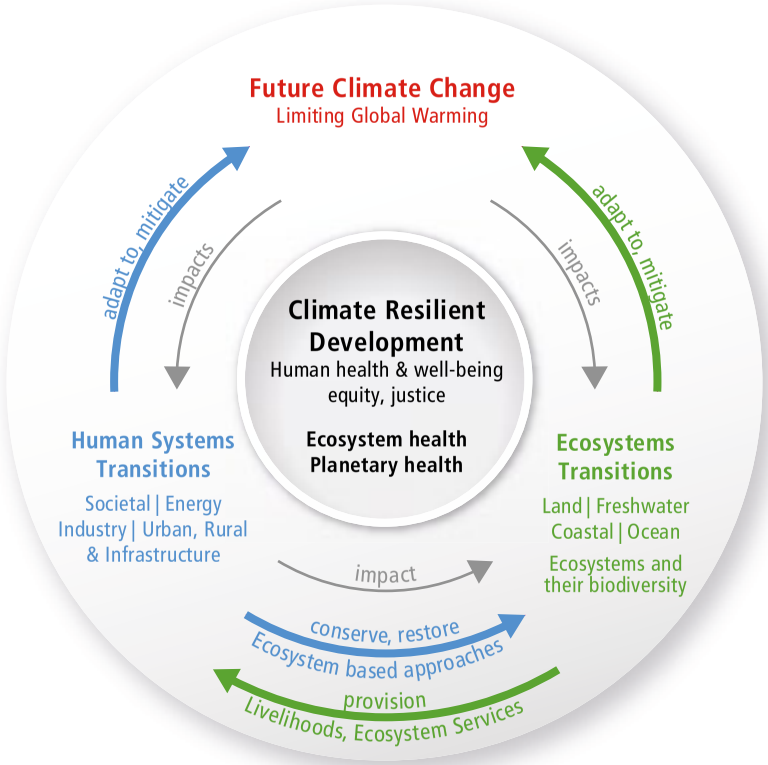
(a) Main interactions and trends



From urgent to timely action

Governance
Finance
Knowledge and capacity
Catalysing conditions
Technologies

(b) Options to reduce climate risks and establish resilience



The risk propeller shows that risk emerges from the overlap of:

Climate hazard(s)

Vulnerability

Exposure

...of human systems, ecosystems and their biodiversity

Figure SPM.1 | This report has a strong focus on the interactions among the coupled systems climate, ecosystems (including their biodiversity) and human society. These interactions are the basis of emerging risks from climate change, ecosystem degradation and biodiversity loss and, at the same time, offer opportunities for the future.

(a) Human society causes climate change. Climate change, through hazards, exposure and vulnerability generates impacts and risks that can surpass limits to adaptation and result in losses and damages. Human society can adapt to, maladapt and mitigate climate change, ecosystems can adapt and mitigate within limits. Ecosystems and their biodiversity provision livelihoods and ecosystem services. Human society impacts ecosystems and can restore and conserve them.

(b) Meeting the objectives of climate resilient development thereby supporting human, ecosystem and planetary health, as well as human well-being, requires society and ecosystems to move over (transition) to a more resilient state. The recognition of climate risks can strengthen adaptation and mitigation actions and transitions that reduce risks. Taking action is enabled by governance, finance, knowledge and capacity building, technology and catalysing conditions. Transformation entails system transitions strengthening the resilience of ecosystems and society (Section D). In a) arrow colours represent principle human society interactions **(blue)**, ecosystem (including biodiversity) interactions **(green)** and the impacts of climate change and human activities, including losses and damages, under continued climate change **(red)**. In b) arrow colours represent human system interactions **(blue)**, ecosystem (including biodiversity) interactions **(green)** and reduced impacts from climate change and human activities **(grey)**. {1.2, Figure 1.2, Figure TS. 2}

and/ or transformational. The latter changes the fundamental attributes of a social-ecological system in anticipation of climate change and its impacts. Adaptation is subject to hard and soft limits[11].

Resilience[12] in the literature has a wide range of meanings. Adaptation is often organized around resilience as bouncing back and returning to a previous state after a disturbance. More broadly the term describes not just the ability to maintain essential function, identity and structure, but also the capacity for transformation.

This report recognises the value of diverse forms of knowledge such as scientific, as well as Indigenous knowledge and local knowledge in understanding and evaluating climate adaptation processes and actions to reduce risks from human-induced climate change. AR6 highlights adaptation solutions which are effective, feasible[13], and conform to principles of justice[14]. The term climate justice, while used in different ways in different contexts by different communities, generally includes three principles: *distributive justice* which refers to the allocation of burdens and benefits among individuals, nations and generations; *procedural justice* which refers to who decides and participates in decision-making; and *recognition* which entails basic respect and robust engagement with and fair consideration of diverse cultures and perspectives.

Effectiveness refers to the extent to which an action reduces vulnerability and climate-related risk, increases resilience, and avoids maladaptation[15].

This report has a particular focus on transformation[16] and system transitions in energy; land, ocean, coastal and freshwater ecosystems; urban, rural and infrastructure; and industry and society. These transitions make possible the adaptation required for high levels of human health and well-being, economic and social resilience, ecosystem health[17], and planetary health[18] (Figure SPM.1). These system transitions are also important for achieving the low global warming levels (Working Group III) that would avoid many limits to adaptation[11]. The report also assesses economic and non-economic losses and damages[19]. This report labels the process of implementing mitigation and adaptation together in support of sustainable development for all as climate resilient development[20].

Box SPM.1 | AR6 Common Climate Dimensions, Global Warming Levels and Reference Periods

Assessments of climate risks consider possible future climate change, societal development and responses. This report assesses literature including that based on climate model simulations that are part of the fifth and sixth Coupled Model Intercomparison Project Phase (CMIP5, CMIP6) of the World Climate Research Programme. Future projections are driven by emissions and/or concentrations from illustrative Representative Concentration Pathways (RCPs)[21] and Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)[22] scenarios, respectively[23]. Climate impacts literature is based primarily on climate projections assessed in AR5 or earlier, or assumed global warming levels, though some recent impacts literature uses newer projections based on the CMIP6 exercise. Given differences in the impacts literature regarding

11 Adaptation limits: The point at which an actor's objectives (or system needs) cannot be secured from intolerable risks through adaptive actions.
Hard adaptation limit—No adaptive actions are possible to avoid intolerable risks.
Soft adaptation limit—Options may exist but are currently not available to avoid intolerable risks through adaptive action.

12 Resilience in this report is defined as the capacity of social, economic and ecosystems to cope with a hazardous event or trend or disturbance, responding or reorganising in ways that maintain their essential function, identity and structure as well as biodiversity in case of ecosystems while also maintaining the capacity for adaptation, learning and transformation. Resilience is a positive attribute when it maintains such a capacity for adaptation, learning, and/or transformation.

13 Feasibility refers to the potential for an adaptation option to be implemented.

14 Justice is concerned with setting out the moral or legal principles of fairness and equity in the way people are treated, often based on the ethics and values of society. *Social justice* comprises just or fair relations within society that seek to address the distribution of wealth, access to resources, opportunity and support according to principles of justice and fairness. *Climate justice* comprises justice that links development and human rights to achieve a rights-based approach to addressing climate change.

15 Maladaptation refers to actions that may lead to increased risk of adverse climate-related outcomes, including via increased greenhouse gas emissions, increased or shifted vulnerability to climate change, more inequitable outcomes, or diminished welfare, now or in the future. Most often, maladaptation is an unintended consequence.

16 Transformation refers to a change in the fundamental attributes of natural and human systems.

17 Ecosystem health: a metaphor used to describe the condition of an ecosystem, by analogy with human health. Note that there is no universally accepted benchmark for a healthy ecosystem. Rather, the apparent health status of an ecosystem is judged on the ecosystem's resilience to change, with details depending upon which metrics (such as species richness and abundance) are employed in judging it and which societal aspirations are driving the assessment.

18 Planetary health: a concept based on the understanding that human health and human civilisation depend on ecosystem health and the wise stewardship of ecosystems.

19 In this report, the term 'losses and damages' refers to adverse observed impacts and/or projected risks and can be economic and/or non-economic.

20 In the WGII report, climate resilient development refers to the process of implementing greenhouse gas mitigation and adaptation measures to support sustainable development for all.

21 RCP-based scenarios are referred to as RCPy, where 'y' refers to the level of radiative forcing (in watts per square meter, or W m^{-2}) resulting from the scenario in the year 2100.

22 SSP-based scenarios are referred to as SSPx-y, where 'SSPx' refers to the Shared Socioeconomic Pathway describing the socioeconomic trends underlying the scenarios, and 'y' refers to the level of radiative forcing (in watts per square meter, or W m^{-2}) resulting from the scenario in the year 2100.

23 IPCC is neutral with regard to the assumptions underlying the SSPs, which do not cover all possible scenarios. Alternative scenarios may be considered or developed.

Box SPM.1 (continued)

socioeconomic details and assumptions, WGII chapters contextualize impacts with respect to exposure, vulnerability and adaptation as appropriate for their literature, this includes assessments regarding sustainable development and climate resilient development. There are many emissions and socioeconomic pathways that are consistent with a given global warming outcome. These represent a broad range of possibilities as available in the literature assessed that affect future climate change exposure and vulnerability. Where available, WGII also assesses literature that is based on an integrative SSP-RCP framework where climate projections obtained under the RCP scenarios are analysed against the backdrop of various illustrative SSPs[22]. The WGII assessment combines multiple lines of evidence including impacts modelling driven by climate projections, observations, and process understanding. {1.2, 16.5, 18.2, CCB CLIMATE, WGI AR6 SPM.C, WGI AR6 Box SPM.1, WGI AR6 1.6, WGI AR6 12, AR5 WGI}

A common set of reference years and time periods are adopted for assessing climate change and its impacts and risks: the reference period 1850–1900 approximates pre-industrial global surface temperature, and three future reference periods cover the near-term (2021–2040), mid-term (2041–2060) and long-term (2081–2100). {CCB CLIMATE}

Common levels of global warming relative to 1850–1900 are used to contextualize and facilitate analysis, synthesis and communication of assessed past, present and future climate change impacts and risks considering multiple lines of evidence. Robust geographical patterns of many variables can be identified at a given level of global warming, common to all scenarios considered and independent of timing when the global warming level is reached. {16.5, CCB CLIMATE, WGI AR6 Box SPM.1, WGI AR6 4.2, WGI AR6 CCB11.1}

WGI assessed the increase in global surface temperature is 1.09 [0.95 to 1.20][24] °C in 2011–2020 above 1850–1900. The estimated increase in global surface temperature since AR5 is principally due to further warming since 2003–2012 (+0.19 [0.16 to 0.22] °C).[25] Considering all five illustrative scenarios assessed by WGI, there is at least a greater than 50% likelihood that global warming will reach or exceed 1.5°C in the near-term, even for the very low greenhouse gas emissions scenario[26]. { WGI AR6 SPM A1.2, WGI AR6 SPM B1.3, WGI AR6 Table SPM.1, WGI AR6 CCB 2.3}

B: Observed and Projected Impacts and Risks

Since AR5, the knowledge base on observed and projected impacts and risks generated by climate hazards, exposure and vulnerability has increased with impacts attributed to climate change and key risks identified across the report. Impacts and risks are expressed in terms of their damages, harms, economic, and non-economic losses. Risks from observed vulnerabilities and responses to climate change are highlighted. Risks are projected for the near-term (2021–2040), the mid (2041–2060) and long term (2081–2100), at different global warming levels and for pathways that overshoot 1.5°C global warming level for multiple decades[27]. Complex risks result from multiple climate hazards occurring concurrently, and from multiple risks interacting, compounding overall risk and resulting in risks transmitting through interconnected systems and across regions.

24 In the WGI report, square brackets [x to y] are used to provide the assessed *very likely* range, or 90% interval.

25 Since AR5, methodological advances and new datasets have provided a more complete spatial representation of changes in surface temperature, including in the Arctic. These and other improvements have also increased the estimate of global surface temperature change by approximately 0.1°C, but this increase does not represent additional physical warming since AR5.

26 Global warming of 1.5°C relative to 1850–1900 would be exceeded during the 21st century under the intermediate, high and very high greenhouse gas emissions scenarios considered in this report (SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5, respectively). Under the five illustrative scenarios, in the near term (2021–2040), the 1.5°C global warming level is *very likely* to be exceeded under the very high greenhouse gas emissions scenario (SSP5-8.5), *likely* to be exceeded under the intermediate and high greenhouse gas emissions scenarios (SSP2-4.5 and SSP3-7.0), *more likely than not* to be exceeded under the low greenhouse gas emissions scenario (SSP1-2.6) and *more likely than not* to be reached under the very low greenhouse gas emissions scenario (SSP1-1.9). Furthermore, for the very low greenhouse gas emissions scenario (SSP1-1.9), it is *more likely than not* that global surface temperature would decline back to below 1.5°C toward the end of the 21st century, with a temporary overshoot of no more than 0.1°C above 1.5°C global warming.

27 Overshoot: In this report, pathways that first exceed a specified global warming level (usually 1.5°C, by more than 0.1°C), and then return to or below that level again before the end of a specified period of time (e.g., before 2100). Sometimes the magnitude and likelihood of the overshoot is also characterized. The overshoot duration can vary from at least one decade up to several decades.

Observed Impacts from Climate Change

B.1 Human-induced climate change, including more frequent and intense extreme events, has caused widespread adverse impacts and related losses and damages to nature and people, beyond natural climate variability. Some development and adaptation efforts have reduced vulnerability. Across sectors and regions the most vulnerable people and systems are observed to be disproportionately affected. The rise in weather and climate extremes has led to some irreversible impacts as natural and human systems are pushed beyond their ability to adapt. (*high confidence*) (Figure SPM.2) {TS B.1, Figure TS.5, 1.3, 2.3, 2.4, 2.6, 3.3, 3.4, 3.5, 4.2, 4.3, 5.2, 5.12, 6.2, 7.2, 8.2, 9.6, 9.8, 9.10, 9.11, 10.4, 11.3, 12.3, 12.4, 13.10, 14.4, 14.5, 15.3, 16.2, CCP1.2, CCP3.2, CCP4.1, CCP5.2, CCP6.2, CCP7.2, CCP7.3, CCB DISASTER, CCB EXTREMES, CCB ILLNESS, CCB MIGRATE, CCB NATURAL, CCB SLR}

B.1.1 Widespread, pervasive impacts to ecosystems, people, settlements, and infrastructure have resulted from observed increases in the frequency and intensity of climate and weather extremes, including hot extremes on land and in the ocean, heavy precipitation events, drought and fire weather (*high confidence*). Increasingly since AR5, these observed impacts have been attributed[28] to human-induced climate change particularly through increased frequency and severity of extreme events. These include increased heat-related human mortality (*medium confidence*), warm-water coral bleaching and mortality (*high confidence*), and increased drought-related tree mortality (*high confidence*). Observed increases in areas burned by wildfires have been attributed to human-induced climate change in some regions (*medium* to *high confidence*). Adverse impacts from tropical cyclones, with related losses and damages[19], have increased due to sea level rise and the increase in heavy precipitation (*medium confidence*). Impacts in natural and human systems from slow-onset processes[29] such as ocean acidification, sea level rise or regional decreases in precipitation have also been attributed to human induced climate change (*high confidence*). {1.3, 2.3, 2.4, 2.5, 3.2, 3.4, 3.5, 3.6, 4.2, 5.2, 5.4, 5.6, 5.12, 7.2, 9.6, 9.7, 9.8, 9.11, 11.3, Box 11.1, Box 11.2, Table 11.9, 12.3, 12.4, 13.3, 13.5, 13.10, 14.2, 14.5, 15.7, 15.8, 16.2, CCP1.2, CCP2.2, Box CCP5.1, CCP7.3, CCB DISASTER, CCB EXTREME, CCB ILLNESS, WGI AR6 SPM.3, WGI AR6 9, WGI AR6 11.3–11.8, SROCC Chapter 4}

B.1.2 Climate change has caused substantial damages, and increasingly irreversible losses, in terrestrial, freshwater and coastal and open ocean marine ecosystems (*high confidence*). The extent and magnitude of climate change impacts are larger than estimated in previous assessments (*high confidence*). Widespread deterioration of ecosystem structure and function, resilience and natural adaptive capacity, as well as shifts in seasonal timing have occurred due to climate change (*high confidence*), with adverse socioeconomic consequences (*high confidence*). Approximately half of the species assessed globally have shifted polewards or, on land, also to higher elevations (*very high confidence*). Hundreds of local losses of species have been driven by increases in the magnitude of heat extremes (*high confidence*), as well as mass mortality events on land and in the ocean (*very high confidence*) and loss of kelp forests (*high confidence*). Some losses are already irreversible, such as the first species extinctions driven by climate change (*medium confidence*). Other impacts are approaching irreversibility such as the impacts of hydrological changes resulting from the retreat of glaciers, or the changes in some mountain (*medium confidence*) and Arctic ecosystems driven by permafrost thaw (*high confidence*). (Figure SPM.2a). { TS B.1, Figure TS.5, 2.3, 2.4, 3.4, 3.5, 4.2, 4.3, 4.5, 9.6, 10.4, 11.3, 12.3, 12.8, 13.3, 13.4, 13.10, 14.4, 14.5, 14.6, 15.3, 16.2, CCP1.2, CCP3.2, CCP4.1, CCP5.2, Figure CCP5.4, CCP6.1, CCP6.2, CCP7.2, CCP7.3, CCB EXTREMES, CCB ILLNESS, CCB MOVING PLATE, CCB NATURAL, CCB PALEO, CCB SLR, SROCC 2.3}

B.1.3 Climate change including increases in frequency and intensity of extremes have reduced food and water security, hindering efforts to meet Sustainable Development Goals (*high confidence*). Although overall agricultural productivity has increased, climate change has slowed this growth over the past 50 years globally (*medium confidence*), related negative impacts were mainly in mid- and low latitude regions but positive impacts occurred in some high latitude regions (*high confidence*). Ocean warming and ocean acidification have adversely affected food production from shellfish aquaculture and fisheries in some oceanic regions (*high confidence*). Increasing weather and climate extreme events have exposed millions of people to acute food insecurity[30] and reduced water security, with the largest impacts observed in many locations and/or communities in Africa, Asia, Central and South America, Small Islands and the Arctic (*high confidence*). Jointly, sudden losses of food production and access to food compounded by decreased diet diversity have increased malnutrition in many communities (*high confidence*), especially for Indigenous Peoples, small-scale food producers and low-income households (*high confidence*), with children, elderly people and pregnant women particularly impacted (*high confidence*). Roughly half of the world's population currently experience severe water scarcity for at least some part of the year due to climatic and non-climatic drivers (*medium confidence*). (Figure SPM.2b) {3.5, 4.3, 4.4, Box 4.1, 5.2, 5.4, 5.8, 5.9, 5.12, 7.1, 7.2, 9.8, 10.4, 11.3, 12.3, 13.5, 14.4, 14.5, 15.3, 16.2, CCP5.2, CCP6.2}

---

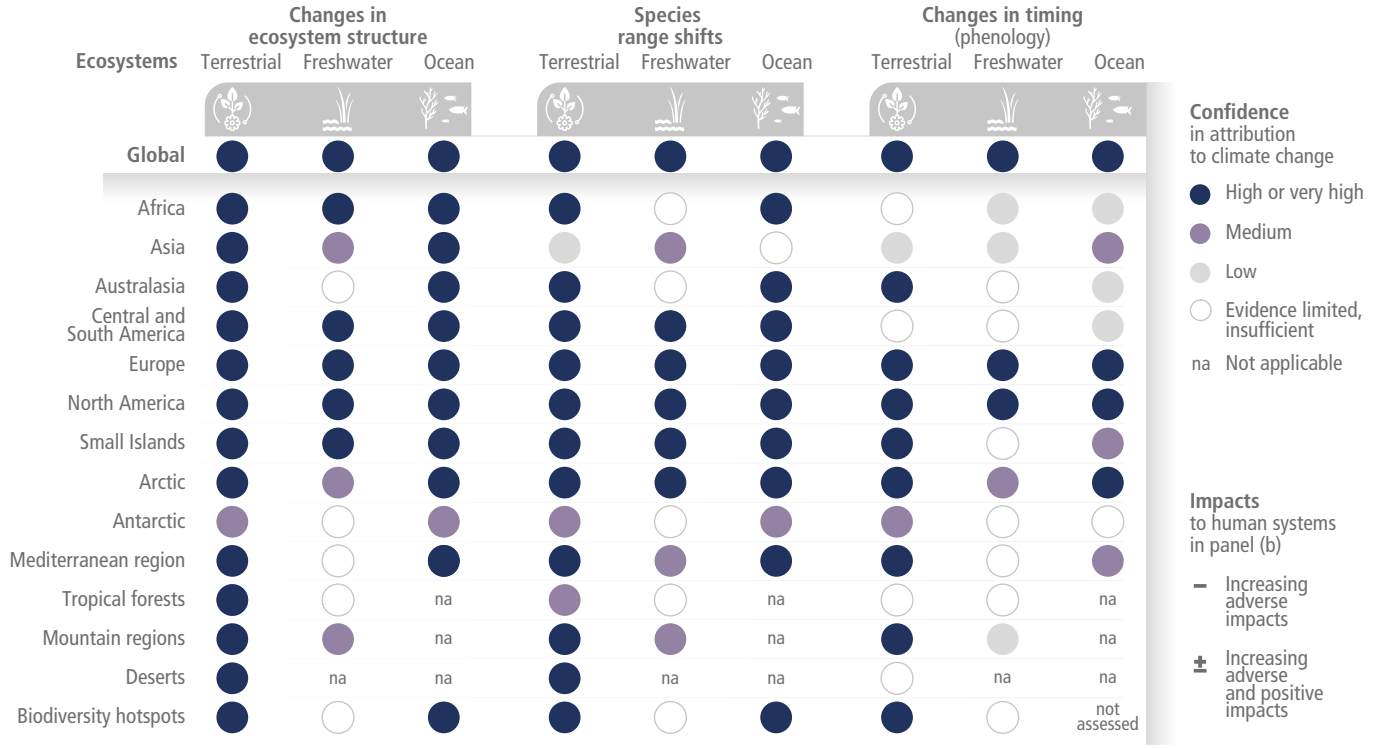
28 Attribution is defined as the process of evaluating the relative contributions of multiple causal factors to a change or event with an assessment of confidence. {Annex II Glossary, CWGB ATTRIB}

29 Impacts of climate change are caused by slow onset and extreme events. Slow onset events are described among the climatic-impact drivers of the WGI AR6 and refer to the risks and impacts associated with e.g., increasing temperature means, desertification, decreasing precipitation, loss of biodiversity, land and forest degradation, glacial retreat and related impacts, ocean acidification, sea level rise and salinization (https://interactive-atlas.ipcc.ch).

30 Acute food insecurity can occur at any time with a severity that threatens lives, livelihoods or both, regardless of the causes, context or duration, as a result of shocks risking determinants of food security and nutrition, and used to assess the need for humanitarian action.

Impacts of climate change are observed in many ecosystems and human systems worldwide

(a) Observed impacts of climate change on ecosystems



(b) Observed impacts of climate change on human systems

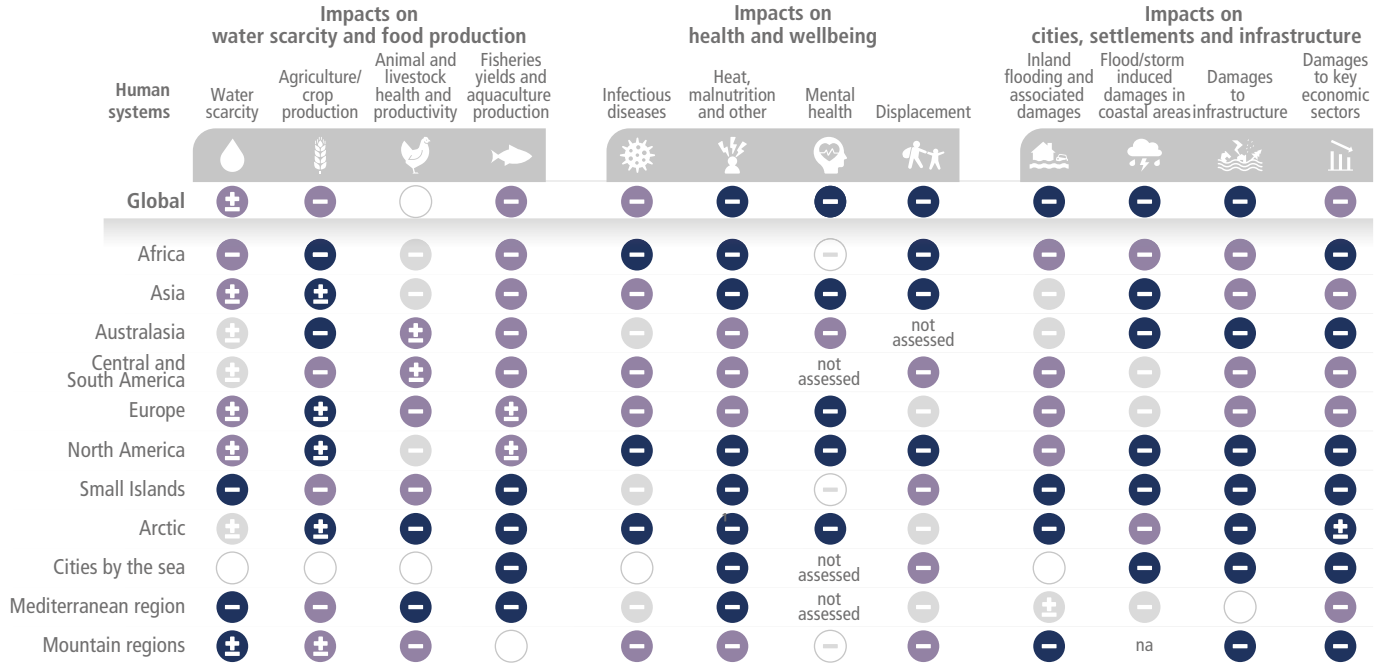


Figure SPM.2 | Observed global and regional impacts on ecosystems and human systems attributed to climate change. Confidence levels reflect uncertainty in attribution of the observed impact to climate change. Global assessments focus on large studies, multi-species, meta-analyses and large reviews. For that reason they can be assessed with higher confidence than regional studies, which may often rely on smaller studies that have more limited data. Regional assessments consider evidence on impacts across an entire region and do not focus on any country in particular.

(a) Climate change has already altered terrestrial, freshwater and ocean ecosystems at global scale, with multiple impacts evident at regional and local scales where there is sufficient literature to make an assessment. Impacts are evident on ecosystem structure, species geographic ranges and timing of seasonal life cycles (phenology) (for methodology and detailed references to chapters and cross-chapter papers see SMTS.1 and SMTS.1.1).

(b) Climate change has already had diverse adverse impacts on human systems, including on water security and food production, health and well-being, and cities, settlements and infrastructure. The + and – symbols indicate the direction of observed impacts, with a – denoting an increasing adverse impact and a ± denoting that, within a region or globally, both adverse and positive impacts have been observed (e.g., adverse impacts in one area or food item may occur with positive impacts in another area or food item). Globally, '–' denotes an overall adverse impact; 'Water scarcity' considers, e.g., water availability in general, groundwater, water quality, demand for water, drought in cities. Impacts on food production were assessed by excluding non-climatic drivers of production increases; Global assessment for agricultural production is based on the impacts on global aggregated production; 'Reduced animal and livestock health and productivity' considers, e.g., heat stress, diseases, productivity, mortality; 'Reduced fisheries yields and aquaculture production' includes marine and freshwater fisheries/production; 'Infectious diseases' include, e.g., water-borne and vector-borne diseases; 'Heat, malnutrition and other' considers, e.g., human heat-related morbidity and mortality, labour productivity, harm from wildfire, nutritional deficiencies; 'Mental health' includes impacts from extreme weather events, cumulative events, and vicarious or anticipatory events; 'Displacement' assessments refer to evidence of displacement attributable to climate and weather extremes; 'Inland flooding and associated damages' considers, e.g., river overflows, heavy rain, glacier outbursts, urban flooding; 'Flood/storm induced damages in coastal areas' include damages due to, e.g., cyclones, sea level rise, storm surges. Damages by key economic sectors are observed impacts related to an attributable mean or extreme climate hazard or directly attributed. Key economic sectors include standard classifications and sectors of importance to regions (for methodology and detailed references to chapters and cross-chapter papers see SMTS.1 and SMTS.1.2).

B.1.4 Climate change has adversely affected physical health of people globally (*very high confidence)* and mental health of people in the assessed regions (*very high confidence*). Climate change impacts on health are mediated through natural and human systems, including economic and social conditions and disruptions (*high confidence*). In all regions extreme heat events have resulted in human mortality and morbidity (*very high confidence*). The occurrence of climate-related food-borne and water-borne diseases has increased (*very high confidence*). The incidence of vector-borne diseases has increased from range expansion and/or increased reproduction of disease vectors (*high confidence*). Animal and human diseases, including zoonoses, are emerging in new areas (*high confidence*). Water and food-borne disease risks have increased regionally from climate-sensitive aquatic pathogens, including *Vibrio* spp. (*high confidence*), and from toxic substances from harmful freshwater cyanobacteria (*medium confidence*). Although diarrheal diseases have decreased globally, higher temperatures, increased rain and flooding have increased the occurrence of diarrheal diseases, including cholera (*very high confidence*) and other gastrointestinal infections (*high confidence*). In assessed regions, some mental health challenges are associated with increasing temperatures (*high confidence*), trauma from weather and climate extreme events (*very high confidence*), and loss of livelihoods and culture (*high confidence*). Increased exposure to wildfire smoke, atmospheric dust, and aeroallergens have been associated with climate-sensitive cardiovascular and respiratory distress (*high confidence*). Health services have been disrupted by extreme events such as floods (*high confidence*). {4.3, 5.12, 7.2, Box 7.3, 8.2, 8.3, Box 8.6, Figure 8.10, 9.10, Figure 9.33, Figure 9.34, 10.4, 11.3, 12.3, 13.7, 14.4, 14.5, Figure 14.8, 15.3, 16.2, CCP5.2, Table CCP5.1, CCP6.2, Figure CCP6.3, Table CCB ILLNESS.1}

B.1.5 In urban settings, observed climate change has caused impacts on human health, livelihoods and key infrastructure (*high confidence*). Multiple climate and non-climate hazards impact cities, settlements and infrastructure and sometimes coincide, magnifying damage (*high confidence*). Hot extremes including heatwaves have intensified in cities (*high confidence*), where they have also aggravated air pollution events (*medium confidence*) and limited functioning of key infrastructure (*high confidence*). Observed impacts are concentrated amongst the economically and socially marginalized urban residents, e.g., in informal settlements (*high confidence*). Infrastructure, including transportation, water, sanitation and energy systems have been compromised by extreme and slow-onset events, with resulting economic losses, disruptions of services and impacts to well-being (*high confidence*). {4.3, 6.2, 7.1, 7.2, 9.9, 10.4, 11.3, 12.3, 13.6, 14.5, 15.3, CCP2.2, CCP4.2, CCP5.2}

B.1.6 Overall adverse economic impacts attributable to climate change, including slow-onset and extreme weather events, have been increasingly identified (*medium confidence*). Some positive economic effects have been identified in regions that have benefited from lower energy demand as well as comparative advantages in agricultural markets and tourism (*high confidence*). Economic damages from climate change have been detected in climate-exposed sectors, with regional effects to agriculture, forestry, fishery, energy, and tourism (*high confidence*), and through outdoor labour productivity (*high confidence*). Some extreme weather events, such as tropical cyclones, have reduced economic growth in the short-term (*high confidence*). Non-climatic factors including some patterns of settlement, and siting of infrastructure have contributed to the exposure of more assets to extreme climate hazards increasing the magnitude of the losses (*high confidence*). Individual livelihoods have been affected through changes in agricultural productivity, impacts on human health and food security, destruction of homes and infrastructure, and loss of property and income, with adverse effects on gender and social equity (*high confidence*). {3.5, 4.2, 5.12, 6.2, 7.2, 8.2, 9.6, 10.4, 13.10, 14.5, Box 14.6, 16.2, Table 16.5, 18.3, CCP6.2, CCB GENDER, CWGB ECONOMICS}

B.1.7 Climate change is contributing to humanitarian crises where climate hazards interact with high vulnerability (*high confidence*). Climate and weather extremes are increasingly driving displacement in all regions (*high confidence*), with Small Island States disproportionately affected (*high confidence*). Flood and drought-related acute food insecurity and malnutrition have increased in Africa (*high confidence*) and Central and South America (*high confidence*). While non-climatic factors are the dominant drivers of existing intrastate violent conflicts, in some assessed regions extreme weather and climate events have had a small, adverse impact on their length, severity or frequency, but the statistical association is weak (*medium confidence*). Through displacement and involuntary migration from extreme weather and climate events, climate change has generated and perpetuated vulnerability (*medium confidence*). {4.2, 4.3, 5.4, 7.2, 9.8, Box 9.9, Box 10.4, 12.3, 12.5, 16.2, CCB DISASTER, CCB MIGRATE}

Vulnerability and Exposure of Ecosystems and People

B.2 Vulnerability of ecosystems and people to climate change differs substantially among and within regions (*very high confidence*), driven by patterns of intersecting socioeconomic development, unsustainable ocean and land use, inequity, marginalization, historical and ongoing patterns of inequity such as colonialism, and governance[31] (*high confidence*). Approximately 3.3 to 3.6 billion people live in contexts that are highly vulnerable to climate change (*high confidence*). A high proportion of species is vulnerable to climate change (*high confidence*). Human and ecosystem vulnerability are interdependent (*high confidence*). Current unsustainable development patterns are increasing exposure of ecosystems and people to climate hazards (*high confidence*). {2.3, 2.4, 3.5, 4.3, 6.2, 8.2, 8.3, 9.4, 9.7, 10.4, 12.3, 14.5, 15.3, CCP5.2, CCP6.2, CCP7.3, CCP7.4, CCB GENDER}

B.2.1 Since AR5 there is increasing evidence that degradation and destruction of ecosystems by humans increases the vulnerability of people (*high confidence*). Unsustainable land-use and land cover change, unsustainable use of natural resources, deforestation, loss of biodiversity, pollution, and their interactions, adversely affect the capacities of ecosystems, societies, communities and individuals to adapt to climate change (*high confidence*). Loss of ecosystems and their services has cascading and long-term impacts on people globally, especially for Indigenous Peoples and local communities who are directly dependent on ecosystems, to meet basic needs (*high confidence*). {2.3, 2.5, 2.6, 3.5, 3.6, 4.2, 4.3, 4.6, 5.1, 5.4, 5.5, 5.7, 5.8, 7.2, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 9.6, 10.4, 11.3, 12.2, 12.5, 13.8, 14.4, 14.5, 15.3, CCP1.2, CCP1.3, CCP2.2, CCP3, CCP4.3, CCP5.2, CCP6.2, CCP7.2, CCP7.3, CCP7.4, CCB ILLNESS, CCB MOVING PLATE, CCB SLR}

B.2.2 Non-climatic human-induced factors exacerbate current ecosystem vulnerability to climate change (*very high confidence*). Globally, and even within protected areas, unsustainable use of natural resources, habitat fragmentation, and ecosystem damage by pollutants increase ecosystem vulnerability to climate change (*high confidence*). Globally, less than 15% of the land, 21% of the freshwater and 8% of the ocean are protected areas. In most protected areas, there is insufficient stewardship to contribute to reducing damage from, or increasing resilience to, climate change (*high confidence*). {2.4, 2.5, 2.6, 3.4, 3.6, 4.2, 4.3, 5.8, 9.6, 11.3, 12.3, 13.3, 13.4, 14.5, 15.3, CCP1.2, Figure CCP1.15, CCP2.1, CCP2.2, CCP4.2, CCP5.2, CCP6.2, CCP7.2, CCP7.3, CCB NATURAL}

B.2.3 Future vulnerability of ecosystems to climate change will be strongly influenced by the past, present and future development of human society, including from overall unsustainable consumption and production, and increasing demographic pressures, as well as persistent unsustainable use and management of land, ocean, and water (*high confidence*). Projected climate change, combined with non-climatic drivers, will cause loss and degradation of much of the world's forests (*high confidence*), coral reefs and low-lying coastal wetlands (*very high confidence*). While agricultural development contributes to food security, unsustainable agricultural expansion, driven in part by unbalanced diets[32], increases ecosystem and human vulnerability and leads to competition for land and/or water resources (*high confidence*). {2.2, 2.3, 2.4, 2.6, 3.4, 3.5, 3.6, 4.3, 4.5, 5.6, 5.12, 5.13, 7.2, 12.3, 13.3, 13.4, 13.10, 14.5, CCP1.2, CCP2.2, CCP5.2, CCP6.2, CCP7.2, CCP7.3, CCB HEALTH, CCB NATURAL}

B.2.4 Regions and people with considerable development constraints have high vulnerability to climatic hazards (*high confidence*). Global hotspots of high human vulnerability are found particularly in West-, Central- and East Africa, South Asia, Central and South America, Small Island Developing States and the Arctic (*high confidence*). Vulnerability is higher in locations with poverty, governance challenges and limited access to basic services and resources, violent conflict and high levels of climate-sensitive livelihoods (e.g., smallholder farmers, pastoralists, fishing communities) (*high confidence*). Between 2010–2020, human mortality from floods, droughts and storms was 15 times higher in highly vulnerable regions, compared to regions with very low vulnerability (*high confidence*). Vulnerability at different spatial levels is exacerbated by inequity and marginalization linked to gender, ethnicity, low income or combinations thereof (*high confidence*), especially for many Indigenous Peoples and local communities (*high confidence*). Present development challenges causing high vulnerability are influenced by historical and ongoing patterns of inequity such as colonialism, especially for many Indigenous Peoples and local communities (*high confidence*). {4.2, 5.12, 6.2, 6.4, 7.1, 7.2, Box 7.1, 8.2, 8.3, Box 8.4, Figure 8.6, Box 9.1, 9.4, 9.7, 9.9, 10.3, 10.4, 10.6, 12.3, 12.5, Box 13.2, 14.4, 15.3, 15.6, 16.2, CCP6.2, CCP7.4}

B.2.5 Future human vulnerability will continue to concentrate where the capacities of local, municipal and national governments, communities and the private sector are least able to provide infrastructures and basic services (*high confidence*). Under the global trend of urbanization, human vulnerability will also concentrate in informal settlements and rapidly growing smaller settlements (*high*

31 Governance: The structures, processes and actions through which private and public actors interact to address societal goals. This includes formal and informal institutions and the associated norms, rules, laws and procedures for deciding, managing, implementing and monitoring policies and measures at any geographic or political scale, from global to local.

32 Balanced diets feature plant-based foods, such as those based on coarse grains, legumes fruits and vegetables, nuts and seeds, and animal-source foods produced in resilient, sustainable and low-greenhouse gas emissions systems, as described in SRCCL.

confidence). In rural areas vulnerability will be heightened by compounding processes including high emigration, reduced habitability and high reliance on climate-sensitive livelihoods (*high confidence*). Key infrastructure systems including sanitation, water, health, transport, communications and energy will be increasingly vulnerable if design standards do not account for changing climate conditions (*high confidence*). Vulnerability will also rapidly rise in low-lying Small Island Developing States and atolls in the context of sea level rise and in some mountain regions, already characterised by high vulnerability due to high dependence on climate-sensitive livelihoods, rising population displacement, the accelerating loss of ecosystem services and limited adaptive capacities (*high confidence*). Future exposure to climatic hazards is also increasing globally due to socioeconomic development trends including migration, growing inequality and urbanization *(high confidence*). {4.5, 5.5, 6.2, 7.2, 8.3, 9.9, 9.11, 10.3, 10.4, 12.3, 12.5, 13.6, 14.5, 15.3, 15.4, 16.5, CCP2.3, CCP4.3, CCP5.2, CCP5.3, CCP5.4, CCP6.2, CCB MIGRATE}

Risks in the near term (2021–2040)

B.3 Global warming, reaching 1.5°C in the near-term, would cause unavoidable increases in multiple climate hazards and present multiple risks to ecosystems and humans (*very high confidence*). The level of risk will depend on concurrent near-term trends in vulnerability, exposure, level of socioeconomic development and adaptation (*high confidence*). Near-term actions that limit global warming to close to 1.5°C would substantially reduce projected losses and damages related to climate change in human systems and ecosystems, compared to higher warming levels, but cannot eliminate them all (*very high confidence*). (Figure SPM.3, Box SPM.1) {16.4, 16.5, 16.6, CCP1.2, CCP5.3, CCB SLR, WGI AR6 SPM B1.3, WGI AR6 Table SPM.1}

B.3.1 Near-term warming and increased frequency, severity and duration of extreme events will place many terrestrial, freshwater, coastal and marine ecosystems at high or very high risks of biodiversity loss (*medium to very high confidence*, depending on ecosystem). Near-term risks for biodiversity loss are moderate to high in forest ecosystems (*medium confidence*), kelp and seagrass ecosystems (*high* to *very high confidence*), and high to very high in Arctic sea-ice and terrestrial ecosystems (*high confidence*) and warm-water coral reefs (*very high confidence*). Continued and accelerating sea level rise will encroach on coastal settlements and infrastructure (*high confidence*) and commit low-lying coastal ecosystems to submergence and loss (*medium confidence*). If trends in urbanisation in exposed areas continue, this will exacerbate the impacts, with more challenges where energy, water and other services are constrained (*medium confidence*). The number of people at risk from climate change and associated loss of biodiversity will progressively increase (*medium confidence*). Violent conflict and, separately, migration patterns, in the near-term will be driven by socioeconomic conditions and governance more than by climate change (*medium confidence*). (Figure SPM.3) {2.5, 3.4, 4.6, 6.2, 7.3, 8.7, 9.2, 9.9, 11.6, 12.5, 13.6, 13.10, 14.6, 15.3, 16.5, 16.6, CCP1.2, CCP2.1, CCP2.2, CCP5.3, CCP6.2, CCP6.3, CCB MIGRATE, CCB SLR}

B.3.2 In the near term, climate-associated risks to natural and human systems depend more strongly on changes in their vulnerability and exposure than on differences in climate hazards between emissions scenarios (*high confidence*). Regional differences exist, and risks are highest where species and people exist close to their upper thermal limits, along coastlines, in close association with ice or seasonal rivers (*high confidence*). Risks are also high where multiple non-climate drivers persist or where vulnerability is otherwise elevated (*high confidence*). Many of these risks are unavoidable in the near-term, irrespective of emissions scenario (*high confidence*). Several risks can be moderated with adaptation (*high confidence*). (Figure SPM.3, Section C) {2.5, 3.3, 3.4, 4.5, 6.2, 7.1, 7.3, 8.2, 11.6, 12.4, 13.6, 13.7, 13.10, 14.5, 16.4, 16.5, CCP2.2, CCP4.3, CCP5.3, CCB SLR, WGI AR6 Table SPM.1}

B.3.3 Levels of risk for all Reasons for Concern (RFC) are assessed to become high to very high at lower global warming levels than in AR5 (*high confidence*). Between 1.2°C and 4.5°C global warming level very high risks emerge in all five RFCs compared to just two RFCs in AR5 (*high confidence*). Two of these transitions from high to very high risk are associated with near-term warming: risks to unique and threatened systems at a median value of 1.5 [1.2 to 2.0] °C (*high confidence*) and risks associated with extreme weather events at a median value of 2.0 [1.8 to 2.5] °C (*medium confidence*). Some key risks contributing to the RFCs are projected to lead to widespread, pervasive, and potentially irreversible impacts at global warming levels of 1.5–2°C if exposure and vulnerability are high and adaptation is low (*medium confidence*). Near-term actions that limit global warming to close to 1.5°C would substantially reduce projected losses and damages related to climate change in human systems and ecosystems, compared to higher warming levels, but cannot eliminate them all (*very high confidence*). (Figure SPM.3b) {16.5, 16.6, CCB SLR}

Mid to Long-term Risks (2041–2100)

B.4 Beyond 2040 and depending on the level of global warming, climate change will lead to numerous risks to natural and human systems (*high confidence*). For 127 identified key risks, assessed mid- and long-term impacts are up to multiple times higher than currently observed (*high confidence*). The magnitude and rate of climate change and associated risks depend strongly on near-term mitigation and adaptation actions, and projected adverse impacts and related losses and damages escalate with every increment of global warming (*very high confidence*). (Figure SPM.3) {2.5, 3.4, 4.4, 5.2, 6.2, 7.3, 8.4, 9.2, 10.2, 11.6, 12.4, 13.2, 13.3, 13.4, 13.5, 13.6, 13.7, 13.8, 14.6, 15.3, 16.5, 16.6, CCP1.2, CCP2.2, CCP3.3, CCP4.3, CCP5.3, CCP6.3, CCP7.3}

B.4.1 Biodiversity loss and degradation, damages to and transformation of ecosystems are already key risks for every region due to past global warming and will continue to escalate with every increment of global warming (*very high confidence*). In terrestrial ecosystems, 3 to 14% of species assessed[33] will *likely* face very high risk of extinction[34] at global warming levels of 1.5°C, increasing up to 3 to 18% at 2°C, 3 to 29% at 3°C, 3 to 39% at 4°C, and 3 to 48% at 5°C. In ocean and coastal ecosystems, risk of biodiversity loss ranges between moderate and very high by 1.5°C global warming level and is moderate to very high by 2°C but with more ecosystems at high and very high risk (*high confidence*), and increases to high to very high across most ocean and coastal ecosystems by 3°C (*medium* to *high confidence*, depending on ecosystem). Very high extinction risk for endemic species in biodiversity hotspots is projected to at least double from 2% between 1.5°C and 2°C global warming levels and to increase at least tenfold if warming rises from 1.5°C to 3°C (*medium confidence*). (Figure SPM.3c, d, f) {2.4, 2.5, 3.4, 3.5,12.3, 12.5, Table 12.6, 13.4, 13.10, 16.4, 16.6, CCP1.2, Figure CCP1.6, Figure CCP1.7, CCP5.3, CCP6.3, CCB PALEO}

B.4.2 Risks in physical water availability and water-related hazards will continue to increase by the mid- to long-term in all assessed regions, with greater risk at higher global warming levels (*high confidence*). At approximately 2°C global warming, snowmelt water availability for irrigation is projected to decline in some snowmelt dependent river basins by up to 20%, and global glacier mass loss of 18 ± 13% is projected to diminish water availability for agriculture, hydropower, and human settlements in the mid- to long-term, with these changes projected to double with 4°C global warming (*medium confidence*). In Small Islands, groundwater availability is threatened by climate change (*high confidence*). Changes to streamflow magnitude, timing and associated extremes are projected to adversely impact freshwater ecosystems in many watersheds by the mid- to long-term across all assessed scenarios (*medium confidence*). Projected increases in direct flood damages are higher by 1.4 to 2 times at 2°C and 2.5 to 3.9 times at 3°C compared to 1.5°C global warming without adaptation (*medium confidence*). At global warming of 4°C, approximately 10% of the global land area is projected to face increases in both extreme high and low river flows in the same location, with implications for planning for all water use sectors (*medium confidence*). Challenges for water management will be exacerbated in the near, mid and long term, depending on the magnitude, rate and regional details of future climate change and will be particularly challenging for regions with constrained resources for water management (*high confidence*). {2.3, 4.4, 4.5, Box 4.2, Figure 4.20, 15.3, CCP5.3, CCB DISASTER, SROCC 2.3}

B.4.3 Climate change will increasingly put pressure on food production and access, especially in vulnerable regions, undermining food security and nutrition (*high confidence*). Increases in frequency, intensity and severity of droughts, floods and heatwaves, and continued sea level rise will increase risks to food security (*high confidence*) in vulnerable regions from moderate to high between 1.5°C and 2°C global warming level, with no or low levels of adaptation (*medium confidence*). At 2°C or higher global warming level in the mid-term, food security risks due to climate change will be more severe, leading to malnutrition and micro-nutrient deficiencies, concentrated in Sub-Saharan Africa, South Asia, Central and South America and Small Islands (*high confidence).* Global warming will progressively weaken soil health and ecosystem services such as pollination, increase pressure from pests and diseases, and reduce marine animal biomass, undermining food productivity in many regions on land and in the ocean (*medium confidence*). At 3°C or higher global warming level in the long term, areas exposed to climate-related hazards will expand substantially compared with 2°C or lower global warming level (*high confidence*), exacerbating regional disparity in food security risks (*high confidence*). (Figure SPM.3) {1.1, 3.3, 4.5, 5.2, 5.4, 5.5, 5.8, 5.9, 5.12, 7.3, 8.3, 9.11, 13.5, 15.3, 16.5, 16.6, CCB MOVING PLATE, CCB SLR}

33 Numbers of species assessed are in the tens of thousands globally.

34 The term 'very high risks of extinction' is used here consistently with the IUCN categories and criteria and equates with 'critically endangered'.

B.4.4 Climate change and related extreme events will significantly increase ill health and premature deaths from the near- to long-term (*high confidence*). Globally, population exposure to heatwaves will continue to increase with additional warming, with strong geographical differences in heat-related mortality without additional adaptation (*very high confidence*). Climate-sensitive food-borne, water-borne, and vector-borne disease risks are projected to increase under all levels of warming without additional adaptation (*high confidence*). In particular, dengue risk will increase with longer seasons and a wider geographic distribution in Asia, Europe, Central and South America and sub-Saharan Africa, potentially putting additional billions of people at risk by the end of the century (*high confidence*). Mental health challenges, including anxiety and stress, are expected to increase under further global warming in all assessed regions, particularly for children, adolescents, elderly, and those with underlying health conditions (*very high confidence*). {4.5, 5.12, Box 5.10, 7.3, Figure 7.9, 8.4, 9.10, Figure 9.32, Figure 9.35, 10.4, Figure 10.11, 11.3, 12.3, Figure 12.5, Figure 12.6, 13.7, Figure 13.23, Figure 13.24, 14.5, 15.3, CCP6.2}

B.4.5 Climate change risks to cities, settlements and key infrastructure will rise rapidly in the mid- and long-term with further global warming, especially in places already exposed to high temperatures, along coastlines, or with high vulnerabilities (*high confidence*). Globally, population change in low-lying cities and settlements will lead to approximately a billion people projected to be at risk from coastal-specific climate hazards in the mid-term under all scenarios, including in Small Islands (*high confidence*). The population potentially exposed to a 100-year coastal flood is projected to increase by about 20% if global mean sea level rises by 0.15 m relative to 2020 levels; this exposed population doubles at a 0.75 m rise in mean sea level and triples at 1.4 m without population change and additional adaptation (*medium confidence*). Sea level rise poses an existential threat for some Small Islands and some low-lying coasts (*medium confidence*). By 2100 the value of global assets within the future 1-in-100 year coastal floodplains is projected to be between US$7.9 and US$12.7 trillion (2011 value) under RCP4.5, rising to between US$8.8 and US$14.2 trillion under RCP8.5 (*medium confidence*). Costs for maintenance and reconstruction of urban infrastructure, including building, transportation, and energy will increase with global warming level (*medium confidence*), the associated functional disruptions are projected to be substantial particularly for cities, settlements and infrastructure located on permafrost in cold regions and on coasts (*high confidence*). {6.2, 9.9, 10.4, 13.6, 13.10, 15.3, 16.5, CCP2.1, CCP2.2, CCP5.3, CCP6.2, CCB SLR, SROCC 2.3, SROCC CCB9}

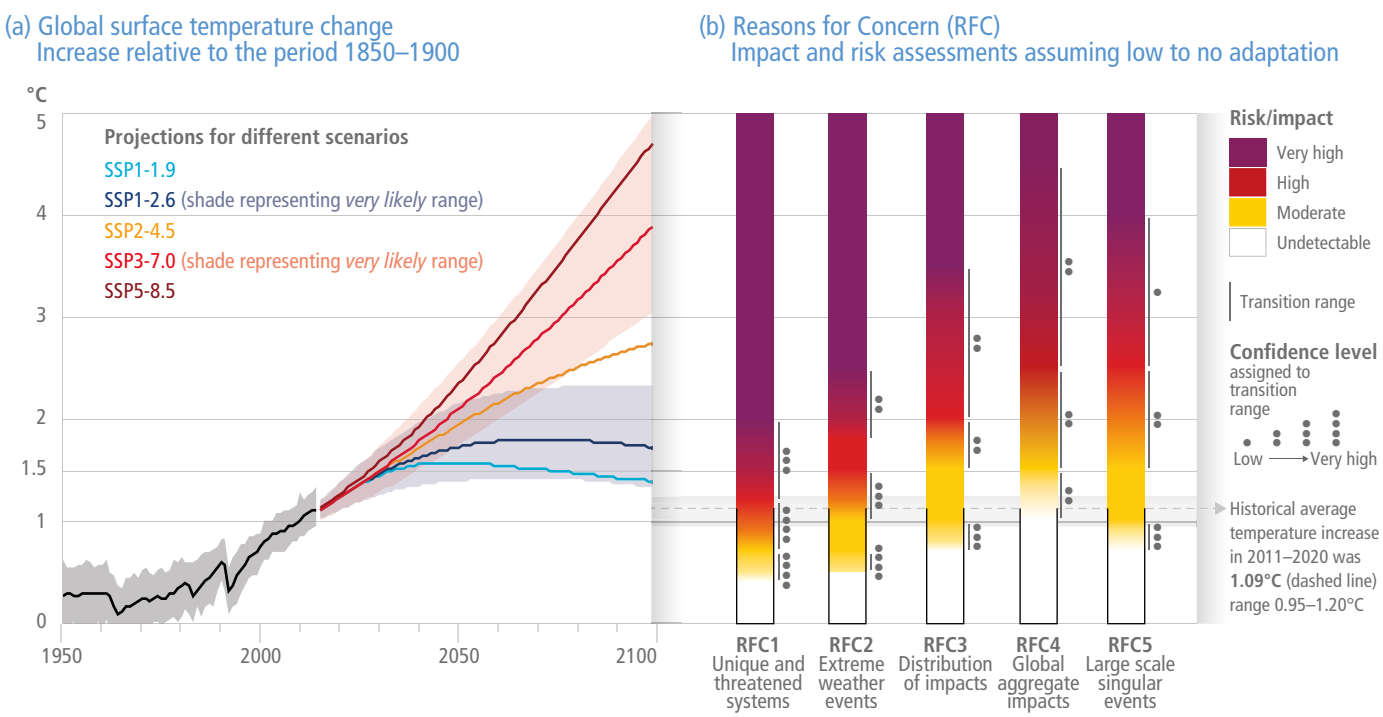
B.4.6 Projected estimates of global aggregate net economic damages generally increase non-linearly with global warming levels (*high confidence*).[35] The wide range of global estimates, and the lack of comparability between methodologies, does not allow for identification of a robust range of estimates (*high confidence*). The existence of higher estimates than assessed in AR5 indicates that global aggregate economic impacts could be higher than previous estimates (*low confidence*).[36] Significant regional variation in aggregate economic damages from climate change is projected (*high confidence*) with estimated economic damages per capita for developing countries often higher as a fraction of income (*high confidence*). Economic damages, including both those represented and those not represented in economic markets, are projected to be lower at 1.5°C than at 3°C or higher global warming levels (*high confidence*). {4.4, 9.11, 11.5, 13.10, Box 14.6, 16.5, CWGB ECONOMIC}

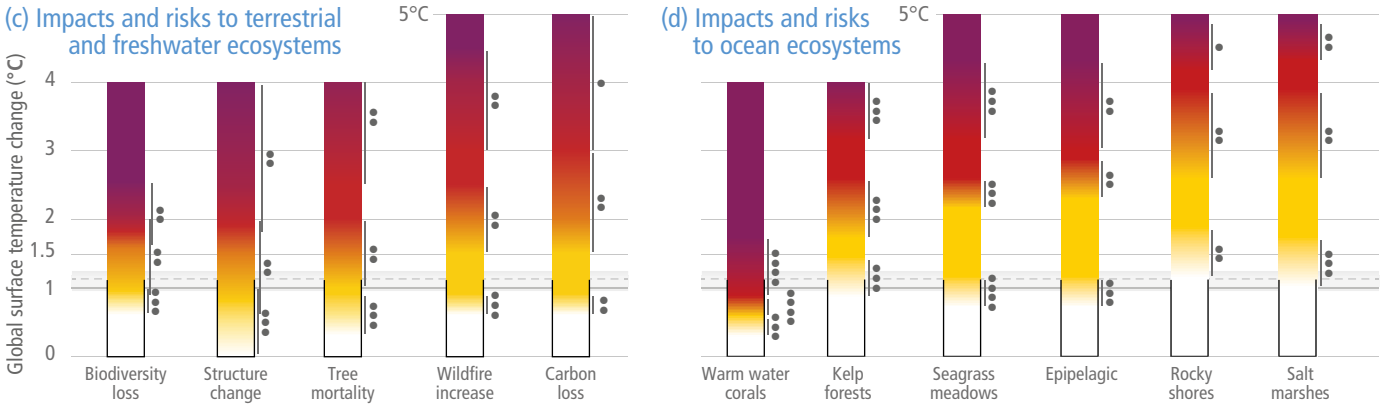
B.4.7 In the mid- to long-term, displacement will increase with intensification of heavy precipitation and associated flooding, tropical cyclones, drought and, increasingly, sea level rise (*high confidence*). At progressive levels of warming, involuntary migration from regions with high exposure and low adaptive capacity would occur (*medium confidence*). Compared to other socioeconomic factors the influence of climate on conflict is assessed as relatively weak (*high confidence*). Along long-term socioeconomic pathways that reduce non-climatic drivers, risk of violent conflict would decline (*medium confidence*). At higher global warming levels, impacts of weather and climate extremes, particularly drought, by increasing vulnerability will increasingly affect violent intrastate conflict (*medium confidence*). {TS B.7.4, 7.3, 16.5, CCB MIGRATE }

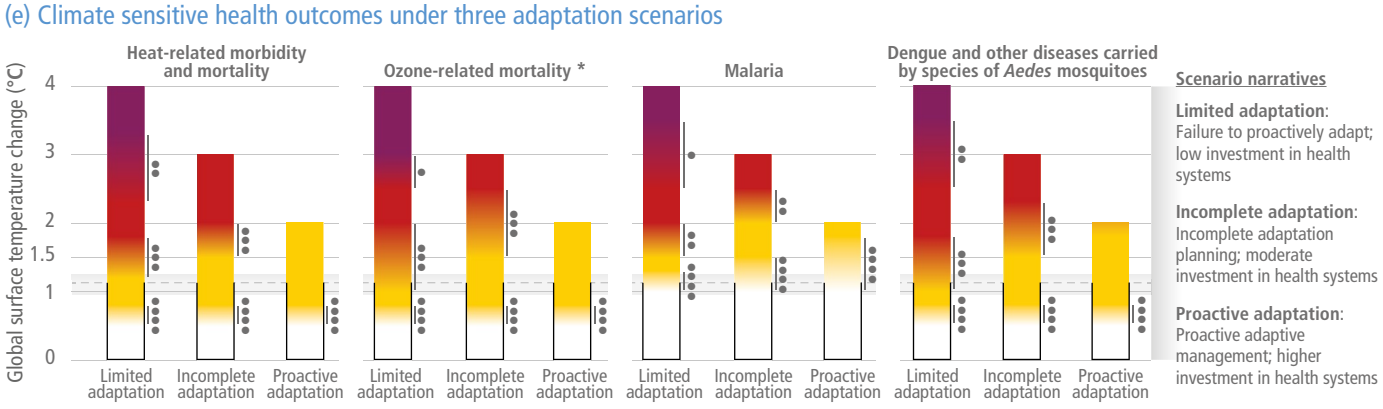
35 The assessment found estimated rates of increase in projected global economic damages that were both greater than linear and less than linear as global warming level increases. There is evidence that some regions could benefit from low levels of warming (*high confidence*). {CWGB ECONOMIC}

36 *Low confidence* assigned due to the assessed lack of comparability and robustness of global aggregate economic damage estimates. {CWGB ECONOMIC}

Global and regional risks for increasing levels of global warming







* Mortality projections include demographic trends but do not include future efforts to improve air quality that reduce ozone concentrations.

(f) Examples of regional key risks

Absence of risk diagrams does not imply absence of risks within a region. The development of synthetic diagrams for Small Islands, Asia and Central and South America was limited due to the paucity of adequately downscaled climate projections, with uncertainty in the direction of change, the diversity of climatologies and socioeconomic contexts across countries within a region, and the resulting few numbers of impact and risk projections for different warming levels.

The risks listed are of at least *medium confidence* level:

Small Islands
- Loss of terrestrial, marine and coastal biodiversity and ecosystem services
- Loss of lives and assets, risk to food security and economic disruption due to destruction of settlements and infrastructure
- Economic decline and livelihood failure of fisheries, agriculture, tourism and from biodiversity loss from traditional agroecosystems
- Reduced habitability of reef and non-reef islands leading to increased displacement
- Risk to water security in almost every small island

North America
- Climate-sensitive mental health outcomes, human mortality and morbidity due to increasing average temperature, weather and climate extremes, and compound climate hazards
- Risk of degradation of marine, coastal and terrestrial ecosystems, including loss of biodiversity, function, and protective services
- Risk to freshwater resources with consequences for ecosystems, reduced surface water availability for irrigated agriculture, other human uses, and degraded water quality
- Risk to food and nutritional security through changes in agriculture, livestock, hunting, fisheries, and aquaculture productivity and access
- Risks to well-being, livelihoods and economic activities from cascading and compounding climate hazards, including risks to coastal cities, settlements and infrastructure from sea level rise

Europe
- Risks to people, economies and infrastructures due to coastal and inland flooding
- Stress and mortality to people due to increasing temperatures and heat extremes
- Marine and terrestrial ecosystems disruptions
- Water scarcity to multiple interconnected sectors
- Losses in crop production, due to compound heat and dry conditions, and extreme weather

Central and South America
- Risk to water security
- Severe health effects due to increasing epidemics, in particular vector-borne diseases
- Coral reef ecosystems degradation due to coral bleaching
- Risk to food security due to frequent/extreme droughts
- Damages to life and infrastructure due to floods, landslides, sea level rise, storm surges and coastal erosion

Australasia
- Degradation of tropical shallow coral reefs and associated biodiversity and ecosystem service values
- Loss of human and natural systems in low-lying coastal areas due to sea level rise
- Impact on livelihoods and incomes due to decline in agricultural production
- Increase in heat-related mortality and morbidity for people and wildlife
- Loss of alpine biodiversity in Australia due to less snow

Asia
- Urban infrastructure damage and impacts on human well-being and health due to flooding, especially in coastal cities and settlements
- Biodiversity loss and habitat shifts as well as associated disruptions in dependent human systems across freshwater, land, and ocean ecosystems
- More frequent, extensive coral bleaching and subsequent coral mortality induced by ocean warming and acidification, sea level rise, marine heat waves and resource extraction
- Decline in coastal fishery resources due to sea level rise, decrease in precipitation in some parts and increase in temperature
- Risk to food and water security due to increased temperature extremes, rainfall variability and drought

Africa
- Species extinction and reduction or irreversible loss of ecosystems and their services, including freshwater, land and ocean ecosystems
- Risk to food security, risk of malnutrition (micronutrient deficiency), and loss of livelihood due to reduced food production from crops, livestock and fisheries
- Risks to marine ecosystem health and to livelihoods in coastal communities
- Increased human mortality and morbidity due to increased heat and infectious diseases (including vector-borne and diarrhoeal diseases)
- Reduced economic output and growth, and increased inequality and poverty rates
- Increased risk to water and energy security due to drought and heat

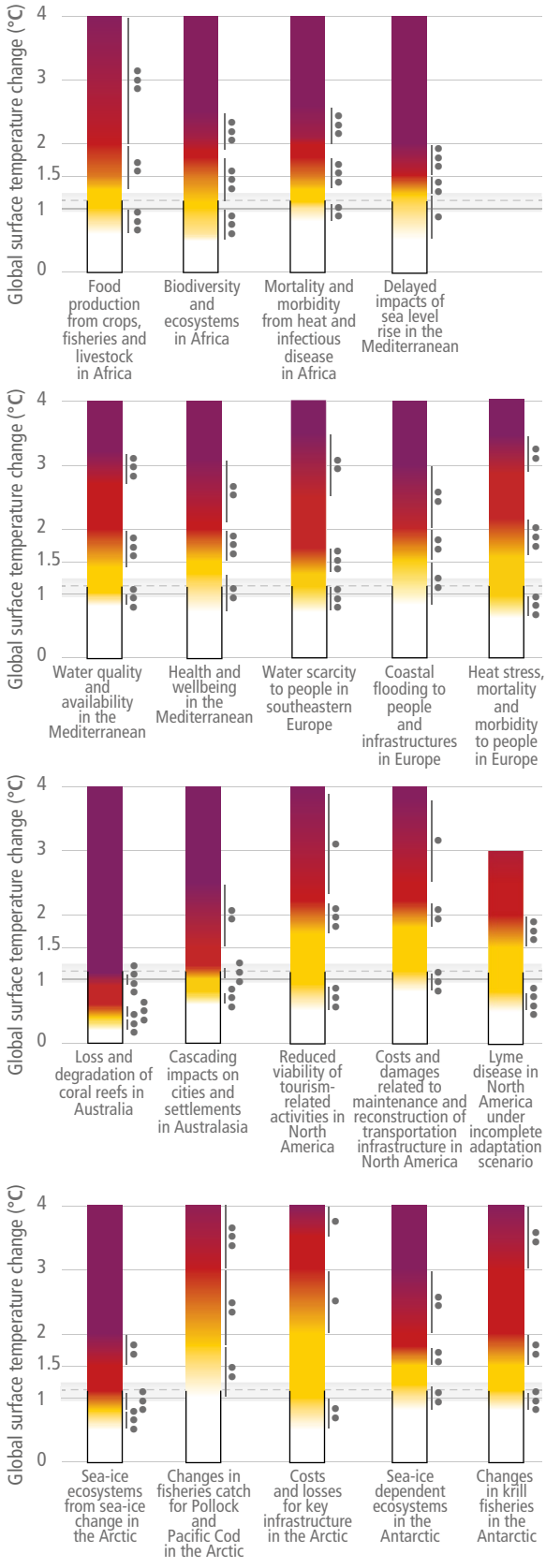


Figure SPM.3 | Synthetic diagrams of global and sectoral assessments and examples of regional key risks. Diagrams show the change in the levels of impacts and risks assessed for global warming of 0–5°C global surface temperature change relative to pre-industrial period (1850–1900) over the range.

(a) Global surface temperature changes in °C relative to 1850–1900. These changes were obtained by combining CMIP6 model simulations with observational constraints based on past simulated warming, as well as an updated assessment of equilibrium climate sensitivity (Box SPM.1). Changes relative to 1850–1900 based on 20-year averaging periods are calculated by adding 0.85°C (the observed global surface temperature increase from 1850–1900 to 1995–2014) to simulated changes relative to 1995–2014. *Very likely* ranges are shown for SSP1-2.6 and SSP3-7.0 (WGI AR6 Figure SPM.8). Assessments were carried out at the global scale for (b), (c), (d) and (e).

(b) The Reasons for Concern (RFC) framework communicates scientific understanding about accrual of risk for five broad categories. Diagrams are shown for each RFC, assuming low to no adaptation (i.e., adaptation is fragmented, localized and comprises incremental adjustments to existing practices). However, the transition to a very high risk level has an emphasis on irreversibility and adaptation limits. Undetectable risk level (white) indicates no associated impacts are detectable and attributable to climate change; moderate risk (yellow) indicates associated impacts are both detectable and attributable to climate change with at least *medium confidence*, also accounting for the other specific criteria for key risks; high risk (red) indicates severe and widespread impacts that are judged to be high on one or more criteria for assessing key risks; and very high risk level (purple) indicates very high risk of severe impacts and the presence of significant irreversibility or the persistence of climate-related hazards, combined with limited ability to adapt due to the nature of the hazard or impacts/risks. The horizontal line denotes the present global warming of 1.09°C which is used to separate the observed, past impacts below the line from the future projected risks above it. RFC1: Unique and threatened systems: ecological and human systems that have restricted geographic ranges constrained by climate-related conditions and have high endemism or other distinctive properties. Examples include coral reefs, the Arctic and its Indigenous Peoples, mountain glaciers and biodiversity hotspots. RFC2: Extreme weather events: risks/impacts to human health, livelihoods, assets and ecosystems from extreme weather events such as heatwaves, heavy rain, drought and associated wildfires, and coastal flooding. RFC3: Distribution of impacts: risks/impacts that disproportionately affect particular groups due to uneven distribution of physical climate change hazards, exposure or vulnerability. RFC4: Global aggregate impacts: impacts to socio-ecological systems that can be aggregated globally into a single metric, such as monetary damages, lives affected, species lost or ecosystem degradation at a global scale. RFC5: Large-scale singular events: relatively large, abrupt and sometimes irreversible changes in systems caused by global warming, such as ice sheet disintegration or thermohaline circulation slowing. Assessment methods are described in SM16.6 and are identical to AR5, but are enhanced by a structured approach to improve robustness and facilitate comparison between AR5 and AR6.

Risks for **(c)** terrestrial and freshwater ecosystems and **(d)** ocean ecosystems. For c) and d), diagrams shown for each risk assume low to no adaptation. The transition to a very high risk level has an emphasis on irreversibility and adaptation limits.

(e) Climate-sensitive human health outcomes under three scenarios of adaptation effectiveness. The assessed projections were based on a range of scenarios, including SRES, CMIP5, and ISIMIP, and, in some cases, demographic trends. The diagrams are truncated at the nearest whole ºC within the range of temperature change in 2100 under three SSP scenarios in panel (a).

(f) Examples of regional key risks. Risks identified are of at least *medium confidence* level. Key risks are identified based on the magnitude of adverse consequences (pervasiveness of the consequences, degree of change, irreversibility of consequences, potential for impact thresholds or tipping points, potential for cascading effects beyond system boundaries); likelihood of adverse consequences; temporal characteristics of the risk; and ability to respond to the risk, e.g., by adaptation. The full set of 127 assessed global and regional key risks is given in SM16.7. Diagrams are provided for some risks. The development of synthetic diagrams for Small Islands, Asia and Central and South America were limited by the availability of adequately downscaled climate projections, with uncertainty in the direction of change, the diversity of climatologies and socioeconomic contexts across countries within a region, and the resulting low number of impact and risk projections for different warming levels. Absence of risks diagrams does not imply absence of risks within a region. (Box SPM.1) {Figure TS.4, Figure 2.11, Figure SM3.1, Figure 7.9, Figure 9.6, Figure 11.6, Figure 13.28, 16.5, 16.6, Figure 16.15, SM16.3, SM16.4, SM16.5, SM16.6 (methodologies), SM16.7, Figure CCP4.8, Figure CCP4.10, Figure CCP6.5, WGI AR6 2, WGI AR6 SPM A.1.2, WGI AR6 Figure SPM.8}

Complex, Compound and Cascading Risks

B.5 Climate change impacts and risks are becoming increasingly complex and more difficult to manage. Multiple climate hazards will occur simultaneously, and multiple climatic and non-climatic risks will interact, resulting in compounding overall risk and risks cascading across sectors and regions. Some responses to climate change result in new impacts and risks. (*high confidence*) {1.3, 2.4, Box 2.2, Box 9.5, 11.5, 13.5, 14.6, Box 15.1, CCP1.2, CCP2.2, CCB COVID, CCB DISASTER, CCB INTEREG, CCB SRM, }

B.5.1 Concurrent and repeated climate hazards occur in all regions, increasing impacts and risks to health, ecosystems, infrastructure, livelihoods and food (*high confidence*). Multiple risks interact, generating new sources of vulnerability to climate hazards, and compounding overall risk (*high confidence*). Increasing concurrence of heat and drought events are causing crop production losses and tree mortality (*high confidence*). Above 1.5°C global warming increasing concurrent climate extremes will increase risk of simultaneous crop losses of maize in major food-producing regions, with this risk increasing further with higher global warming levels (*medium confidence*). Future sea level rise combined with storm surge and heavy rainfall will increase compound flood risks (*high confidence*). Risks to health and food production will be made more severe from the interaction of sudden food production losses from heat and drought, exacerbated by heat-induced labour productivity losses (*high confidence*). These interacting impacts will increase food prices, reduce household incomes, and lead to health risks of malnutrition and climate-related mortality with no or low levels of adaptation, especially in tropical regions (*high confidence*). Risks to food safety from climate change will further compound the risks to health by increasing food contamination of crops from mycotoxins and contamination of seafood from harmful algal blooms, mycotoxins, and chemical contaminants (*high confidence*). {Figure TS.10c, 5.2, 5.4, 5.8, 5.9, 5.11, 5.12, 7.2, 7.3, 9.8, 9.11, 10.4, 11.3, 11.5, 12.3, 13.5, 14.5, 15.3, Box 15.1, 16.6, CCP1.2, CCP6.2, , WGI AR6 SPM A.3.1, WGI AR6 SPM A.3.2, WGI AR6 SPM C.2.7}

B.5.2 Adverse impacts from climate hazards and resulting risks are cascading across sectors and regions (*high confidence*), propagating impacts along coasts and urban centres (*medium confidence*) and in mountain regions (*high confidence*). These hazards and cascading risks also trigger tipping points in sensitive ecosystems and in significantly and rapidly changing social-ecological systems impacted by ice melt, permafrost thaw and changing hydrology in polar regions (*high confidence*). Wildfires, in many regions, have affected ecosystems and species, people and their built assets, economic activity, and health (*medium to high confidence*). In cities and

settlements, climate impacts to key infrastructure are leading to losses and damages across water and food systems, and affect economic activity, with impacts extending beyond the area directly impacted by the climate hazard (*high confidence*). In Amazonia, and in some mountain regions, cascading impacts from climatic (e.g., heat) and non-climatic stressors (e.g., land use change) will result in irreversible and severe losses of ecosystem services and biodiversity at 2°C global warming level and beyond (*medium confidence*). Unavoidable sea level rise will bring cascading and compounding impacts resulting in losses of coastal ecosystems and ecosystem services, groundwater salinisation, flooding and damages to coastal infrastructure that cascade into risks to livelihoods, settlements, health, well-being, food and water security, and cultural values in the near to long-term (*high confidence*). (Figure SPM.3) {Figure TS.10, 2.5, 3.4, 3.5, Box 7.3, Box 8.7, Box 9.4, 11.5, Box 11.1, 12.3, 13.9, 14.6, 15.3, 16.5, 16.6, CCP1.2, CCP2.2, CCP5.2, CCP5.3, CCP6.2, CCP6.3, Box CCP6.1, Box CCP6.2, CCB EXTREMES, WGI AR6 Figure SPM.8d}

B.5.3 Weather and climate extremes are causing economic and societal impacts across national boundaries through supply-chains, markets, and natural resource flows, with increasing transboundary risks projected across the water, energy and food sectors (*high confidence*). Supply chains that rely on specialized commodities and key infrastructure can be disrupted by weather and climate extreme events. Climate change causes the redistribution of marine fish stocks, increasing risk of transboundary management conflicts among fisheries users, and negatively affecting equitable distribution of food provisioning services as fish stocks shift from lower to higher latitude regions, thereby increasing the need for climate-informed transboundary management and cooperation (*high confidence*). Precipitation and water availability changes increases the risk of planned infrastructure projects, such as hydropower in some regions, having reduced productivity for food and energy sectors including across countries that share river basins (*medium confidence*). {Figure TS.10e-f, 3.4, 3.5, 4.5, 5.8, 5.13, 6.2, 9.4, Box 9.5,14.5, Box 14.5, Box 14.6, CCP5.3, CCB DISASTER, CCB EXTREMES, CCB INTEREG, CCB MOVING PLATE}

B.5.4 Risks arise from some responses that are intended to reduce the risks of climate change, including risks from maladaptation and adverse side effects of some emissions reduction and carbon dioxide removal measures (*high confidence*). Deployment of afforestation of naturally unforested land, or poorly implemented bioenergy, with or without carbon capture and storage, can compound climate-related risks to biodiversity, water and food security, and livelihoods, especially if implemented at large scales, especially in regions with insecure land tenure (*high confidence*). {Box 2.2, 4.1, 4.7, 5.13, Table 5.18, Box 9.3, Box 13.2, CCB NATURAL, CWGB BIOECONOMY}

B.5.5 Solar radiation modification approaches, if they were to be implemented, introduce a widespread range of new risks to people and ecosystems, which are not well understood (*high confidence*). Solar radiation modification approaches have potential to offset warming and ameliorate some climate hazards, but substantial residual climate change or overcompensating change would occur at regional scales and seasonal timescales (*high confidence*). Large uncertainties and knowledge gaps are associated with the potential of solar radiation modification approaches to reduce climate change risks. Solar radiation modification would not stop atmospheric CO_2 concentrations from increasing or reduce resulting ocean acidification under continued anthropogenic emissions (*high confidence*). {CWGB SRM}

Impacts of Temporary Overshoot

B.6 If global warming transiently exceeds 1.5°C in the coming decades or later (overshoot)[37], then many human and natural systems will face additional severe risks, compared to remaining below 1.5°C (*high confidence*). Depending on the magnitude and duration of overshoot, some impacts will cause release of additional greenhouse gases (*medium confidence*) and some will be irreversible, even if global warming is reduced (*high confidence*). (Box SPM.1, Figure SPM.3) {2.5, 3.4, 12.3, 16.6, CCB DEEP, CCB SLR}

B.6.1 While model-based assessments of the impacts of overshoot pathways are limited, observations and current understanding of processes permit assessment of impacts from overshoot. Additional warming, e.g., above 1.5°C during an overshoot period this century, will result in irreversible impacts on certain ecosystems with low resilience, such as polar, mountain, and coastal ecosystems, impacted by ice-sheet, glacier melt, or by accelerating and higher committed sea level rise (*high confidence*).[38] Risks to human systems will increase, including those to infrastructure, low-lying coastal settlements, some ecosystem-based adaptation measures, and associated livelihoods (*high confidence*), cultural and spiritual values (*medium confidence*). Projected impacts are less severe with shorter duration and lower levels of overshoot (*medium confidence*). {2.5, 3.4, 12.3, 13.2, 16.5, 16.6, CCP1.2, CCP2.2, CCP5.3, CCP6.1, CCP6.2, CCB SLR, WGI AR6 SPM B.5, WGI AR6 SPM C.3, SROCC 2.3, SROCC 5.4}

37 In this report, overshoot pathways exceed 1.5°C global warming and then return to that level, or below, after several decades.

38 Despite limited evidence specifically on the impacts of a temporary overshoot of 1.5°C, a much broader evidence base from process understanding and the impacts of higher global warming levels allows a high confidence statement on the irreversibility of some impacts that would be incurred following such an overshoot.

B.6.2 Risk of severe impacts increase with every additional increment of global warming during overshoot (*high confidence*). In high-carbon ecosystems (currently storing 3,000 to 4,000 GtC)[39] such impacts are already observed and are projected to increase with every additional increment of global warming, such as increased wildfires, mass mortality of trees, drying of peatlands, and thawing of permafrost, weakening natural land carbon sinks and increasing releases of greenhouse gases (*medium confidence*). The resulting contribution to a potential amplification of global warming indicates that a return to a given global warming level or below would be more challenging (*medium confidence*). {2.4, 2.5, CCP4.2, WGI AR6 SPM B.4.3, SROCC 5.4}

C: Adaptation Measures and Enabling Conditions

Adaptation, in response to current climate change, is reducing climate risks and vulnerability mostly via adjustment of existing systems. Many adaptation options exist and are used to help manage projected climate change impacts, but their implementation depends upon the capacity and effectiveness of governance and decision-making processes. These and other enabling conditions can also support climate resilient development (Section D).

Current Adaptation and its Benefits

C.1 Progress in adaptation planning and implementation has been observed across all sectors and regions, generating multiple benefits (*very high confidence*). However, adaptation progress is unevenly distributed with observed adaptation gaps[40] (*high confidence*). Many initiatives prioritize immediate and near-term climate risk reduction which reduces the opportunity for transformational adaptation (*high confidence*). {2.6, 5.14, 7.4, 10.4, 12.5, 13.11, 14.7, 16.3, 17.3, CCP5.2, CCP5.4}

C.1.1 Adaptation planning and implementation have continued to increase across all regions (*very high confidence*). Growing public and political awareness of climate impacts and risks has resulted in at least 170 countries and many cities including adaptation in their climate policies and planning processes (*high confidence*). Decision support tools and climate services are increasingly being used (*very high confidence*). Pilot projects and local experiments are being implemented in different sectors (*high confidence*). Adaptation can generate multiple additional benefits such as improving agricultural productivity, innovation, health and well-being, food security, livelihood, and biodiversity conservation as well as reduction of risks and damages (*very high confidence*). {1.4, 2.6, 3.5, 3.6, 4.7, 4.8, 5.4, 5.6, 5.10, 6.4, 7.4, 8.5, 9.3, 9.6, 10.4, 12.5, 13.11, 15.5, 16.3, 17.2, 17.3, 17.5, CCP5.4, CCB ADAPT, CCB NATURAL}

C.1.2 Despite progress, adaptation gaps exist between current levels of adaptation and levels needed to respond to impacts and reduce climate risks (*high confidence*). Most observed adaptation is fragmented, small in scale, incremental, sector-specific, designed to respond to current impacts or near-term risks, and focused more on planning rather than implementation (*high confidence*). Observed adaptation is unequally distributed across regions *(high confidence)*, and gaps are partially driven by widening disparities between the estimated costs of adaptation and documented finance allocated to adaptation (*high confidence*). The largest adaptation gaps exist among lower income population groups (*high confidence*). At current rates of adaptation planning and implementation the adaptation gap will continue to grow (*high confidence*). As adaptation options often have long implementation times, long-term planning and accelerated implementation, particularly in the next decade, is important to close adaptation gaps, recognising that constraints remain for some regions (*high confidence*). {1.1, 1.4, 5.6, 6.3, Figure 6.4, 7.4, 8.3, 10.4, 11.3, 11.7, 13.11, Box 13.1, 15.2, 15.5, 16.3, 16.5, Box 16.1, Figure 16.4, Figure 16.5, 17.4, 18.2, CCP2.4, CCP5.4, CCB FINANCE, CCB SLR}

39 At the global scale, terrestrial ecosystems currently remove more carbon from the atmosphere (-3.4 ± 0.9 Gt yr^{-1}) than they emit (+1.6 ± 0.7 Gt yr^{-1}), a net sink of -1.9 ± 1.1 Gt yr^{-1}. However, recent climate change has shifted some systems in some regions from being net carbon sinks to net carbon sources.

40 Adaptation gaps are defined as the difference between actually implemented adaptation and a societally set goal, determined largely by preferences related to tolerated climate change impacts and reflecting resource limitations and competing priorities.

Future Adaptation Options and their Feasibility

C.2 There are feasible[41] and effective[42] adaptation options which can reduce risks to people and nature. The feasibility of implementing adaptation options in the near-term differs across sectors and regions (*very high confidence*). The effectiveness of adaptation to reduce climate risk is documented for specific contexts, sectors and regions (*high confidence*) and will decrease with increasing warming (*high confidence*). Integrated, multi-sectoral solutions that address social inequities, differentiate responses based on climate risk and cut across systems, increase the feasibility and effectiveness of adaptation in multiple sectors (*high confidence*). (Figure SPM.4) {Figure TS.6e, 1.4, 3.6, 4.7, 5.12, 6.3, 7.4, 11.3, 11.7, 13.2, 15.5, 17.6, CCP2.3, CCB FEASIB}

Land, Ocean and Ecosystems Transition

C.2.1 Adaptation to water-related risks and impacts make up the majority of all documented adaptation (*high confidence*). For inland flooding, combinations of non-structural measures like early warning systems and structural measures like levees have reduced loss of lives (*medium confidence*). Enhancing natural water retention such as by restoring wetlands and rivers, land use planning such as no build zones or upstream forest management, can further reduce flood risk (*medium confidence*). On-farm water management, water storage, soil moisture conservation and irrigation are some of the most common adaptation responses and provide economic, institutional or ecological benefits and reduce vulnerability (*high confidence*). Irrigation is effective in reducing drought risk and climate impacts in many regions and has several livelihood benefits, but needs appropriate management to avoid potential adverse outcomes, which can include accelerated depletion of groundwater and other water sources and increased soil salinization (*medium confidence*). Large scale irrigation can also alter local to regional temperature and precipitation patterns (*high confidence*), including both alleviating and exacerbating temperature extremes (*medium confidence*). The effectiveness of most water-related adaptation options to reduce projected risks declines with increasing warming (*high confidence*). {4.1, 4.6, 4.7, Box 4.3, Box 4.6, Box 4.7, Figure 4.22, Figure 4.28, Figure 4.29, Table 4.9, 9.3, 9.7, 11.3, 12.5, 13.1, 13.2, 16.3, CCP5.4}

C.2.2 Effective adaptation options, together with supportive public policies enhance food availability and stability and reduce climate risk for food systems while increasing their sustainability (*medium confidence*). Effective options include cultivar improvements, agroforestry, community-based adaptation, farm and landscape diversification, and urban agriculture (*high confidence*). Institutional feasibility, adaptation limits of crops and cost effectiveness also influence the effectiveness of the adaptation options (*limited evidence*, *medium agreement*). Agroecological principles and practices, ecosystem-based management in fisheries and aquaculture, and other approaches that work with natural processes support food security, nutrition, health and well-being, livelihoods and biodiversity, sustainability and ecosystem services (*high confidence*). These services include pest control, pollination, buffering of temperature extremes, and carbon sequestration and storage (*high confidence*). Trade-offs and barriers associated with such approaches include costs of establishment, access to inputs and viable markets, new knowledge and management (*high confidence*) and their potential effectiveness varies by socioeconomic context, ecosystem zone, species combinations and institutional support (*medium confidence*). Integrated, multi-sectoral solutions that address social inequities and differentiate responses based on climate risk and local situation will enhance food security and nutrition (*high confidence*). Adaptation strategies which reduce food loss and waste or support balanced diets[33] (as described in the IPCC Special Report on Climate Change and Land) contribute to nutrition, health, biodiversity and other environmental benefits (*high confidence*). {3.2, 4.7, 4.6, Box 4.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, Box 5.10, Box 5.13, 6.3, 7.4, 10.4, 12.5, 13.5, 13.10, 14.5, CCP5.4, CCB FEASIB, CCB HEALTH, CCB MOVING PLATE, CCB NATURAL, CWGB BIOECONOMY}

C.2.3 Adaptation for natural forests[43] includes conservation, protection and restoration measures. In managed forests[43], adaptation options include sustainable forest management, diversifying and adjusting tree species compositions to build resilience, and managing increased risks from pests and diseases and wildfires. Restoring natural forests and drained peatlands and improving sustainability of managed forests, generally enhances the resilience of carbon stocks and sinks. Cooperation, and inclusive decision making, with local communities and Indigenous Peoples, as well as recognition of inherent rights of Indigenous Peoples, is integral to successful forest adaptation in many areas. (*high confidence*) {2.6, Box 2.2, 5.6, 5.13, Table 5.23, 11.4, 12.5, 13.5, Box 14.1, Box 14.2, CCP7.5, Box CCP7.1, CCB FEASIB, CCB INDIG, CCB NATURAL}

---

41 In this report, feasibility refers to the potential for a mitigation or adaptation option to be implemented. Factors influencing feasibility are context-dependent, temporally dynamic, and may vary between different groups and actors. Feasibility depends on geophysical, environmental-ecological, technological, economic, socio-cultural and institutional factors that enable or constrain the implementation of an option. The feasibility of options may change when different options are combined and increase when enabling conditions are strengthened.

42 Effectiveness refers to the extent to which an adaptation option is anticipated or observed to reduce climate-related risk.

43 In this report, the term natural forests describes those which are subject to little or no direct human intervention, whereas the term managed forests describes those where planting or other management activities take place, including those managed for commodity production.

(a) Diverse feasible climate responses and adaptation options exist to respond to Representative Key Risks of climate change, with varying synergies with mitigation

Multidimensional feasibility and synergies with mitigation of climate responses and adaptation options relevant in the near-term, at global scale and up to 1.5°C of global warming

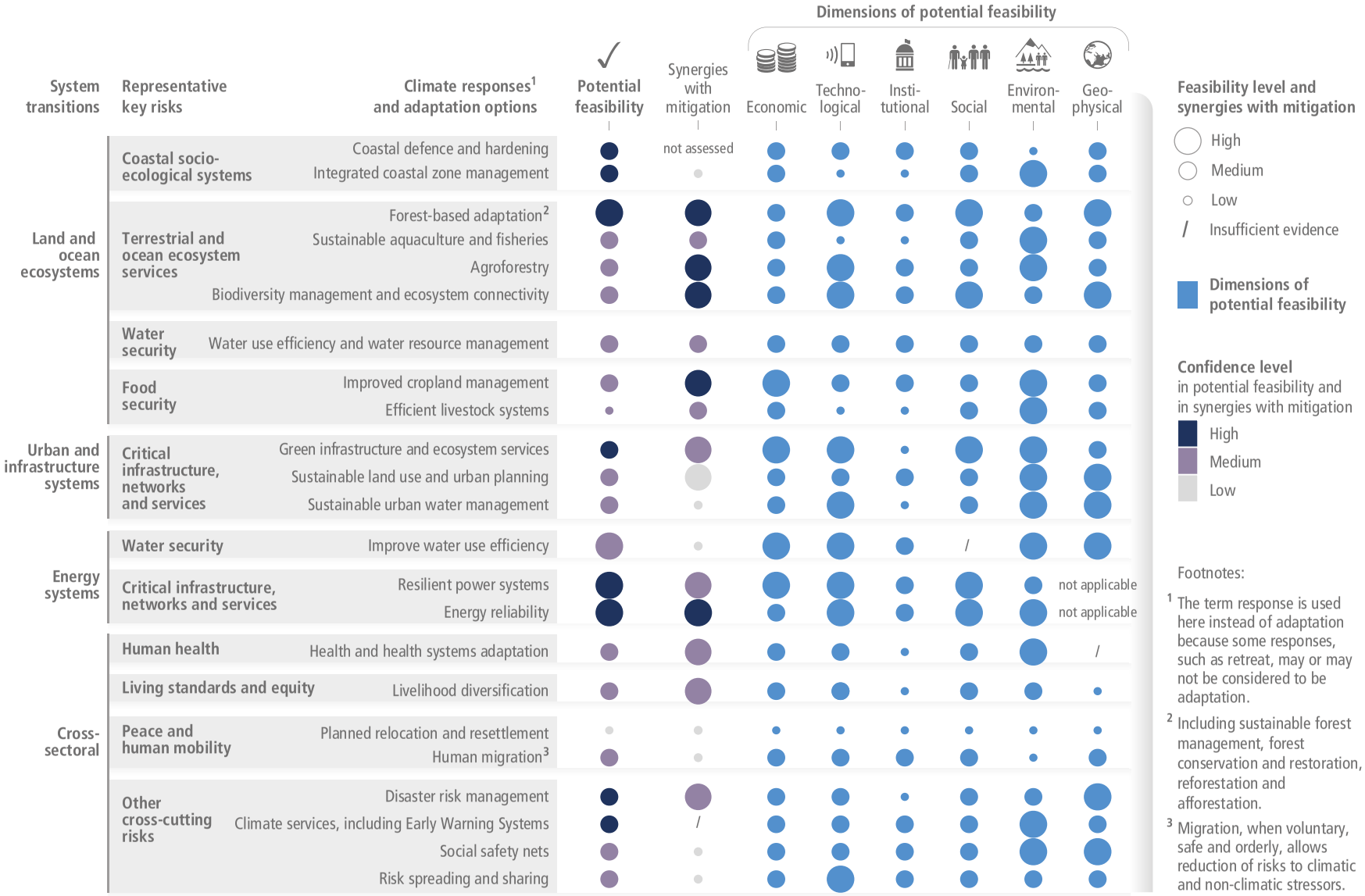


Figure SPM.4 | (a) Climate responses and adaptation options, organized by System Transitions and Representative Key Risks (RKRs), are assessed for their multidimensional feasibility at global scale, in the near term and up to 1.5°C global warming. As literature above 1.5°C is limited, feasibility at higher levels of warming may change, which is currently not possible to assess robustly. Climate responses and adaptation options at global scale are drawn from a set of options assessed in AR6 that have robust evidence across the feasibility dimensions. This figure shows the six feasibility dimensions (economic, technological, institutional, social, environmental and geophysical) that are used to calculate the potential feasibility of climate responses and adaptation options, along with their synergies with mitigation. For potential feasibility and feasibility dimensions, the figure shows high, medium, or low feasibility. Synergies with mitigation are identified as high, medium, and low. Insufficient evidence is denoted by a dash. {CCB FEASIB, Table SMCCB FEASIB.1.1, SR1.5 4.SM.4.3}

(b) Climate responses and adaptation options have benefits for ecosystems, ethnic groups, gender equity, low-income groups and the Sustainable Development Goals

Relations of sectors and groups at risk (as observed) and the SDGs (relevant in the near-term, at global scale and up to 1.5°C of global warming) with climate responses and adaptation options



Footnotes: [1] The term response is used here instead of adaptation because some responses, such as retreat, may or may not be considered to be adaptation. [2] Including sustainable forest management, forest conservation and restoration, reforestation and afforestation. [3] Migration, when voluntary, safe and orderly, allows reduction of risks to climatic and non-climatic stressors. [4] The Sustainable Development Goals (SDGs) are integrated and indivisible, and efforts to achieve any goal in isolation may trigger synergies or trade-offs with other SDGs. [5] Relevant in the near-term, at global scale and up to 1.5°C of global warming.

Figure SPM.4 | (b) Climate responses and adaptation options, organized by System Transitions and Representative Key Risks, are assessed at global scale for their likely ability to reduce risks for ecosystems and social groups at risk, as well as their relation with the 17 Sustainable Development Goals (SDGs). Climate responses and adaptation options are assessed for observed benefits (+) to ecosystems and their services, ethnic groups, gender equity, and low-income groups, or observed dis-benefits (-) for these systems and groups. Where there is highly diverging evidence of benefits/ dis-benefits across the scientific literature, e.g., based on differences between regions, it is shown as not clear or mixed (•). Insufficient evidence is shown by a dash. The relation with the SDGs is assessed as having benefits (+), dis-benefits (-) or not clear or mixed (•) based on the impacts of the climate response and adaptation option on each SDG. Areas not coloured indicate there is no evidence of a relation or no interaction with the respective SDG. The climate responses and adaptation options are drawn from two assessments. For comparability of climate responses and adaptation options see Table SM17.5. {17.2, 17.5, CCB FEASIB}

C.2.4 Conservation, protection and restoration of terrestrial, freshwater, coastal and ocean ecosystems, together with targeted management to adapt to unavoidable impacts of climate change, reduces the vulnerability of biodiversity to climate change (*high confidence*). The resilience of species, biological communities and ecosystem processes increases with size of natural area, by restoration of degraded areas and by reducing non-climatic stressors (*high confidence*). To be effective, conservation and restoration actions will increasingly need to be responsive, as appropriate, to ongoing changes at various scales, and plan for future changes in ecosystem structure, community composition and species' distributions, especially as 1.5°C global warming is approached and even more so if it is exceeded (*high confidence*). Adaptation options, where circumstances allow, include facilitating the movement of species to new ecologically appropriate locations, particularly through increasing connectivity between conserved or protected areas, targeted intensive management for vulnerable species and protecting refugial areas where species can survive locally (*medium confidence*). {2.3, 2,6, Figure 2.1, Table 2.6, 3.3, 3.6, Box 3.4, 4.6, Box 4.6, Box 11.2, 12.3, 12.5, 13.4, 14.7, CCP5.4, CCB FEASIB}

C.2.5 Effective Ecosystem-based Adaptation[44] reduces a range of climate change risks to people, biodiversity and ecosystem services with multiple co-benefits (*high confidence*). Ecosystem-based Adaptation is vulnerable to climate change impacts, with effectiveness declining with increasing global warming (*high confidence*). Urban greening using trees and other vegetation can provide local cooling (*very high confidence*). Natural river systems, wetlands and upstream forest ecosystems reduce flood risk by storing water and slowing water flow, in most circumstances (*high confidence*). Coastal wetlands protect against coastal erosion and flooding associated with storms and sea level rise where sufficient space and adequate habitats are available until rates of sea level rise exceeds natural adaptive capacity to build sediment (*very high confidence*). {2.4, 2.5, 2.6, Table 2.7, 3.4, 3.5, 3.6, Figure 3.26, 4.6, Box 4.6, Box 4.7, 5.5, 5.14, Box 5.11, 6.3, 6.4, Figure 6.6, 7.4, 8.5, 8.6, 9.6, 9.8, 9.9, 10.2, 11.3, 12.5, 13.3, 13.4, 13.5, 14.5, Box 14.7, 16.3, 18.3, CCP5.4, CCB FEASIB.3, CCB HEALTH, CCB MOVING PLATE, CCB NATURAL, CWGB BIOECONOMY}

Urban, Rural and Infrastructure Transition

C.2.6 Considering climate change impacts and risks in the design and planning of urban and rural settlements and infrastructure is critical for resilience and enhancing human well-being (*high confidence*). The urgent provision of basic services, infrastructure, livelihood diversification and employment, strengthening of local and regional food systems and community-based adaptation enhance lives and livelihoods, particularly of low-income and marginalised groups (*high confidence*). Inclusive, integrated and long-term planning at local, municipal, sub-national and national scales, together with effective regulation and monitoring systems and financial and technological resources and capabilities foster urban and rural system transition (*high confidence*). Effective partnerships between governments, civil society, and private sector organizations, across scales provide infrastructure and services in ways that enhance the adaptive capacity of vulnerable people (*medium* to *high confidence*). {5.12, 5.13, 5.14, 6.3, 6.4, Box 6.3, Box 6.6, Table 6.6, 7.4, 12.5, 13.6, 14.5, Box 14.4, Box 17.4, CCP2.3, CCP2.4, CCP5.4, CCB FEASIB}

C.2.7 An increasing number of adaptation responses exist for urban systems, but their feasibility and effectiveness is constrained by institutional, financial, and technological access and capacity, and depends on coordinated and contextually appropriate responses across physical, natural and social infrastructure (*high confidence*). Globally, more financing is directed at physical infrastructure than natural and social infrastructure (*medium confidence*) and there is *limited evidence* of investment in the informal settlements hosting the most vulnerable urban residents (*medium* to *high confidence*). Ecosystem-based adaptation (e.g., urban agriculture and forestry, river restoration) has increasingly been applied in urban areas (*high confidence*). Combined ecosystem-based and structural adaptation responses are being developed, and there is growing evidence of their potential to reduce adaptation costs and contribute to flood control, sanitation, water resources management, landslide prevention and coastal protection (*medium confidence*). {3.6, Box 4.6, 5.12, 6.3, 6.4, Table 6.8, 7.4, 9.7, 9.9, 10.4, Table 10.3, 11.3, 11.7, Box 11.6, 12.5, 13.2, 13.3, 13.6, 14.5, 15.5, 17.2, Box 17.4, CCP2.3, CCP 3.2, CCP5.4, CCB FEASIB, CCB SLR, SROCC SPM}

44 Ecosystem based Adaptation (EbA) is recognised internationally under the Convention on Biological Diversity (CBD14/5). A related concept is Nature-based Solutions (NbS), which includes a broader range of approaches with safeguards, including those that contribute to adaptation and mitigation. The term 'Nature-based Solutions' is widely but not universally used in the scientific literature. The term is the subject of ongoing debate, with concerns that it may lead to the misunderstanding that NbS on its own can provide a global solution to climate change.

C.2.8 Sea level rise poses a distinctive and severe adaptation challenge as it implies dealing with slow onset changes and increased frequency and magnitude of extreme sea level events which will escalate in the coming decades (*high confidence*). Such adaptation challenges would occur much earlier under high rates of sea level rise, in particular if low-likelihood, high impact outcomes associated with collapsing ice sheets occur (*high confidence*). Responses to ongoing sea level rise and land subsidence in low-lying coastal cities and settlements and small islands include protection, accommodation, advance and planned relocation (*high confidence*)[45]. These responses are more effective if combined and/or sequenced, planned well ahead, aligned with sociocultural values and development priorities, and underpinned by inclusive community engagement processes (*high confidence*). { 6.2, 10.4, 11.7, Box 11.6, 13.2, 14.5, 15.5, CCP2.3, CCB SLR, WGI AR6 SPM B.5, WGI AR6 SPM C.3, SROCC SPM C3.2}

C.2.9 Approximately 3.4 billion people globally live in rural areas around the world, and many are highly vulnerable to climate change. Integrating climate adaptation into social protection programs, including cash transfers and public works programmes, is highly feasible and increases resilience to climate change, especially when supported by basic services and infrastructure. Social safety nets are increasingly being reconfigured to build adaptive capacities of the most vulnerable in rural and also urban communities. Social safety nets that support climate change adaptation have strong co-benefits with development goals such as education, poverty alleviation, gender inclusion and food security. (*high confidence*) {5.14, 9.4, 9.10, 9.11, 12.5, 14.5, CCP5.4, CCB FEASIB, CCB GENDER}

Energy System Transition

C.2.10 Within energy system transitions, the most feasible adaptation options support infrastructure resilience, reliable power systems and efficient water use for existing and new energy generation systems (*very high confidence*). Energy generation diversification, including with renewable energy resources and generation that can be decentralised depending on context (e.g., wind, solar, small scale hydroelectric) and demand side management (e.g., storage, and energy efficiency improvements) can reduce vulnerabilities to climate change, especially in rural populations (*high confidence*). Adaptations for hydropower and thermo-electric power generation are effective in most regions up to 1.5°C to 2°C, with decreasing effectiveness at higher levels of warming (*medium confidence*). Climate responsive energy markets, updated design standards on energy assets according to current and projected climate change, smart-grid technologies, robust transmission systems and improved capacity to respond to supply deficits have high feasibility in the medium- to long-term, with mitigation co-benefits (*very high confidence*). {4.6, 4.7, Figure 4.28, Figure 4.29, 10.4, Table 11.8, 13.6, Figure 13.16, Figure 13.19, 18.3,CCP5.2, CCP5.4, CCB FEASIB, CWGB BIOECONOMY}

Cross-cutting Options

C.2.11 Strengthening the climate resiliency of health systems will protect and promote human health and well-being (*high confidence*). There are multiple opportunities for targeted investments and finance to protect against exposure to climate hazards, particularly for those at highest risk. Heat Health Action Plans that include early warning and response systems are effective adaptation options for extreme heat (*high confidence*). Effective adaptation options for water-borne and food-borne diseases include improving access to potable water, reducing exposure of water and sanitation systems to flooding and extreme weather events, and improved early warning systems (*very high confidence*). For vector-borne diseases, effective adaptation options include surveillance, early warning systems, and vaccine development (*very high confidence*). Effective adaptation options for reducing mental health risks under climate change include improving surveillance, access to mental health care, and monitoring of psychosocial impacts from extreme weather events (*high confidence*). Health and well-being would benefit from integrated adaptation approaches that mainstream health into food, livelihoods, social protection, infrastructure, water and sanitation policies requiring collaboration and coordination at all scales of governance (*very high confidence*). {5.12, 6.3, 7.4, 9.10, Box 9.7, 11.3, 12.5, 13.7, 14.5, CCB COVID, CCB FEASIB, CCB ILLNESS }

C.2.12 Increasing adaptive capacities minimises the negative impacts of climate-related displacement and involuntary migration for migrants and sending and receiving areas (*high confidence*). This improves the degree of choice under which migration decisions are made, ensuring safe and orderly movements of people within and between countries (*high confidence*). Some development reduces underlying vulnerabilities associated with conflict, and adaptation contributes by reducing the impacts of climate change on climate sensitive drivers of conflict (*high confidence*). Risks to peace are reduced, for example, by supporting people in climate-sensitive economic activities (*medium confidence*) and advancing women's empowerment (*high confidence*). {7.4, Box 9.8, Box 10.2, 12.5, CCB FEASIB, CCB MIGRATE}

45 The term 'response' is used here instead of adaptation because some responses, such as retreat, may or may not be considered to be adaptation.

C.2.13 There are a range of adaptation options, such as disaster risk management, early warning systems, climate services and risk spreading and sharing that have broad applicability across sectors and provide greater benefits to other adaptation options when combined (*high confidence*). For example, climate services that are inclusive of different users and providers can improve agricultural practices, inform better water use and efficiency, and enable resilient infrastructure planning (*high confidence*). {2.6, 3.6, 4.7, 5.4, 5.5, 5.6, 5.8, 5.9, 5.12, 5.14, 9.4, 9.8, 10.4, 12.5, 13.11, CCP5.4, CCB FEASIB, CCB MOVING PLATE}

Limits to Adaptation

C.3 Soft limits to some human adaptation have been reached, but can be overcome by addressing a range of constraints, primarily financial, governance, institutional and policy constraints (*high confidence*). Hard limits to adaptation have been reached in some ecosystems (*high confidence*). With increasing global warming, losses and damages will increase and additional human and natural systems will reach adaptation limits (*high confidence*). {Figure TS.7, 1.4, 2.4, 2.5, 2.6, 3.4, 3.6, 4.7, Figure 4.30, 5.5, Table 8.6, Box 10.7, 11.7, Table 11.16, 12.5, 13.2, 13.5, 13.6, 13.10, 13.11, Figure 13.21, 14.5, 15.6, 16.4, Figure 16.8, Table 16.3, Table 16.4, CCP1.2, CCP1.3, CCP2.3, CCP3.3, CCP5.2, CCP5.4, CCP6.3, CCP7.3, CCB SLR}

C.3.1 Soft limits to some human adaptation have been reached, but can be overcome by addressing a range of constraints, which primarily consist of financial, governance, institutional and policy constraints (*high confidence*). For example, individuals and households in low-lying coastal areas in Australasia and Small Islands and smallholder farmers in Central and South America, Africa, Europe and Asia have reached soft limits (*medium confidence*). Inequity and poverty also constrain adaptation, leading to soft limits and resulting in disproportionate exposure and impacts for most vulnerable groups (*high confidence*). Lack of climate literacy[46] at all levels and limited availability of information and data pose further constraints to adaptation planning and implementation (*medium confidence*). {1.4, 4.7, 5.4, 8.4, Table 8.6, 9.1, 9.4, 9.5, 9.8, 11.7, 12.5 13.5, 15.3, 15.5, 15.6, 16.4, Box 16.1, Figure 16.8, CCP5.2, CCP5.4, CCP6.3}

C.3.2 Financial constraints are important determinants of soft limits to adaptation across sectors and all regions (*high confidence*). Although global tracked climate finance has shown an upward trend since AR5, current global financial flows for adaptation, including from public and private finance sources, are insufficient for and constrain implementation of adaptation options especially in developing countries (*high confidence*). The overwhelming majority of global tracked climate finance was targeted to mitigation while a small proportion was targeted to adaptation (*very high confidence*). Adaptation finance has come predominantly from public sources (*very high confidence*). Adverse climate impacts can reduce the availability of financial resources by incurring losses and damages and through impeding national economic growth, thereby further increasing financial constraints for adaptation, particularly for developing and least developed countries (*medium confidence*). {Figure TS.7, 1.4, 2.6, 3.6, 4.7, Figure 4.30, 5.14, 7.4, 8.4, Table 8.6, 9.4, 9.9, 9.11, 10.5, 12.5, 13.3, 13.11, Box 14.4, 15.6, 16.2, 16.4, Figure 16.8, Table 16.4, 17.4, 18.1, CCP2.4, CCP5.4, CCP6.3, CCB FINANCE}

C.3.3 Many natural systems are near the hard limits of their natural adaptation capacity and additional systems will reach limits with increasing global warming (*high confidence*). Ecosystems already reaching or surpassing hard adaptation limits include some warm-water coral reefs, some coastal wetlands, some rainforests, and some polar and mountain ecosystems (*high confidence*). Above 1.5°C global warming level, some Ecosystem-based Adaptation measures will lose their effectiveness in providing benefits to people as these ecosystems will reach hard adaptation limits (*high confidence*). (Figure SPM.4) {1.4, 2.4, 2.6, 3.4, 3.6, 9.6, Box 11.2, 13.4, 14.5, 15.5, 16.4, 16.6, 17.2, CCP1.2, CCP5.2, CCP6.3, CCP7.3, CCB SLR}

C.3.4 In human systems, some coastal settlements face soft adaptation limits due to technical and financial difficulties of implementing coastal protection (*high confidence*). Above 1.5°C global warming level, limited freshwater resources pose potential hard limits for Small Islands and for regions dependent on glacier and snow-melt (*medium confidence*). By 2°C global warming level, soft limits are projected for multiple staple crops in many growing areas, particularly in tropical regions (*high confidence*). By 3°C global warming level, soft limits are projected for some water management measures for many regions, with hard limits projected for parts of Europe (*medium confidence*). Transitioning from incremental to transformational adaptation can help overcome soft adaptation limits (*high confidence*). {1.4, 4.7, 5.4, 5.8, 7.2, 7.3, 8.4, Table 8.6, 9.8, 10.4, 12.5, 13.2, 13.6, 16.4, 17.2, CCP1.3. Box CCP1.1, CCP2.3, CCP3.3, CCP4.4, CCP5.3, CCB SLR}

C.3.5 Adaptation does not prevent all losses and damages, even with effective adaptation and before reaching soft and hard limits. Losses and damages are unequally distributed across systems, regions and sectors and are not comprehensively addressed by current financial, governance and institutional arrangements, particularly in vulnerable developing countries. With increasing global warming, losses and damages increase and become increasingly difficult to avoid, while strongly concentrated among the poorest vulnerable populations. (*high confidence*) {1.4, 2.6, 3.4, 3.6, 6.3, Figure 6.4, 8.4, 13.2, 13.7, 13.10, 17.2, CCP2.3, CCP4.4, CCB LOSS, CCB SLR, CWGB ECONOMIC}

46 Climate literacy encompasses being aware of climate change, its anthropogenic causes and implications.

Avoiding Maladaptation

C.4 There is increased evidence of maladaptation[15] across many sectors and regions since the AR5. Maladaptive responses to climate change can create lock-ins of vulnerability, exposure and risks that are difficult and expensive to change and exacerbate existing inequalities. Maladaptation can be avoided by flexible, multi-sectoral, inclusive and long-term planning and implementation of adaptation actions with benefits to many sectors and systems. (*high confidence*) {1.3, 1.4, 2.6, Box 2.2, 3.2, 3.6, 4.6, 4.7, Box 4.3, Box 4.5, Figure 4.29, 5.6, 5.13, 8.2, 8.3, 8.4, 8.6, 9.6, 9.7, 9.8, 9.9, 9.10, 9.11, Box 9.5, Box 9.8, Box 9.9, Box 11.6, 13.11, 13.3, 13.4, 13.5, 14.5, 15.5, 15.6, 16.3, 17.2, 17.3, 17.4, 17.5, 17.6, CCP2.3, CCP2.3, CCP5.4, CCB DEEP, CCB NATURAL, CCB SLR, CWGB BIOECONOMY}

C.4.1 Actions that focus on sectors and risks in isolation and on short-term gains often lead to maladaptation if long-term impacts of the adaptation option and long-term adaptation commitment are not taken into account (*high confidence*). The implementation of these maladaptive actions can result in infrastructure and institutions that are inflexible and/or expensive to change (*high confidence*). For example, seawalls effectively reduce impacts to people and assets in the short-term but can also result in lock-ins and increase exposure to climate risks in the long-term unless they are integrated into a long-term adaptive plan (*high confidence*). Adaptation integrated with development reduces lock-ins and creates opportunities (e.g., infrastructure upgrading) (*medium confidence*). {1.4, 3.4, 3.6, 10.4, 11.7, Box 11.6, 13.2, 17.2, 17.5, 17.6, CCP 2.3, CCB DEEP, CCB SLR}

C.4.2 Biodiversity and ecosystem resilience to climate change are decreased by maladaptive actions, which also constrain ecosystem services. Examples of these maladaptive actions for ecosystems include fire suppression in naturally fire-adapted ecosystems or hard defences against flooding. These actions reduce space for natural processes and represent a severe form of maladaptation for the ecosystems they degrade, replace or fragment, thereby reducing their resilience to climate change and the ability to provide ecosystem services for adaptation. Considering biodiversity and autonomous adaptation in long-term planning processes reduces the risk of maladaptation. (*high confidence*) {2.4, 2.6, Table 2.7, 3.4, 3.6, 4.7, 5.6, 5.13, Table 5.21, Table 5.23, Box 11.2, 13.2, Box 13.2, 17.2, 17.5, CCP5.4}

C.4.3 Maladaptation especially affects marginalised and vulnerable groups adversely (e.g., Indigenous Peoples, ethnic minorities, low-income households, informal settlements), reinforcing and entrenching existing inequities. Adaptation planning and implementation that do not consider adverse outcomes for different groups can lead to maladaptation, increasing exposure to risks, marginalising people from certain socioeconomic or livelihood groups, and exacerbating inequity. Inclusive planning initiatives informed by cultural values, Indigenous knowledge, local knowledge, and scientific knowledge can help prevent maladaptation. (*high confidence*) (Figure SPM.4) {2.6, 3.6, 4.3, 4.6, 4.8, 5.12, 5.13, 5.14, 6.1, Box 7.1, 8.4, 11.4, 12.5, Box 13.2, 14.4, Box 14.1, 17.2, 17.5, 18.2, 17.2, CCP2.4}

C.4.4 To minimize maladaptation, multi-sectoral, multi-actor and inclusive planning with flexible pathways encourages low-regret[47] and timely actions that keep options open, ensure benefits in multiple sectors and systems and indicate the available solution space for adapting to long-term climate change (*very high confidence*). Maladaptation is also minimized by planning that accounts for the time it takes to adapt (*high confidence*), the uncertainty about the rate and magnitude of climate risk (*medium confidence*) and a wide range of potentially adverse consequences of adaptation actions (*high confidence*). {1.4, 3.6, 5.12, 5.13, 5.14, 11.6, 11.7, 17.3, 17.6, CCP2.3, CCP2.4, CCP5.4, CCB DEEP, CCB SLR}

Enabling Conditions

C.5 Enabling conditions are key for implementing, accelerating and sustaining adaptation in human systems and ecosystems. These include political commitment and follow-through, institutional frameworks, policies and instruments with clear goals and priorities, enhanced knowledge on impacts and solutions, mobilization of and access to adequate financial resources, monitoring and evaluation, and inclusive governance processes. (*high confidence*) {1.4, 2.6, 3.6, 4.8, 6.4, 7.4, 8.5, 9.4, 10.5, 11.4, 11.7, 12.5, 13.11, 14.7, 15.6, 17.4, 18.4, CCP2.4, CCP5.4, CCB FINANCE, CCB INDIG}

C.5.1 Political commitment and follow-through across all levels of government accelerate the implementation of adaptation actions (*high confidence*). Implementing actions can require large upfront investments of human, financial and technological resources (*high confidence*), whilst some benefits could only become visible in the next decade or beyond (*medium confidence*). Accelerating commitment and follow-through is promoted by rising public awareness, building business cases for adaptation, accountability and transparency mechanisms, monitoring and evaluation of adaptation progress, social movements, and climate-related litigation in some regions (*medium confidence*). {3.6, 4.8, 5.8, 6.4, 8.5, 9.4, 11.7, 12.5, 13.11, 17.4, 17.5, 18.4, CCP2.4, CCB COVID}

47 From AR5, an option *that would generate net social and/or economic benefits under current climate change and a range of future climate change scenarios*, and represent one example of robust strategies.

C.5.2 Institutional frameworks, policies and instruments that set clear adaptation goals and define responsibilities and commitments and that are coordinated amongst actors and governance levels, strengthen and sustain adaptation actions (*very high confidence*). Sustained adaptation actions are strengthened by mainstreaming adaptation into institutional budget and policy planning cycles, statutory planning, monitoring and evaluation frameworks and into recovery efforts from disaster events (*high confidence*). Instruments that incorporate adaptation such as policy and legal frameworks, behavioural incentives, and economic instruments that address market failures, such as climate risk disclosure, inclusive and deliberative processes strengthen adaptation actions by public and private actors (*medium confidence*). {1.4, 3.6, 4.8, 5.14, 6.3, 6.4, 7.4, 9.4, 10.4, 11.7, Box 11.6, Table 11.17, 13.10, 13.11, 14.7, 15.6, 17.3, 17.4, 17.5, 17.6, 18.4, CCP2.4, CCP5.4, CCP6.3, CCB DEEP}

C.5.3 Enhancing knowledge on risks, impacts, and their consequences, and available adaptation options promotes societal and policy responses (*high confidence*). A wide range of top-down, bottom-up and co-produced processes and sources can deepen climate knowledge and sharing, including capacity building at all scales, educational and information programmes, using the arts, participatory modelling and climate services, Indigenous knowledge and local knowledge and citizen science (*high confidence*). These measures can facilitate awareness, heighten risk perception and influence behaviours (*high confidence*). {1.3, 3.6, 4.8, 5.9, 5.14, 6.4, Table 6.8, 7.4, 9.4, 10.5, 11.1, 11.7, 12.5, 13.9, 13.11, 14.3, 15.6, 15.6, 17.4, 18.4, CCP2.4.1, CCB INDIG}

C.5.4 With adaptation finance needs estimated to be higher than those presented in AR5, enhanced mobilization of and access to financial resources are essential for implementation of adaptation and to reduce adaptation gaps (*high confidence*). Building capacity and removing some barriers to accessing finance is fundamental to accelerate adaptation, especially for vulnerable groups, regions and sectors (*high confidence*). Public and private finance instruments include inter alia grants, guarantee, equity, concessional debt, market debt, and internal budget allocation as well as savings in households and insurance. Public finance is an important enabler of adaptation (*high confidence*). Public mechanisms and finance can leverage private sector finance for adaptation by addressing real and perceived regulatory, cost and market barriers, for example via public-private partnerships (*high confidence*). Financial and technological resources enable effective and ongoing implementation of adaptation, especially when supported by institutions with a strong understanding of adaptation needs and capacity (*high confidence*). {4.8, 5.14, 6.4, Table 6.10, 7.4, 9.4, Table 11.17, 12.5, 13.11, 15.6, 17.4, 18.4, Box 18.9, CCP5.4, CCB FINANCE}

C.5.5 Monitoring and evaluation (M&E) of adaptation are critical for tracking progress and enabling effective adaptation (*high confidence*). M&E implementation is currently limited (*high confidence*) but has increased since AR5 at local and national levels. Although most of the monitoring of adaptation is focused towards planning and implementation, the monitoring of outcomes is critical for tracking the effectiveness and progress of adaptation *(high confidence).* M&E facilitates learning on successful and effective adaptation measures, and signals when and where additional action may be needed. M&E systems are most effective when supported by capacities and resources and embedded in enabling governance systems (*high confidence*). {1.4, 2.6, 6.4, 7.4, 11.7, 11.8, 13.2, 13.11, 17.5, 18.4, CCP2.4, CCB DEEP, CCB ILLNESS, CCB NATURAL, CCB PROGRESS}

C.5.6 Inclusive governance that prioritises equity and justice in adaptation planning and implementation leads to more effective and sustainable adaptation outcomes (*high confidence*). Vulnerabilities and climate risks are often reduced through carefully designed and implemented laws, policies, processes, and interventions that address context specific inequities such as based on gender, ethnicity, disability, age, location and income (*high confidence*). These approaches, which include multi-stakeholder co-learning platforms, transboundary collaborations, community-based adaptation and participatory scenario planning, focus on capacity-building, and meaningful participation of the most vulnerable and marginalised groups, and their access to key resources to adapt (*high confidence*). {1.4, 2.6, 3.6, 4.8, 5.4, 5.8, 5.9, 5.13, 6.4, 7.4, 8.5, 11.8, 12.5, 13.11, 14.7, 15.5, 15.7, 17.3, 17.5, 18.4, CCP2.4, CCP5.4, CCP6.4, CCB GENDER, CCB HEALTH, CCB INDIG}

D: Climate Resilient Development

Climate resilient development integrates adaptation measures and their enabling conditions (Section C) with mitigation to advance sustainable development for all. Climate resilient development involves questions of equity and system transitions in land, ocean and ecosystems; urban and infrastructure; energy; industry; and society and includes adaptations for human, ecosystem and planetary health. Pursuing climate resilient development focuses on both where people and ecosystems are co-located as well as the protection and maintenance of ecosystem function at the planetary scale. Pathways for advancing climate resilient development are development trajectories that successfully integrate mitigation and adaptation actions to advance sustainable development. Climate resilient development pathways may be temporarily coincident with any RCP and SSP scenario used throughout AR6, but do not follow any particular scenario in all places and over all time.

Conditions for Climate Resilient Development

D.1 Evidence of observed impacts, projected risks, levels and trends in vulnerability, and adaptation limits, demonstrate that worldwide climate resilient development action is more urgent than previously assessed in AR5. Comprehensive, effective, and innovative responses can harness synergies and reduce trade-offs between adaptation and mitigation to advance sustainable development. (*very high confidence*) {2.6, 3.4, 3.6, 4.2, 4.6, 7.2, 7.4, 8.3, 8.4, 9.3, 10.6, 13.3, 13.8, 13.10, 14.7, 17.2, 18.3, Box 18.1, Figure 18.1, Table 18.5}

D.1.1 There is a rapidly narrowing window of opportunity to enable climate resilient development. Multiple climate resilient development pathways are still possible by which communities, the private sector, governments, nations and the world can pursue climate resilient development – each involving and resulting from different societal choices influenced by different contexts and opportunities and constraints on system transitions. Climate resilient development pathways are progressively constrained by every increment of warming, in particular beyond 1.5°C, social and economic inequalities, the balance between adaptation and mitigation varying by national, regional and local circumstances and geographies, according to capabilities including resources, vulnerability, culture and values, past development choices leading to past emissions and future warming scenarios, bounding the climate resilient development pathways remaining, and the ways in which development trajectories are shaped by equity, and social and climate justice. (*very high confidence*) {Figure TS.14d, 2.6, 4.7, 4.8, 5.14, 6.4, 7.4, 8.3, 9.4, 9.3, 9.4, 9.5, 10.6, 11.8, 12.5, 13.10, 14.7, 15.3, 18.5, CCP2.3, CCP3.4, CCP4.4, CCP5.3, CCP5.4, Table CCP5.2, CCP6.3, CCP7.5}

D.1.2 Opportunities for climate resilient development are not equitably distributed around the world (*very high confidence*). Climate impacts and risks exacerbate vulnerability and social and economic inequities and consequently increase persistent and acute development challenges, especially in developing regions and sub-regions, and in particularly exposed sites, including coasts, small islands, deserts, mountains and polar regions. This in turn undermines efforts to achieve sustainable development, particularly for vulnerable and marginalized communities (*very high confidence*). {2.5, 4.4, 4.7, 6.3, Box 6.4, Figure 6.5, 9.4, Table 18.5, CCP2.2, CCP3.2, CCP3.3, CCP5.4, CCP6.2, CCB HEALTH, CWGB URBAN}

D.1.3 Embedding effective and equitable adaptation and mitigation in development planning can reduce vulnerability, conserve and restore ecosystems, and enable climate resilient development. This is especially challenging in localities with persistent development gaps and limited resources (*high confidence*). Dynamic trade-offs and competing priorities exist between mitigation, adaptation, and development. Integrated and inclusive system-oriented solutions based on equity and social and climate justice reduce risks and enable climate resilient development (*high confidence*). {1.4, 2.6, Box 2.2, 3.6, 4.7, 4.8, Box 4.5, Box 4.8, 5.13, 7.4, 8.5, 9.4, Box 9.3, 10.6, 12.5, 12.6, 13.3, 13.4, 13.10, 13.11, 14.7, 18.4, CCB DEEP, CCP2, CCP5.4, CCB HEALTH, SRCCL}

Enabling Climate Resilient Development

D.2 Climate resilient development is enabled when governments, civil society and the private sector make inclusive development choices that prioritise risk reduction, equity and justice, and when decision-making processes, finance and actions are integrated across governance levels, sectors and timeframes (*very high confidence*). Climate resilient development is facilitated by international cooperation and by governments at all levels working with communities, civil society, educational bodies, scientific and other institutions, media, investors and businesses; and by developing partnerships with traditionally marginalised groups, including women, youth, Indigenous Peoples, local communities and ethnic minorities (*high confidence*). These partnerships are most effective when supported by enabling political leadership, institutions, resources, including finance, as well as climate services, information and decision support tools (*high confidence*). (Figure SPM.5) {1.3, 1.4, 1.5, 2.7, 3.6, 4.8, 5.14, 6.4, 7.4, 8.5, 8.6, 9.4, 10.6, 11.8, 12.5, 13.11, 14.7, 15.6, 15.7, 17.4, 17.6, 18.4, 18.5, CCP2.4, CCP3.4, CCP4.4, CCP5.4, CCP6.4, CCP7.6, CCB DEEP, CCB GENDER, CCB HEALTH, CCB INDIG, CCB NATURAL, CCB SLR}

D.2.1 Climate resilient development is advanced when actors work in equitable, just and enabling ways to reconcile divergent interests, values and worldviews, toward equitable and just outcomes (*high confidence*). These practices build on diverse knowledges about climate risk and chosen development pathways account for local, regional and global climate impacts, risks, barriers and opportunities (*high confidence*). Structural vulnerabilities to climate change can be reduced through carefully designed and implemented legal, policy, and process interventions from the local to global that address inequities based on gender, ethnicity, disability, age, location and income (*very high confidence*). This includes rights-based approaches that focus on capacity-building, meaningful participation of the most vulnerable groups, and their access to key resources, including financing, to reduce risk and adapt (*high confidence*). Evidence shows that climate resilient development processes link scientific, Indigenous, local, practitioner and other forms of knowledge, and are more effective and sustainable because they are locally appropriate and lead to more legitimate, relevant and effective actions (*high confidence*).

There is a rapidly narrowing window of opportunity to enable climate resilient development

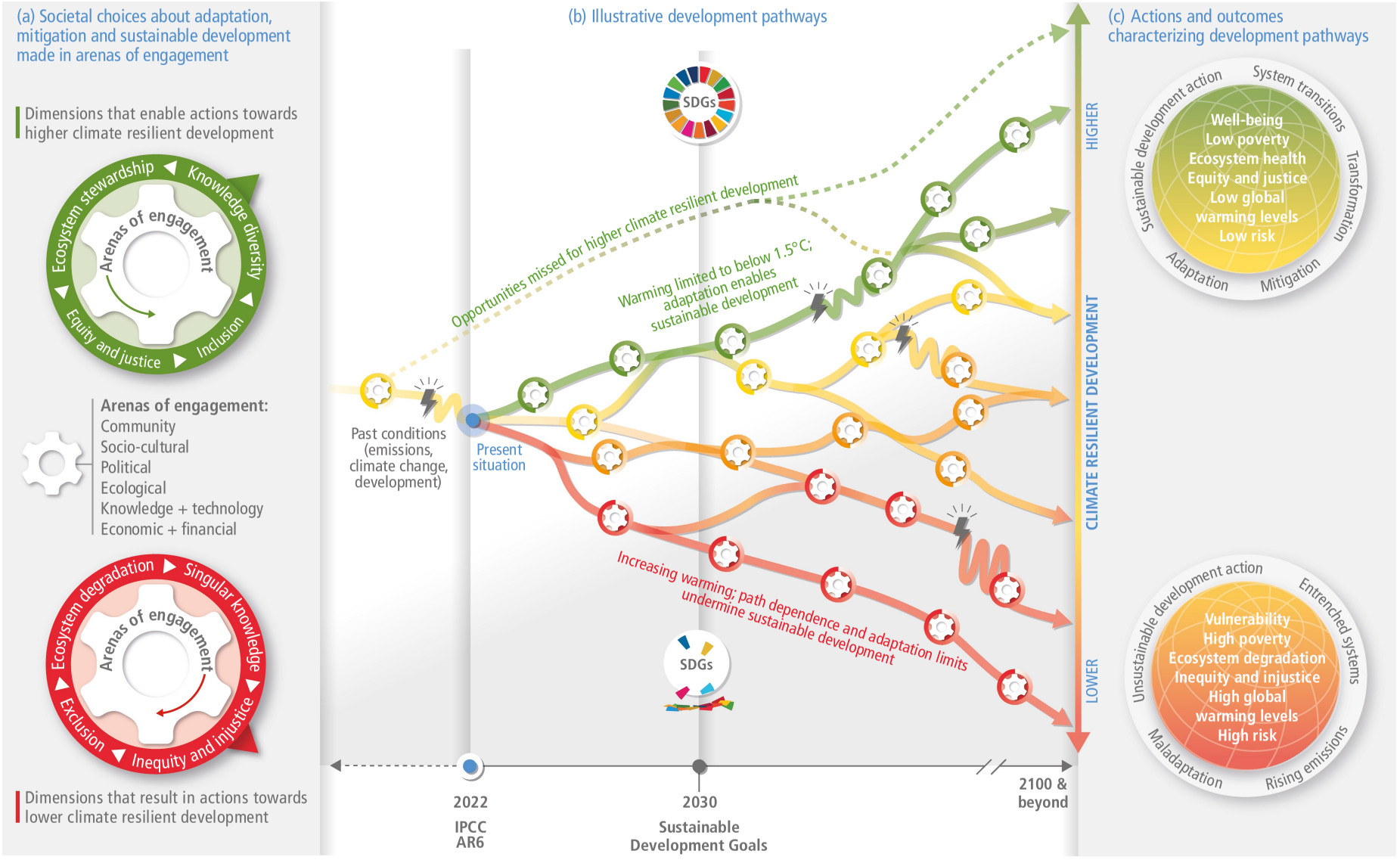


Figure SPM.5 | Climate resilient development (CRD) is the process of implementing greenhouse gas mitigation and adaptation measures to support sustainable development. This figure builds on Figure SPM.9 in AR5 WGII (depicting climate resilient pathways) by describing how CRD pathways are the result of cumulative societal choices and actions within multiple arenas.

Panel (a) Societal choices towards higher CRD **(green cog)** or lower CRD **(red cog)** result from interacting decisions and actions by diverse government, private sector and civil society actors, in the context of climate risks, adaptation limits and development gaps. These actors engage with adaptation, mitigation and development actions in political, economic and financial, ecological, socio-cultural, knowledge and technology, and community arenas from local to international levels. Opportunities for climate resilient development are not equitably distributed around the world.

Panel (b) Cumulatively, societal choices, which are made continuously, shift global development pathways towards higher **(green)** or lower **(red)** climate resilient development. Past conditions (past emissions, climate change and development) have already eliminated some development pathways towards higher CRD **(dashed green line)**.

Panel (c) Higher CRD is characterised by outcomes that advance sustainable development for all. Climate resilient development is progressively harder to achieve with global warming levels beyond 1.5°C. Inadequate progress towards the Sustainable Development Goals (SDGs) by 2030 reduces climate resilient development prospects. There is a narrowing window of opportunity to shift pathways towards more climate resilient development futures as reflected by the adaptation limits and increasing climate risks, considering the remaining carbon budgets. (Figure SPM.2, Figure SPM.3) {Figure TS.14b, 2.6, 3.6, 7.2, 7.3, 7.4, 8.3, 8.4, 8.5, 16.4, 16.5, 17.3, 17.4, 17.5, 18.1, 18.2, 18.3, 18.4, Box 18.1, Figure 18.1, Figure 18.2, Figure 18.3, CCB COVID, CCB GENDER, CCB HEALTH, CCB INDIG, CCB SLR, WGI AR6 Table SPM.1, WGI AR6 Table SPM.2, SR1.5 Figure SPM.1}

Pathways towards climate resilient development overcome jurisdictional and organizational barriers, and are founded on societal choices that accelerate and deepen key system transitions (*very high confidence*). Planning processes and decision analysis tools can help identify 'low regrets' options[47] that enable mitigation and adaptation in the face of change, complexity, deep uncertainty and divergent views (*medium confidence*). {1.3, 1.4, 1.5, 2.7, 3.6, 4.8, 5.14, 6.4, 7.4, 8.5, 8.6, Box 8.7, 9.4, Box 9.2, 10.6, 11.8, 12.5, 13.11, 14.7, 15.6, 15.7, 17.2–17.6, 18.2–18.4, CCP2.3–2.4, CCP3.4, CCP4.4, CCP5.4, CCP6.4, CCP7.6, CCB DEEP, CCB HEALTH, CCB INDIG, CCB NATURAL, CCB SLR}

D.2.2 Inclusive governance contributes to more effective and enduring adaptation outcomes and enables climate resilient development (*high confidence*). Inclusive processes strengthen the ability of governments and other stakeholders to jointly consider factors such as the rate and magnitude of change and uncertainties, associated impacts, and timescales of different climate resilient development pathways given past development choices leading to past emissions and scenarios of future global warming (*high confidence*). Associated societal choices are made continuously through interactions in arenas of engagement from local to international levels. The quality and outcome of these interactions helps determine whether development pathways shift towards or away from climate resilient development (*medium confidence*). (Figure SPM.5) {2.7, 3.6, 4.8, 5.14, 6.4, 7.4, 8.5, 8.6, 9.4, 10.6, 11.8, 12.5, 13.11, 14.7, 15.6, 15.7, 17.2–17.6, 18.2, 18.4, CCP2.3–2.4, CCP3.4, CCP4.4, CCP5.4, CCP6.4, CCP7.6, CCB GENDER, CCB HEALTH, CCB INDIG}

D.2.3 Governance for climate resilient development is most effective when supported by formal and informal institutions and practices that are well-aligned across scales, sectors, policy domains and timeframes. Governance efforts that advance climate resilient development account for the dynamic, uncertain and context-specific nature of climate-related risk, and its interconnections with non-climate risks. Institutions[48] that enable climate resilient development are flexible and responsive to emergent risks and facilitate sustained and timely action. Governance for climate resilient development is enabled by adequate and appropriate human and technological resources, information, capacities and finance. (*high confidence*) {2.7, 3.6, 4.8, 5.14, 6.3, 6.4, 7.4, 8.5, 8.6, 9.4, 10.6, 11.8, 12.5, 13.11, 14.7, 15.6, 15.7, 17.2-17.6, 18.2, 18.4, CCP2.3–2.4, CCP3.4, CCP4.4, CCP5.4, CCP6.4, CCP7.6, CCB DEEP, CCB GENDER, CCB HEALTH, CCB INDIG, CCB NATURAL, CCB SLR}

Climate Resilient Development for Natural and Human Systems

D.3 Interactions between changing urban form, exposure and vulnerability can create climate change-induced risks and losses for cities and settlements. However, the global trend of urbanisation also offers a critical opportunity in the near-term, to advance climate resilient development (*high confidence*). Integrated, inclusive planning and investment in everyday decision-making about urban infrastructure, including social, ecological and grey/physical infrastructures, can significantly increase the adaptive capacity of urban and rural settlements. Equitable outcomes contributes to multiple benefits for health and well-being and ecosystem services, including for Indigenous Peoples, marginalised and vulnerable communities (*high confidence*). Climate resilient development in urban areas also supports adaptive capacity in more rural places through maintaining peri-urban supply chains of goods and services and financial flows (*medium confidence*). Coastal cities and settlements play an especially important role in advancing climate resilient development (*high confidence*). {6.2, 6.3, Table 6.6, 7.4, 8.6, Box 9.8, 18.3, CCP2.1. CCP2.2, CCP6.2, CWGB URBAN}

48 Institutions: Rules, norms and conventions that guide, constrain or enable human behaviours and practices. Institutions can be formally established, for instance through laws and regulations, or informally established, for instance by traditions or customs. Institutions may spur, hinder, strengthen, weaken or distort the emergence, adoption and implementation of climate action and climate governance.

D.3.1 Taking integrated action for climate resilience to avoid climate risk requires urgent decision making for the new built environment and retrofitting existing urban design, infrastructure and land use. Based on socioeconomic circumstances, adaptation and sustainable development actions will provide multiple benefits including for health and well-being, particularly when supported by national governments, non-governmental organisations and international agencies that work across sectors in partnerships with local communities. Equitable partnerships between local and municipal governments, the private sector, Indigenous Peoples, local communities, and civil society can, including through international cooperation, advance climate resilient development by addressing structural inequalities, insufficient financial resources, cross-city risks and the integration of Indigenous knowledge and local knowledge. (*high confidence*) {6.2, 6.3, 6.4, Table 6.6, 7.4, 8.5, 9.4, 10.5. 12.5, 17.4, Table 17.8, 18.2, Box 18.1, CCP2.4, CCB FINANCE, CCB GENDER, CCB INDIG, CWGB URBAN}

D.3.2 Rapid global urbanisation offers opportunities for climate resilient development in diverse contexts from rural and informal settlements to large metropolitan areas (*high confidence*). Dominant models of energy intensive and market-led urbanisation, insufficient and misaligned finance and a predominant focus on grey infrastructure in the absence of integration with ecological and social approaches, risks missing opportunities for adaptation and locking in maladaptation (*high confidence*). Poor land use planning and siloed approaches to health, ecological and social planning also exacerbates, vulnerability in already marginalised communities (*medium confidence*). Urban climate resilient development is observed to be more effective if it is responsive to regional and local land use development and adaptation gaps, and addresses the underlying drivers of vulnerability (*high confidence*). The greatest gains in well-being can be achieved by prioritizing finance to reduce climate risk for low-income and marginalized residents including people living in informal settlements (*high confidence*). {5.14, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, Figure 6.5, Table 6.6, 7.4, 8.5, 8.6, 9.8, 9.9, 10.4, Table 17.8, 18.2, CCP2.2, CCP5.4, CCB HEALTH, CWGB URBAN}

D.3.3 Urban systems are critical, interconnected sites for enabling climate resilient development, especially at the coast. Coastal cities and settlements play a key role in moving toward higher climate resilient development given firstly, almost 11% of the global population – 896 million people – lived within the Low Elevation Coastal Zone[49] in 2020, potentially increasing to beyond 1 billion people by 2050, and these people, and associated development and coastal ecosystems, face escalating climate compounded risks, including sea level rise. Secondly, these coastal cities and settlements make key contributions to climate resilient development through their vital role in national economies and inland communities, global trade supply chains, cultural exchange, and centres of innovation. (*high confidence*) {6.1, 6.2, 6.4, Table 6.6, Box 15.2, SMCCP Table 2.1, CCP2.2, CCP2.4, CCB SLR, XWGB URBAN, SROCC Chapter 4}

D.4 Safeguarding biodiversity and ecosystems is fundamental to climate resilient development, in light of the threats climate change poses to them and their roles in adaptation and mitigation (*very high confidence*). Recent analyses, drawing on a range of lines of evidence, suggest that maintaining the resilience of biodiversity and ecosystem services at a global scale depends on effective and equitable conservation of approximately 30% to 50% of Earth's land, freshwater and ocean areas, including currently near-natural ecosystems (*high confidence*). {2.4, 2.5, 2.6, 3.4, 3.5, 3.6, Box 3.4, 12.5, 13.3, 13.4, 13.5, 13.10, CCB INDIG, CCB NATURAL}

D.4.1 Building the resilience of biodiversity and supporting ecosystem integrity[50] can maintain benefits for people, including livelihoods, human health and well-being and the provision of food, fibre and water, as well as contributing to disaster risk reduction and climate change adaptation and mitigation. {2.2, 2.5, 2.6, Table 2.6, Table 2.7, 3.5, 3.6, 5.8, 5.13, 5.14, Box 5.11, 12.5, CCP5.4, CCB COVID, CCB GENDER, CCB ILLNESS, CCB INDIG, CCB MIGRATE, CCB NATURAL}

D.4.2 Protecting and restoring ecosystems is essential for maintaining and enhancing the resilience of the biosphere (*very high confidence*). Degradation and loss of ecosystems is also a cause of greenhouse gas emissions and is at increasing risk of being exacerbated by climate change impacts, including droughts and wildfire *(high confidence).* Climate resilient development avoids adaptation and mitigation measures that damage ecosystems (*high confidence*). Documented examples of adverse impacts of land-based measures intended as mitigation, when poorly implemented, include afforestation of grasslands, savannas and peatlands, and risks from bioenergy crops at large scale to water supply, food security and biodiversity (*high confidence*). {2.4, 2.5, Box 2.2, 3.4, 3.5, Box 3.4, Box 9.3, CCP7.3, CCB NATURAL, CWGB BIOECONOMY}

49 LECZ, coastal areas below 10 m of elevation above sea level that are hydrologically connected to the sea.

50 Ecosystem integrity refers to the ability of ecosystems to maintain key ecological processes, recover from disturbance, and adapt to new conditions.

D.4.3 Biodiversity and ecosystem services have limited capacity to adapt to increasing global warming levels, which will make climate resilient development progressively harder to achieve beyond 1.5°C warming (*very high confidence*). Consequences of current and future global warming for climate resilient development include reduced effectiveness of Ecosystem-based Adaptation and approaches to climate change mitigation based on ecosystems and amplifying feedbacks to the climate system (*high confidence*). {Figure TS.14d, 2.4, 2.5, 2.6, 3.4, Box 3.4, 3.5, 3.6, Table 5.2, 12.5, 13.2, 13.3, 13.10, 14.5, 14.5, Box 14.3, 15.3, 17.3, 17.6, CCP5.3, CCP5.4, CCB EXTREMES, CCB ILLNESS, CCB NATURAL, CCB SLR, SR1.5, SRCCL, SROCC}

Achieving Climate Resilient Development

D.5 It is unequivocal that climate change has already disrupted human and natural systems. Past and current development trends (past emissions, development and climate change) have not advanced global climate resilient development (*very high confidence*). Societal choices and actions implemented in the next decade determine the extent to which medium- and long-term pathways will deliver higher or lower climate resilient development (*high confidence*). Importantly climate resilient development prospects are increasingly limited if current greenhouse gas emissions do not rapidly decline, especially if 1.5°C global warming is exceeded in the near-term (*high confidence*). These prospects are constrained by past development, emissions and climate change, and enabled by inclusive governance, adequate and appropriate human and technological resources, information, capacities and finance (*high confidence*). {Figure TS.14d, 1.2, 1.4, 1.5, 2.6, 2.7, 3.6, 4.7, 4.8, 5.14, 6.4, 7.4, 8.3, 8.5, 8.6, 9.3, 9.4, 9.5, 10.6, 11.8, 12.5, 13.10, 13.11, 14.7, 15.3, 15.6, 15.7, 16.2, 16.4, 16.5, 16.6, 17.2–17.6, 18.2–18.5, CCP2.3–2.4, CCP3.4, CCP4.4, CCP5.3, CCP5.4, Table CCP5.2, CCP6.3, CCP6.4, CCP7.5, CCP7.6, CCB DEEP, CCB HEALTH, CCB INDIG, CCB NATURAL, CCB SLR}

D.5.1 Climate resilient development is already challenging at current global warming levels (*high confidence*). The prospects for climate resilient development will be further limited if global warming levels exceeds 1.5°C (*high confidence*) and not be possible in some regions and sub-regions if the global warming level exceeds 2°C (*medium confidence*). Climate resilient development is most constrained in regions/subregions in which climate impacts and risks are already advanced, including low-lying coastal cities and settlements, small islands, deserts, mountains and polar regions (*high confidence*). Regions and subregions with high levels of poverty, water, food and energy insecurity, vulnerable urban environments, degraded ecosystems and rural environments, and/or few enabling conditions, face many non-climate challenges that inhibit climate resilient development which are further exacerbated by climate change (*high confidence*). {Figure TS.14d, 1.2, Box 6.6, 9.3, 9.4, 9.5, 10.6, 11.8, 12.5, 13.10, 14.7, 15.3, CCP2.3, CCP3.4, CCP4.4, CCP5.3, Table CCP5.2, CCP6.3, CCP7.5}

D.5.2 Inclusive governance, investment aligned with climate resilient development, access to appropriate technology and rapidly scaled-up finance, and capacity building of governments at all levels, the private sector and civil society enable climate resilient development. Experience shows that climate resilient development processes are timely, anticipatory, integrative, flexible and action focused. Common goals and social learning build adaptive capacity for climate resilient development. When implementing adaptation and mitigation together, and taking trade-offs into account, multiple benefits and synergies for human well-being as well as ecosystem and planetary health can be realised. Prospects for climate resilient development are increased by inclusive processes involving local knowledge and Indigenous Knowledge as well as processes that coordinate across risks and institutions. Climate resilient development is enabled by increased international cooperation including mobilising and enhancing access to finance, particularly for vulnerable regions, sectors and groups. (*high confidence*) (Figure SPM.5) {2.7, 3.6, 4.8, 5.14, 6.4, 7.4, 8.5, 8.6, 9.4, 10.6, 11.8, 12.5, 13.11, 14.7, 15.6, 15.7, 17.2–17.6, 18.2–18.5, CCP2.3–2.4, CCP3.4, CCP4.4, CCP5.4, CCP6.4, CCP7.6, CCB DEEP, CCB HEALTH, CCB INDIG, CCB NATURAL, CCB SLR}

D.5.3 The cumulative scientific evidence is unequivocal: Climate change is a threat to human well-being and planetary health. Any further delay in concerted anticipatory global action on adaptation and mitigation will miss a brief and rapidly closing window of opportunity to secure a liveable and sustainable future for all. (*very high confidence*) {1.2, 1.4, 1.5, 16.2, Table SM16.24, 16.4, 16.5, 16.6, 17.4, 17.5, 17.6, 18.3, 18.4, 18.5, CCB DEEP, CWGB URBAN, WGI AR6 SPM, SROCC SPM, SRCCL SPM}

ipcc

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change

Climate Change 2022

Mitigation of Climate Change

Summary for Policymakers



WGIII

Working Group III contribution to the
Sixth Assessment Report of the
Intergovernmental Panel on Climate Change

WMO UNEP

Front cover photograph: Matt Bridgestock, Director and Architect at John Gilbert Architects

All International Energy Agency (IEA) Data, IEA Further Data and Derived Data has been sourced from https://www.iea.org/data-and-statistics.

© 2022 Intergovernmental Panel on Climate Change.
Electronic copies of this Summary for Policymakers are available from the IPCC website www.ipcc.ch

ISBN 978-92-9169-160-9

Summary for Policymakers

SPM

Summary for Policymakers

Drafting Authors:

Jim Skea (United Kingdom), Priyadarshi R. Shukla (India), Andy Reisinger (New Zealand), Raphael Slade (United Kingdom), Minal Pathak (India), Alaa Al Khourdajie (United Kingdom/Syria), Renée van Diemen (the Netherlands/United Kingdom), Amjad Abdulla (Maldives), Keigo Akimoto (Japan), Mustafa Babiker (Sudan/Saudi Arabia), Quan Bai (China), Igor A. Bashmakov (the Russian Federation), Christopher Bataille (Canada), Göran Berndes (Sweden), Gabriel Blanco (Argentina), Kornelis Blok (the Netherlands), Mercedes Bustamante (Brazil), Edward Byers (Austria/Ireland), Luisa F. Cabeza (Spain), Katherine Calvin (the United States of America), Carlo Carraro (Italy), Leon Clarke (the United States of America), Annette Cowie (Australia), Felix Creutzig (Germany), Diriba Korecha Dadi (Ethiopia), Dipak Dasgupta (India), Heleen de Coninck (the Netherlands), Fatima Denton (the Gambia), Shobhakar Dhakal (Nepal/Thailand), Navroz K. Dubash (India), Oliver Geden (Germany), Michael Grubb (United Kingdom), Céline Guivarch (France), Shreekant Gupta (India), Andrea N. Hahmann (Chile/Denmark), Kirsten Halsnaes (Denmark), Paulina Jaramillo (the United States of America), Kejun Jiang (China), Frank Jotzo (Australia), Tae Yong Jung (Republic of Korea), Suzana Kahn Ribeiro (Brazil), Smail Khennas (Algeria), Şiir Kılkış (Turkey), Silvia Kreibiehl (Germany), Volker Krey (Germany/Austria), Elmar Kriegler (Germany), William F. Lamb (Germany/United Kingdom), Franck Lecocq (France), Shuaib Lwasa (Uganda), Nagmeldin Mahmoud (Sudan), Cheikh Mbow (Senegal), David McCollum (the United States of America), Jan Christoph Minx (Germany), Catherine Mitchell (United Kingdom), Rachid Mrabet (Morocco), Yacob Mulugetta (Ethiopia/United Kingdom), Gert-Jan Nabuurs (the Netherlands), Gregory F. Nemet (the United States of America/Canada), Peter Newman (Australia), Leila Niamir (Iran/Germany), Lars J. Nilsson (Sweden), Sudarmanto Budi Nugroho (Indonesia), Chukwumerije Okereke (Nigeria/United Kingdom), Shonali Pachauri (India), Anthony Patt (Switzerland), Ramón Pichs-Madruga (Cuba), Joana Portugal-Pereira (Brazil), Lavanya Rajamani (India), Keywan Riahi (Austria), Joyashree Roy (India/Thailand), Yamina Saheb (France/Algeria), Roberto Schaeffer (Brazil), Karen C. Seto (the United States of America), Shreya Some (India), Linda Steg (the Netherlands), Ferenc L. Toth (Austria/Hungary), Diana Ürge-Vorsatz (Hungary), Detlef P. van Vuuren (the Netherlands), Elena Verdolini (Italy), Purvi Vyas (India), Yi-Ming Wei (China), Mariama Williams (Jamaica/the United States of America), Harald Winkler (South Africa).

Contributing Authors:

Parth Bhatia (India), Sarah Burch (Canada), Jeremy Emmet-Booth (New Zealand), Jan S. Fuglestvedt (Norway), Meredith Kellller (the United States of America), Jarmo Kikstra (Austria/the Netherlands), Michael König (Germany), Malte Meinshausen (Australia/Germany), Zebedee Nicholls (Australia), Kaj-Ivar van der Wijst (the Netherlands).

This Summary for Policymakers should be cited as:

IPCC, 2022: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001

A. Introduction and Framing

The Working Group III (WGIII) contribution to the IPCC's Sixth Assessment Report (AR6) assesses literature on the scientific, technological, environmental, economic and social aspects of mitigation of climate change.[1] Levels of confidence[2] are given in () brackets. Numerical ranges are presented in square [] brackets. References to Chapters, Sections, Figures and Boxes in the underlying report and Technical Summary (TS) are given in {} brackets.

The report reflects new findings in the relevant literature and builds on previous IPCC reports, including the WGIII contribution to the IPCC's Fifth Assessment Report (AR5), the WGI and WGII contributions to AR6 and the three Special Reports in the Sixth Assessment cycle,[3] as well as other UN assessments. Some of the main developments relevant for this report include {TS.1, TS.2}:

- **An evolving international landscape.** The literature reflects, among other factors: developments in the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) process, including the outcomes of the Kyoto Protocol and the adoption of the Paris Agreement {13, 14, 15, 16}; the UN 2030 Agenda for Sustainable Development including the Sustainable Development Goals (SDGs) {1, 3, 4, 17}; and the evolving roles of international cooperation {14}, finance {15} and innovation {16}.

- **Increasing diversity of actors and approaches to mitigation.** Recent literature highlights the growing role of non-state and sub-national actors including cities, businesses, Indigenous Peoples, citizens including local communities and youth, transnational initiatives, and public-private entities in the global effort to address climate change {5, 13, 14, 15, 16, 17}. Literature documents the global spread of climate policies and cost declines of existing and emerging low emission technologies, along with varied types and levels of mitigation efforts, and sustained reductions in greenhouse gas (GHG) emissions in some countries {2, 5, 6, 8, 12, 13, 16}, and the impacts of, and some lessons from, the COVID-19 pandemic. {1, 2, 3, 5, 13, 15, Box TS.1, Cross-Chapter Box 1 in Chapter 1}

- **Close linkages between climate change mitigation, adaptation and development pathways.** The development pathways taken by countries at all stages of economic development impact GHG emissions and hence shape mitigation challenges and opportunities, which vary across countries and regions. Literature explores how development choices and the establishment of enabling conditions for action and support influence the feasibility and the cost of limiting emissions {1, 3, 4, 5, 13, 15, 16}. Literature highlights that climate change mitigation action designed and conducted in the context of sustainable development, equity, and poverty eradication, and rooted in the development aspirations of the societies within which they take place, will be more acceptable, durable and effective {1, 3, 4, 5}. This report covers mitigation from both targeted measures, and from policies and governance with other primary objectives.

- **New approaches in the assessment.** In addition to the sectoral and systems chapters {3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12}, the report includes, for the first time in a WGIII report, chapters dedicated to demand for services, and social aspects of mitigation {5, Box TS.11}, and to innovation, technology development and transfer {16}. The assessment of future pathways in this report covers near term (to 2030), medium term (up to 2050), and long term (to 2100) time scales, combining assessment of existing pledges and actions {4, 5}, with an assessment of emissions reductions, and their implications, associated with long-term temperature outcomes up to the year 2100 {3}.[4] The assessment of modelled global pathways addresses ways of shifting development pathways towards sustainability. Strengthened collaboration between IPCC Working Groups is reflected in Cross-Working Group Boxes that integrate physical science, climate risks and adaptation, and the mitigation of climate change.[5]

---

1 The Report covers literature accepted for publication by 11 October 2021.

2 Each finding is grounded in an evaluation of underlying evidence and agreement. A level of confidence is expressed using five qualifiers, typeset in italics: *very low*, *low*, *medium*, *high* and *very high*. The assessed likelihood of an outcome or a result is described as: *virtually certain* 99–100% probability; *very likely* 90–100%; *likely* 66–100%; *more likely than not* 50–100%; *about as likely as not* 33–66%; *unlikely* 0–33%; *very unlikely* 0–10%; *exceptionally unlikely* 0–1%. Additional terms may also be used when appropriate, consistent with the IPCC uncertainty guidance: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf.

3 The three Special Reports are: Global Warming of 1.5°C: an IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (2018); Climate Change and Land: an IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (2019); IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (2019).

4 The term 'temperature' is used in reference to 'global surface temperatures' throughout this SPM as defined in footnote 8 of the AR6 WGI SPM (see note 14 of Table SPM.2). Emission pathways and associated temperature changes are calculated using various forms of models, as summarised in Box SPM.1 and Chapter 3, and discussed in Annex III.

5 Namely: Economic Benefits from Avoided Climate Impacts along Long-Term Mitigation Pathways {Cross-Working Group Box 1 in Chapter 3}; Urban: Cities and Climate Change {Cross-Working Group Box 2 in Chapter 8}; and Mitigation and Adaptation via the Bioeconomy {Cross-Working Group Box 3 in Chapter 12}.

- **Increasing diversity of analytic frameworks from multiple disciplines including social sciences.** This report identifies multiple analytic frameworks to assess the drivers of, barriers to and options for, mitigation action. These include: economic efficiency, including the benefits of avoided impacts; ethics and equity; interlinked technological and social transition processes; and socio-political frameworks, including institutions and governance {1, 3, 13, Cross-Chapter Box 12 in Chapter 16}. These help to identify risks and opportunities for action, including co-benefits and just and equitable transitions at local, national and global scales. {1, 3, 4, 5, 13, 14, 16, 17}

Section B of this Summary for Policymakers (SPM) assesses *Recent developments and current trends*, including data uncertainties and gaps. Section C, *System transformations to limit global warming*, identifies emission pathways and alternative mitigation portfolios consistent with limiting global warming to different levels, and assesses specific mitigation options at the sectoral and system level. Section D addresses *Linkages between mitigation, adaptation, and sustainable development*. Section E, *Strengthening the response*, assesses knowledge of how enabling conditions of institutional design, policy, finance, innovation and governance arrangements can contribute to climate change mitigation in the context of sustainable development.

B. Recent Developments and Current Trends

B.1 Total net anthropogenic GHG emissions[6] have continued to rise during the period 2010–2019, as have cumulative net CO_2 emissions since 1850. Average annual GHG emissions during 2010–2019 were higher than in any previous decade, but the rate of growth between 2010 and 2019 was lower than that between 2000 and 2009. (*high confidence*) (Figure SPM.1) {Figure 2.2, Figure 2.5, Table 2.1, 2.2, Figure TS.2}

B.1.1 Global net anthropogenic GHG emissions were 59 ± 6.6 $GtCO_2$-eq[7,8] in 2019, about 12% (6.5 $GtCO_2$-eq) higher than in 2010 and 54% (21 $GtCO_2$-eq) higher than in 1990. The annual average during the decade 2010–2019 was 56 ± 6.0 $GtCO_2$-eq, 9.1 $GtCO_2$-eq yr^{-1} higher than in 2000–2009. This is the highest increase in average decadal emissions on record. The average annual rate of growth slowed from 2.1% yr^{-1} between 2000 and 2009 to 1.3% yr^{-1} between 2010 and 2019. (*high confidence*) (Figure SPM.1) {Figure 2.2, Figure 2.5, Table 2.1, 2.2, Figure TS.2}

B.1.2 Growth in anthropogenic emissions has persisted across all major groups of GHGs since 1990, albeit at different rates. By 2019, the largest growth in absolute emissions occurred in CO_2 from fossil fuels and industry followed by CH_4, whereas the highest relative growth occurred in fluorinated gases, starting from low levels in 1990 (*high confidence*). Net anthropogenic CO_2 emissions from land use, land-use change and forestry (CO_2-LULUCF) are subject to large uncertainties and high annual variability, with *low confidence* even in the direction of the long-term trend.[9] (Figure SPM.1) {Figure 2.2, Figure 2.5, 2.2, Figure TS.2}

B.1.3 Historical cumulative net CO_2 emissions from 1850 to 2019 were 2400 ± 240 $GtCO_2$ (*high confidence*). Of these, more than half (58%) occurred between 1850 and 1989 [1400 ± 195 $GtCO_2$], and about 42% between 1990 and 2019 [1000 ± 90 $GtCO_2$]. About 17% of historical cumulative net CO_2 emissions since 1850 occurred between 2010 and 2019 [410 ± 30 $GtCO_2$].[10] By comparison, the current central estimate of the remaining carbon budget from 2020 onwards for limiting warming to 1.5°C with a probability of 50% has been assessed as 500 $GtCO_2$, and as 1150 $GtCO_2$ for a probability of 67% for limiting warming to 2°C. Remaining carbon budgets depend on the amount of non-CO_2 mitigation (±220 $GtCO_2$) and are further subject to geophysical uncertainties. Based on central estimates only, cumulative net CO_2 emissions between 2010 and 2019 compare to about four-fifths of the size of the remaining carbon budget from 2020 onwards for a 50% probability of limiting global warming to 1.5°C, and about one-third of the remaining carbon budget for a 67% probability to limit global warming to 2°C. Even when taking uncertainties into account, historical emissions between 1850 and 2019 constitute a large share of total carbon budgets for these global

---

[6] Net GHG emissions in this report refer to releases of greenhouse gases from anthropogenic sources minus removals by anthropogenic sinks, for those species of gases that are reported under the common reporting format of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): CO_2 from fossil fuel combustion and industrial processes (CO_2-FFI); net CO_2 emissions from land use, land-use change and forestry (CO_2-LULUCF); methane (CH_4); nitrous oxide (N_2O); and fluorinated gases (F-gases) comprising hydrofluorocarbons (HFCs), perfluorocarbons (PFCs), sulphur hexafluoride (SF_6), as well as nitrogen trifluoride (NF_3). Different datasets for GHG emissions exist, with varying time horizons and coverage of sectors and gases, including some that go back to 1850. In this report, GHG emissions are assessed from 1990, and CO_2 sometimes also from 1850. Reasons for this include data availability and robustness, scope of the assessed literature, and the differing warming impacts of non-CO_2 gases over time.

[7] GHG emission metrics are used to express emissions of different greenhouse gases in a common unit. Aggregated GHG emissions in this report are stated in CO_2-equivalent (CO_2-eq) using the Global Warming Potential with a time horizon of 100 years (GWP100) with values based on the contribution of Working Group I to the AR6. The choice of metric depends on the purpose of the analysis, and all GHG emission metrics have limitations and uncertainties, given that they simplify the complexity of the physical climate system and its response to past and future GHG emissions. {Cross-Chapter Box 2 in Chapter 2, Supplementary Material 2.SM.3, Box TS.2; AR6 WGI Chapter 7 Supplementary Material}

[8] In this SPM, uncertainty in historic GHG emissions is reported using 90% uncertainty intervals unless stated otherwise. GHG emission levels are rounded to two significant digits; as a consequence, small differences in sums due to rounding may occur.

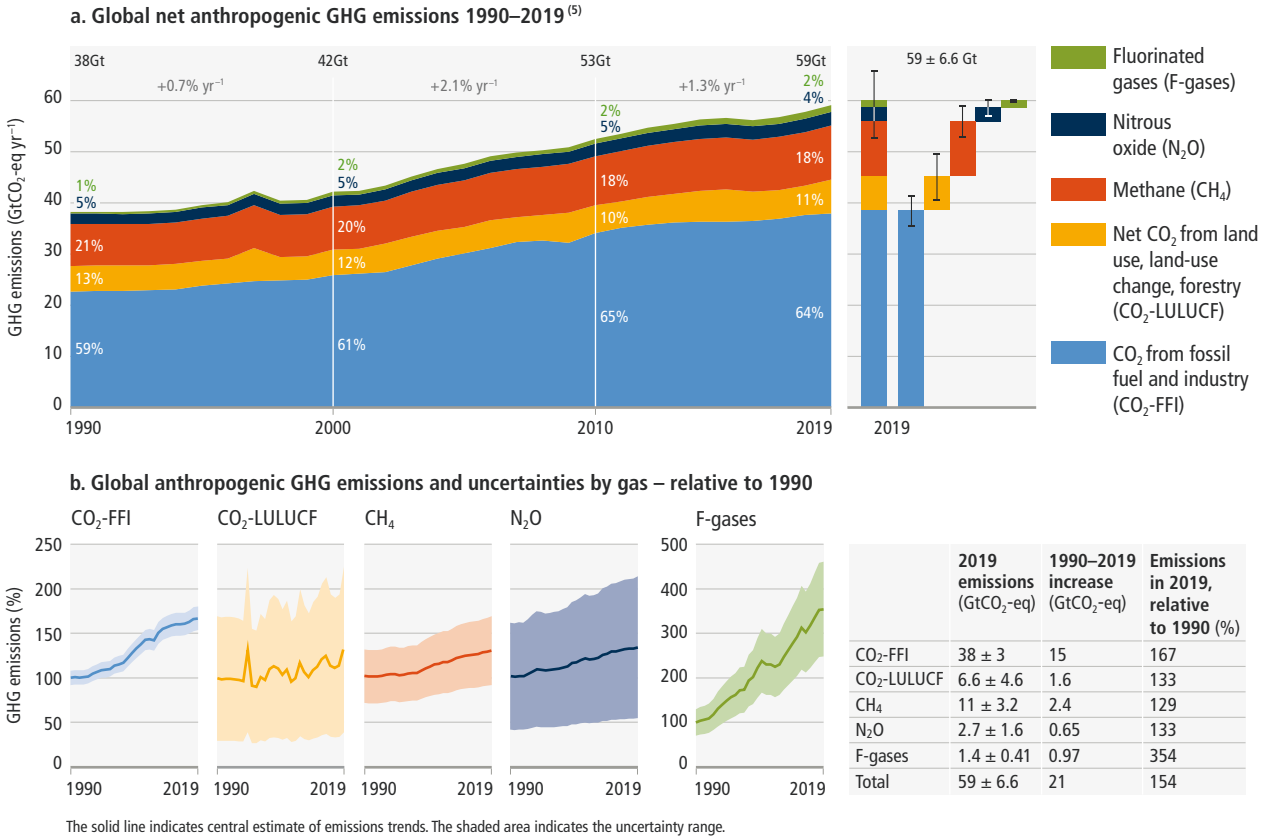
[9] Global databases make different choices about which emissions and removals occurring on land are considered anthropogenic. Currently, net CO_2 fluxes from land reported by global bookkeeping models used here are estimated to be about 5.5 $GtCO_2$ yr^{-1} higher than the aggregate global net emissions based on national GHG inventories. This difference, which has been considered in the literature, mainly reflects differences in how anthropogenic forest sinks and areas of managed land are defined. Other reasons for this difference, which are more difficult to quantify, can arise from the limited representation of land management in global models and varying levels of accuracy and completeness of estimated LULUCF fluxes in national GHG inventories. Neither method is inherently preferable. Even when the same methodological approach is applied, the large uncertainty of CO_2-LULUCF emissions can lead to substantial revisions to estimated emissions. {Cross-Chapter Box 3 in Chapter 3, 7.2, SRCCL SPM A.3.3}

[10] For consistency with WGI, historical cumulative CO_2 emissions from 1850 to 2019 are reported using 68% confidence intervals.

warming levels.[11,12] Based on central estimates only, historical cumulative net CO_2 emissions between 1850 and 2019 amount to about four-fifths[12] of the total carbon budget for a 50% probability of limiting global warming to 1.5°C (central estimate about 2900 $GtCO_2$), and to about two thirds[12] of the total carbon budget for a 67% probability to limit global warming to 2°C (central estimate about 3550 $GtCO_2$). {Figure 2.7, 2.2, Figure TS.3, WGI Table SPM.2}

B.1.4 Emissions of CO_2-FFI dropped temporarily in the first half of 2020 due to responses to the COVID-19 pandemic (*high confidence*), but rebounded by the end of the year (*medium confidence*). The annual average CO_2-FFI emissions reduction in 2020 relative to 2019 was about 5.8% [5.1–6.3%], or 2.2 [1.9–2.4] $GtCO_2$ (*high confidence*). The full GHG emissions impact of the COVID-19 pandemic could not be assessed due to a lack of data regarding non-CO_2 GHG emissions in 2020. {Cross-Chapter Box 1 in Chapter 1, Figure 2.6, 2.2, Box TS.1, Box TS.1 Figure 1}

Global net anthropogenic emissions have continued to rise across all major groups of greenhouse gases.



	2019 emissions ($GtCO_2$-eq)	1990–2019 increase ($GtCO_2$-eq)	Emissions in 2019, relative to 1990 (%)
CO_2-FFI	38 ± 3	15	167
CO_2-LULUCF	6.6 ± 4.6	1.6	133
CH_4	11 ± 3.2	2.4	129
N_2O	2.7 ± 1.6	0.65	133
F-gases	1.4 ± 0.41	0.97	354
Total	59 ± 6.6	21	154

Figure SPM.1 | Global net anthropogenic GHG emissions ($GtCO_2$-eq yr^{-1}) 1990–2019. Global net anthropogenic GHG emissions include CO_2 from fossil fuel combustion and industrial processes (CO_2-FFI); net CO_2 from land use, land-use change and forestry (CO_2-LULUCF)[9]; methane (CH_4); nitrous oxide (N_2O); and fluorinated gases (HFCs, PFCs, SF_6, NF_3).[6] **Panel a** shows aggregate annual global net anthropogenic GHG emissions by groups of gases from 1990 to 2019 reported in $GtCO_2$-eq converted based on global warming potentials with a 100-year time horizon (GWP100-AR6) from the IPCC Sixth Assessment Report Working Group I (Chapter 7). The fraction of global emissions for each gas is shown for 1990, 2000, 2010 and 2019; as well as the aggregate average annual growth rate between these decades. At the right side of Panel a, GHG emissions in 2019 are broken down into individual components with the associated uncertainties (90% confidence interval) indicated by the error bars: CO_2-FFI ±8%; CO_2-LULUCF ±70%; CH_4 ±30%; N_2O ±60%; F-gases ±30%; GHG ±11%. Uncertainties in GHG emissions are assessed in Supplementary Material 2.2. The single-year peak of emissions in 1997 was due to higher CO_2-LULUCF emissions from a forest and peat fire event in South East Asia. **Panel b** shows global anthropogenic CO_2-FFI, net CO_2-LULUCF, CH_4, N_2O and F-gas emissions individually for the period 1990–2019, normalised relative to 100 in 1990. Note the different scale for the included F-gas emissions compared to other gases, highlighting its rapid growth from a low base. Shaded areas indicate the uncertainty range. Uncertainty ranges as shown here are specific for individual groups of greenhouse gases and cannot be compared. The table shows the central estimate for: absolute emissions in 2019; the absolute change in emissions between 1990 and 2019; and emissions in 2019 expressed as a percentage of 1990 emissions. {2.2, Figure 2.5, Supplementary Material 2.2, Figure TS.2}

[11] The carbon budget is the maximum amount of cumulative net global anthropogenic CO_2 emissions that would result in limiting global warming to a given level with a given likelihood, taking into account the effect of other anthropogenic climate forcers. This is referred to as the 'total carbon budget' when expressed starting from the pre-industrial period, and as the 'remaining carbon budget' when expressed from a recent specified date. The total carbon budgets reported here are the sum of historical emissions from 1850 to 2019 and the remaining carbon budgets from 2020 onwards, which extend until global net zero CO_2 emissions are reached. {Annex I: Glossary; WGI SPM}

[12] Uncertainties for total carbon budgets have not been assessed and could affect the specific calculated fractions.

B.2 Net anthropogenic GHG emissions have increased since 2010 across all major sectors globally. An increasing share of emissions can be attributed to urban areas. Emissions reductions in CO_2 from fossil fuels and industrial processes (CO_2-FFI), due to improvements in energy intensity of GDP and carbon intensity of energy, have been less than emissions increases from rising global activity levels in industry, energy supply, transport, agriculture and buildings. (*high confidence*) {2.2, 2.4, 6.3, 7.2, 8.3, 9.3, 10.1, 11.2}

B.2.1 In 2019, approximately 34% (20 $GtCO_2$-eq) of total net anthropogenic GHG emissions came from the energy supply sector, 24% (14 $GtCO_2$-eq) from industry, 22% (13 $GtCO_2$-eq) from agriculture, forestry and other land use (AFOLU), 15% (8.7 $GtCO_2$-eq) from transport and 6% (3.3 $GtCO_2$-eq) from buildings.[13] If emissions from electricity and heat production are attributed to the sectors that use the final energy, 90% of these indirect emissions are allocated to the industry and buildings sectors, increasing their relative GHG emissions shares from 24% to 34%, and from 6% to 16%, respectively. After reallocating emissions from electricity and heat production, the energy supply sector accounts for 12% of global net anthropogenic GHG emissions. (*high confidence*) {Figure 2.12, 2.2, 6.3, 7.2, 9.3, 10.1, 11.2, Figure TS.6}

B.2.2 Average annual GHG emissions growth between 2010 and 2019 slowed compared to the previous decade in energy supply (from 2.3% to 1.0%) and industry (from 3.4% to 1.4%), but remained roughly constant at about 2% yr^{-1} in the transport sector (*high confidence*). Emissions growth in AFOLU, comprising emissions from agriculture (mainly CH_4 and N_2O) and forestry and other land use (mainly CO_2) is more uncertain than in other sectors due to the high share and uncertainty of CO_2-LULUCF emissions (*medium confidence*). About half of total net AFOLU emissions are from CO_2-LULUCF, predominantly from deforestation[14] (*medium confidence*). {Figure 2.13, 2.2, 6.3, 7.2, Figure 7.3, 9.3, 10.1, 11.2, TS.3}

B.2.3 The global share of emissions that can be attributed to urban areas is increasing. In 2015, urban emissions were estimated to be 25 $GtCO_2$-eq (about 62% of the global share) and in 2020, 29 $GtCO_2$-eq (67–72% of the global share).[15] The drivers of urban GHG emission are complex and include population size, income, state of urbanisation and urban form. (*high confidence*) {8.1, 8.3}

B.2.4 Global energy intensity (total primary energy per unit GDP) decreased by 2% yr^{-1} between 2010 and 2019. Carbon intensity (CO_2 from fossil fuel combustion and industrial processes (CO_2-FFI) per unit primary energy) decreased by 0.3% yr^{-1}, with large regional variations, over the same period mainly due to fuel switching from coal to gas, reduced expansion of coal capacity, and increased use of renewables. This reversed the trend observed for 2000–2009. For comparison, the carbon intensity of primary energy is projected to decrease globally by about 3.5% yr^{-1} between 2020 and 2050 in modelled scenarios that limit warming to 2°C (>67%), and by about 7.7% yr^{-1} globally in scenarios that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot.[16] (*high confidence*) {Figure 2.16, 2.2, 2.4, Table 3.4, 3.4, 6.3}

---

[13] Sector definitions can be found in Annex II.9.1.

[14] Land overall constituted a net sink of –6.6 (±4.6) $GtCO_2\,yr^{-1}$ for the period 2010–2019, comprising a gross sink of –12.5 (±3.2) $GtCO_2\,yr^{-1}$ resulting from responses of all land to both anthropogenic environmental change and natural climate variability, and net anthropogenic CO_2-LULUCF emissions +5.7 (±4.0) $GtCO_2\,yr^{-1}$ based on bookkeeping models. {Table 2.1, 7.2, Table 7.1}

[15] This estimate is based on consumption-based accounting, including both direct emissions from within urban areas, and indirect emissions from outside urban areas related to the production of electricity, goods and services consumed in cities. These estimates include all CO_2 and CH_4 emission categories except for aviation and marine bunker fuels, land-use change, forestry and agriculture. {8.1, Annex I: Glossary}

[16] See Box SPM.1 for the categorisation of modelled long-term emission scenarios based on projected temperature outcomes and associated probabilities adopted in this report.

B.3 Regional contributions[17] to global GHG emissions continue to differ widely. Variations in regional, and national per capita emissions partly reflect different development stages, but they also vary widely at similar income levels. The 10% of households with the highest per capita emissions contribute a disproportionately large share of global household GHG emissions. At least 18 countries have sustained GHG emission reductions for longer than 10 years. (*high confidence*) (Figure SPM.2) {Figure 1.1, Figure 2.9, Figure 2.10, Figure 2.25, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, Figure TS.4, Figure TS.5}

B.3.1 GHG emissions trends over 1990–2019 vary widely across regions and over time, and across different stages of development, as shown in Figure SPM.2. Average global per capita net anthropogenic GHG emissions increased from 7.7 to 7.8 tCO_2-eq, ranging from 2.6 tCO_2-eq to 19 tCO_2-eq across regions. Least developed countries (LDCs) and Small Island Developing States (SIDS) have much lower per capita emissions (1.7 tCO_2-eq and 4.6 tCO_2-eq, respectively) than the global average (6.9 tCO_2-eq), excluding CO_2-LULUCF.[18] (*high confidence*) (Figure SPM.2) {Figure1.2, Figure 2.9, Figure 2.10, 2.2, Figure TS.4}

B.3.2 Historical contributions to cumulative net anthropogenic CO_2 emissions between 1850 and 2019 vary substantially across regions in terms of total magnitude, but also in terms of contributions to CO_2-FFI (1650 ± 73 $GtCO_2$-eq) and net CO_2-LULUCF (760 ± 220 $GtCO_2$-eq) emissions.[10] Globally, the major share of cumulative CO_2-FFI emissions is concentrated in a few regions, while cumulative CO_2-LULUCF[9] emissions are concentrated in other regions. LDCs contributed less than 0.4% of historical cumulative CO_2-FFI emissions between 1850 and 2019, while SIDS contributed 0.5%. (*high confidence*) (Figure SPM.2) {Figure 2.10, 2.2, TS.3, Figure 2.7}

B.3.3 In 2019, around 48% of the global population lives in countries emitting on average more than 6 tCO_2-eq per capita, excluding CO_2-LULUCF. 35% live in countries emitting more than 9 tCO_2-eq per capita. Another 41% live in countries emitting less than 3 tCO_2-eq per capita. A substantial share of the population in these low-emitting countries lack access to modern energy services.[19] Eradicating extreme poverty, energy poverty, and providing decent living standards[20] to all in these regions in the context of achieving sustainable development objectives, in the near-term, can be achieved without significant global emissions growth. (*high confidence*) (Figure SPM.2) {Figure 1.2, 2.2, 2.4, 2.6, 3.7, 4.2, 6.7, Figure TS.4, Figure TS.5}

B.3.4 Globally, the 10% of households with the highest per capita emissions contribute 34–45% of global consumption-based household GHG emissions,[21] while the middle 40% contribute 40–53%, and the bottom 50% contribute 13–15%. (*high confidence*) {2.6, Figure 2.25}

B.3.5 At least 18 countries have sustained production-based GHG and consumption-based CO_2 emission reductions for longer than 10 years. Reductions were linked to energy supply decarbonisation, energy efficiency gains, and energy demand reduction, which resulted from both policies and changes in economic structure. Some countries have reduced production-based GHG emissions by a third or more since peaking, and some have achieved several years of consecutive reduction rates of around 4% yr^{-1}, comparable to global reductions in scenarios limiting warming to 2°C (>67%) or lower. These reductions have only partly offset global emissions growth. (*high confidence*) (Figure SPM.2) {Figure TS.4, 2.2, 1.3.2}

---

17 See Annex II, Part 1 for regional groupings adopted in this report.

18 In 2019, LDCs are estimated to have emitted 3.3% of global GHG emissions, and SIDS are estimated to have emitted 0.6% of global GHG emissions, excluding CO_2-LULUCF. These country groupings cut across geographic regions and are not depicted separately in Figure SPM.2. {Figure 2.10}

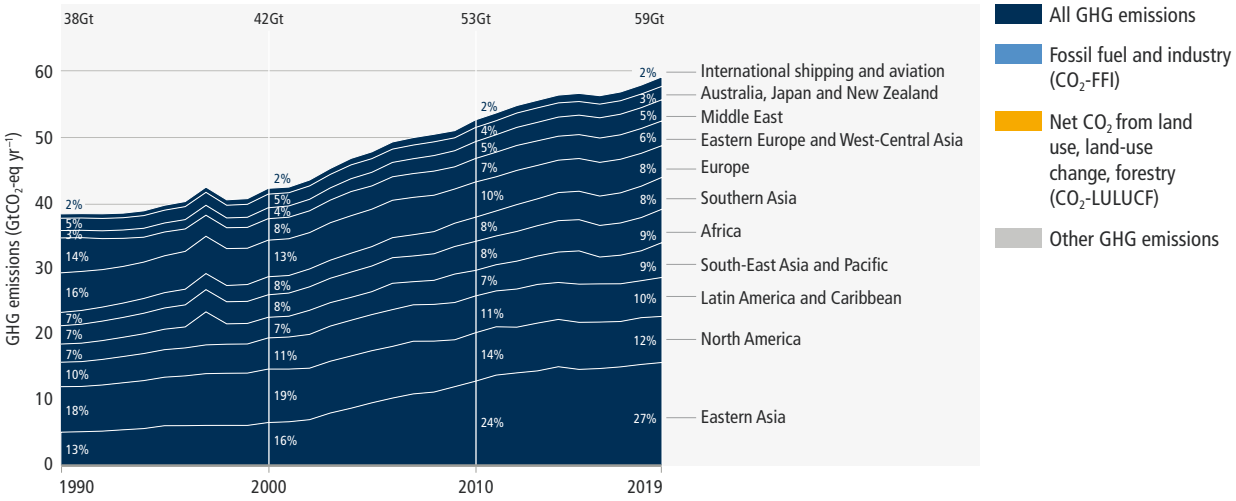
19 In this report, access to modern energy services is defined as access to clean, reliable and affordable energy services for cooking and heating, lighting, communications, and productive uses. {Annex I: Glossary}

20 In this report, decent living standards are defined as a set of minimum material requirements essential for achieving basic human well-being, including nutrition, shelter, basic living conditions, clothing, health care, education, and mobility. {5.1}

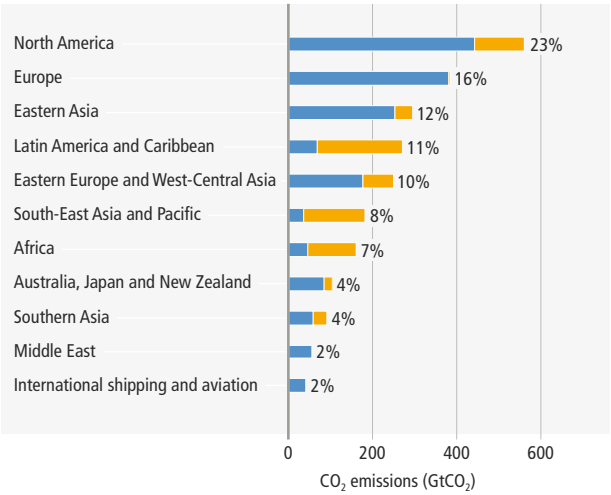
21 Consumption-based emissions refer to emissions released to the atmosphere to generate the goods and services consumed by a certain entity (e.g., a person, firm, country, or region). The bottom 50% of emitters spend less than USD3 PPP (purchasing power parity) per capita per day. The top 10% of emitters (an open-ended category) spend more than USD23 PPP per capita per day. The wide range of estimates for the contribution of the top 10% results from the wide range of spending in this category and differing methods in the assessed literature. {2.6, Annex I: Glossary}

Emissions have grown in most regions but are distributed unevenly, both in the present day and cumulatively since 1850.

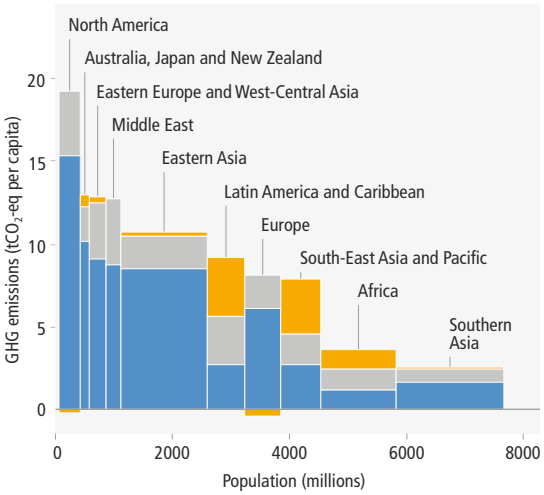
a. Global net anthropogenic GHG emissions by region (1990–2019)



b. Historical cumulative net anthropogenic CO_2 emissions per region (1850–2019)



c. Net anthropogenic GHG emissions per capita and for total population, per region (2019)



d. Regional indicators (2019) and regional production vs consumption accounting (2018)

	Africa	Australia, Japan, New Zealand	Eastern Asia	Eastern Europe, West-Central Asia	Europe	Latin America and Caribbean	Middle East	North America	South-East Asia and Pacific	Southern Asia
Population (million persons, 2019)	1292	157	1471	291	620	646	252	366	674	1836
GDP per capita (USD1000$_{ppp}$2017 per person)[1]	5.0	43	17	20	43	15	20	61	12	6.2
Net GHG 2019[2] (production basis)										
% GHG contributions	9%	3%	27%	6%	8%	10%	5%	12%	9%	8%
GHG emissions intensity (tCO_2-eq / USD1000$_{ppp}$ 2017)	0.78	0.30	0.62	0.64	0.18	0.61	0.64	0.31	0.65	0.42
GHG per capita (tCO_2-eq per person)	3.9	13	11	13	7.8	9.2	13	19	7.9	2.6
CO_2-FFI, 2018, per person										
Production-based emissions (tCO_2-FFI per person, based on 2018 data)	1.2	10	8.4	9.2	6.5	2.8	8.7	16	2.6	1.6
Consumption-based emissions (tCO_2-FFI per person, based on 2018 data)	0.84	11	6.7	6.2	7.8	2.8	7.6	17	2.5	1.5

[1] GDP per capita in 2019 in USD2017 currency purchasing power basis.
[2] Includes CO_2-FFI, CO_2-LULUCF and Other GHGs, excluding international aviation and shipping.

The regional groupings used in this figure are for statistical purposes only and are described in Annex II, Part I.

Figure SPM.2 | Regional GHG emissions, and the regional proportion of total cumulative production-based CO_2 emissions from 1850 to 2019.

Figure SPM.2 (continued): Regional GHG emissions, and the regional proportion of total cumulative production-based CO_2 emissions from 1850 to 2019. Panel a shows global net anthropogenic GHG emissions by region (in $GtCO_2$-eq yr^{-1} (GWP100-AR6)) for the time period 1990–2019.[6] Percentage values refer to the contribution of each region to total GHG emissions in each respective time period. The single-year peak of emissions in 1997 was due to higher CO_2-LULUCF emissions from a forest and peat fire event in South East Asia. Regions are as grouped in Annex II. **Panel b** shows the share of historical cumulative net anthropogenic CO_2 emissions per region from 1850 to 2019 in $GtCO_2$. This includes CO_2 from fossil fuel combustion and industrial processes (CO_2-FFI) and net CO_2 emissions from land use, land-use change, forestry (CO_2-LULUCF). Other GHG emissions are not included.[6] CO_2-LULUCF emissions are subject to high uncertainties, reflected by a global uncertainty estimate of ±70% (90% confidence interval). **Panel c** shows the distribution of regional GHG emissions in tonnes CO_2-eq per capita by region in 2019. GHG emissions are categorised into: CO_2-FFI; net CO_2-LULUCF; and other GHG emissions (methane, nitrous oxide, fluorinated gases, expressed in CO_2-eq using GWP100-AR6). The height of each rectangle shows per capita emissions, the width shows the population of the region, so that the area of the rectangles refers to the total emissions for each region. Emissions from international aviation and shipping are not included. In the case of two regions, the area for CO_2-LULUCF is below the axis, indicating net CO_2 removals rather than emissions. CO_2-LULUCF emissions are subject to high uncertainties, reflected by a global uncertainty estimate of ±70% (90% confidence interval). **Panel d** shows population, GDP per person, emission indicators by region in 2019 for percentage GHG contributions, total GHG per person, and total GHG emissions intensity, together with production-based and consumption-based CO_2-FFI data, which is assessed in this report up to 2018. Consumption-based emissions are emissions released to the atmosphere in order to generate the goods and services consumed by a certain entity (e.g., region). Emissions from international aviation and shipping are not included. {1.3, Figure 1.2, 2.2, Figure 2.9, Figure 2.10, Figure 2.11, Annex II}

B.4 The unit costs of several low-emission technologies have fallen continuously since 2010. Innovation policy packages have enabled these cost reductions and supported global adoption. Both tailored policies and comprehensive policies addressing innovation systems have helped overcome the distributional, environmental and social impacts potentially associated with global diffusion of low-emission technologies. Innovation has lagged in developing countries due to weaker enabling conditions. Digitalisation can enable emission reductions, but can have adverse side effects unless appropriately governed. (*high confidence*) (Figure SPM.3) {2.2, 6.3, 6.4, 7.2, 12.2, 16.2, 16.4, 16.5, Cross-Chapter Box 11 in Chapter 16}

B.4.1 From 2010 to 2019, there have been sustained decreases in the unit costs of solar energy (85%), wind energy (55%), and lithium-ion batteries (85%), and large increases in their deployment, e.g., >10× for solar and >100× for electric vehicles (EVs), varying widely across regions (Figure SPM.3). The mix of policy instruments which reduced costs and stimulated adoption includes public R&D, funding for demonstration and pilot projects, and demand pull instruments such as deployment subsidies to attain scale. In comparison to modular small-unit size technologies, the empirical record shows that multiple large-scale mitigation technologies, with fewer opportunities for learning, have seen minimal cost reductions and their adoption has grown slowly. (*high confidence*) {1.3, 1.5, Figure 2.5, 2.5, 6.3, 6.4, 7.2, 11.3, 12.2, 12.3, 12.6, 13.6, 16.3, 16.4, 16.6}

B.4.2 Policy packages tailored to national contexts and technological characteristics have been effective in supporting low-emission innovation and technology diffusion. Appropriately designed policies and governance have helped address distributional impacts and rebound effects. Innovation has provided opportunities to lower emissions and reduce emission growth and created social and environmental co-benefits (*high confidence*). Adoption of low-emission technologies lags in most developing countries, particularly least developed ones, due in part to weaker enabling conditions, including limited finance, technology development and transfer, and capacity. In many countries, especially those with limited institutional capacities, several adverse side effects have been observed as a result of diffusion of low-emission technology, for example, low-value employment, and dependency on foreign knowledge and suppliers. Low-emission innovation along with strengthened enabling conditions can reinforce development benefits, which can, in turn, create feedbacks towards greater public support for policy. (*medium confidence*) {9.9, 13.6, 13.7, 16.3, 16.4, 16.5, 16.6, Cross-Chapter Box 12 in Chapter 16, TS.3}

B.4.3 Digital technologies can contribute to mitigation of climate change and the achievement of several SDGs (*high confidence*). For example, sensors, internet of things, robotics, and artificial intelligence can improve energy management in all sectors, increase energy efficiency, and promote the adoption of many low-emission technologies, including decentralised renewable energy, while creating economic opportunities (*high confidence*). However, some of these climate change mitigation gains can be reduced or counterbalanced by growth in demand for goods and services due to the use of digital devices (*high confidence*). Digitalisation can involve trade-offs across several SDGs, for example, increasing electronic waste, negative impacts on labour markets, and exacerbating the existing digital divide. Digital technology supports decarbonisation only if appropriately governed (*high confidence*). {5.3, 10, 12.6, 16.2, Cross-Chapter Box 11 in Chapter 16, TS.5, Box TS.14}

The unit costs of some forms of renewable energy and of batteries for passenger EVs have fallen, and their use continues to rise.

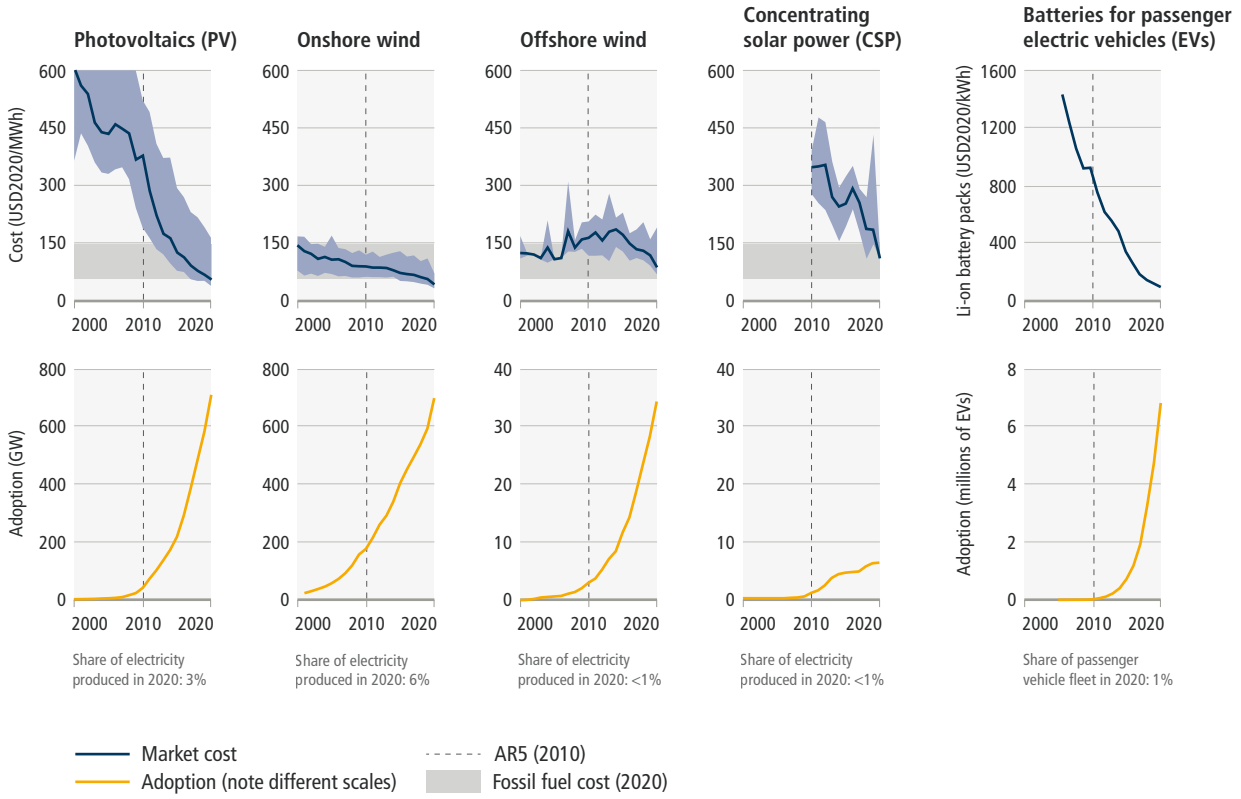


Figure SPM.3 | Unit cost reductions and use in some rapidly changing mitigation technologies. The **top panel** shows global costs per unit of energy (USD per MWh) for some rapidly changing mitigation technologies. Solid blue lines indicate average unit cost in each year. Light blue shaded areas show the range between the 5th and 95th percentiles in each year. Grey shading indicates the range of unit costs for new fossil fuel (coal and gas) power in 2020 (corresponding to USD55–148 per MWh). In 2020, the levelised costs of energy (LCOE) of the four renewable energy technologies could compete with fossil fuels in many places. For batteries, costs shown are for 1 kWh of battery storage capacity; for the others, costs are LCOE, which includes installation, capital, operations, and maintenance costs per MWh of electricity produced. The literature uses LCOE because it allows consistent comparisons of cost trends across a diverse set of energy technologies to be made. However, it does not include the costs of grid integration or climate impacts. Further, LCOE does not take into account other environmental and social externalities that may modify the overall (monetary and non-monetary) costs of technologies and alter their deployment. The **bottom panel** shows cumulative global adoption for each technology, in GW of installed capacity for renewable energy and in millions of vehicles for battery-electric vehicles. A vertical dashed line is placed in 2010 to indicate the change since AR5. Shares of electricity produced and share of passenger vehicle fleet are indicated in text for 2020 based on provisional data, i.e., percentage of total electricity production (for PV, onshore wind, offshore wind, CSP) and of total stock of passenger vehicles (for EVs). The electricity production share reflects different capacity factors; for example, for the same amount of installed capacity, wind produces about twice as much electricity as solar PV. {2.5, 6.4} Renewable energy and battery technologies were selected as illustrative examples because they have recently shown rapid changes in costs and adoption, and because consistent data are available. Other mitigation options assessed in the report are not included as they do not meet these criteria.

B.5 There has been a consistent expansion of policies and laws addressing mitigation since AR5. This has led to the avoidance of emissions that would otherwise have occurred and increased investment in low-GHG technologies and infrastructure. Policy coverage of emissions is uneven across sectors. Progress on the alignment of financial flows towards the goals of the Paris Agreement remains slow and tracked climate finance flows are distributed unevenly across regions and sectors. (*high confidence*) {5.6, 13.2, 13.4, 13.5, 13.6, 13.9, 14.3, 14.4, 14.5, Cross-Chapter Box 10 in Chapter 14, 15.3, 15.5}

B.5.1 The Kyoto Protocol led to reduced emissions in some countries and was instrumental in building national and international capacity for GHG reporting, accounting and emissions markets (*high confidence*). At least 18 countries that had Kyoto targets for the first commitment period have had sustained absolute emission reductions for at least a decade from 2005, of which two were countries with economies in transition (*very high confidence*). The Paris Agreement, with near universal participation, has led to policy development and target-setting at national and sub-national levels, in particular in relation to mitigation, as well as enhanced transparency of climate action and support (*medium confidence*). {14.3, 14.6}

B.5.2 The application of diverse policy instruments for mitigation at the national and sub-national levels has grown consistently across a range of sectors (*high confidence*). By 2020, over 20% of global GHG emissions were covered by carbon taxes or emissions trading systems, although coverage and prices have been insufficient to achieve deep reductions (*medium confidence*). By 2020, there were 'direct' climate laws focused primarily on GHG reductions in 56 countries covering 53% of global emissions (*medium confidence*). Policy coverage remains limited for emissions from agriculture and the production of industrial materials and feedstocks (*high confidence*). {5.6, 7.6, 11.5, 11.6, 13.2, 13.6}

B.5.3 In many countries, policies have enhanced energy efficiency, reduced rates of deforestation and accelerated technology deployment, leading to avoided and in some cases reduced or removed emissions (*high confidence*). Multiple lines of evidence suggest that mitigation policies have led to avoided global emissions of several $GtCO_2$-eq yr^{-1} (*medium confidence*). At least 1.8 $GtCO_2$-eq yr^{-1} can be accounted for by aggregating separate estimates for the effects of economic and regulatory instruments. Growing numbers of laws and executive orders have impacted global emissions and were estimated to result in 5.9 $GtCO_2$-eq yr^{-1} less emissions in 2016 than they otherwise would have been. (*medium confidence*) (Figure SPM.3) {2.2, 2.8, 6.7, 7.6, 9.9, 10.8, 13.6, Cross-chapter Box 10 in Chapter 14}

B.5.4 Annual tracked total financial flows for climate mitigation and adaptation increased by up to 60% between 2013/14 and 2019/20 (in USD2015), but average growth has slowed since 2018[22] (*medium confidence*). These financial flows remained heavily focused on mitigation, are uneven, and have developed heterogeneously across regions and sectors (*high confidence*). In 2018, public and publicly mobilised private climate finance flows from developed to developing countries were below the collective goal under the UNFCCC and Paris Agreement to mobilise USD100 billion per year by 2020 in the context of meaningful mitigation action and transparency on implementation (*medium confidence*). Public and private finance flows for fossil fuels are still greater than those for climate adaptation and mitigation (*high confidence*). Markets for green bonds, ESG (environmental, social and governance) and sustainable finance products have expanded significantly since AR5. Challenges remain, in particular around integrity and additionality, as well as the limited applicability of these markets to many developing countries. (*high confidence*) {Box 15.4, 15.3, 15.5, 15.6, Box 15.7}

[22] Estimates of financial flows (comprising both private and public, domestic and international flows) are based on a single report which assembles data from multiple sources and which has applied various changes to their methodology over the past years. Such data can suggest broad trends but is subject to uncertainties.

B.6 Global GHG emissions in 2030 associated with the implementation of Nationally Determined Contributions (NDCs) announced prior to COP26[23] would make it *likely* that warming will exceed 1.5°C during the 21st century.[24] *Likely* limiting warming to below 2°C would then rely on a rapid acceleration of mitigation efforts after 2030. Policies implemented by the end of 2020[25] are projected to result in higher global GHG emissions than those implied by NDCs. (*high confidence*) (Figure SPM.4) {3.3, 3.5, 4.2, Cross-Chapter Box 4 in Chapter 4}

B.6.1 Policies implemented by the end of 2020 are projected to result in higher global GHG emissions than those implied by NDCs, indicating an implementation gap. A gap remains between global GHG emissions in 2030 associated with the implementation of NDCs announced prior to COP26 and those associated with modelled mitigation pathways assuming immediate action (for quantification see Table SPM.1).[26] The magnitude of the emissions gap depends on the global warming level considered and whether only unconditional or also conditional elements of NDCs[27] are considered.[28] (*high confidence*) {3.5, 4.2, Cross-Chapter Box 4 in Chapter 4}

B.6.2 Global emissions in 2030 associated with the implementation of NDCs announced prior to COP26 are lower than the emissions implied by the original NDCs[29] (*high confidence*). The original emissions gap has fallen by about 20% to one-third relative to pathways that limit warming to 2°C (>67%) with immediate action (category C3a in Table SPM.2), and by about 15–20% relative to pathways limiting warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot (category C1 in Table SPM.2) (*medium confidence*). (Figure SPM.4) {3.5, 4.2, Cross-Chapter Box 4 in Chapter 4}

Table SPM.1 | Projected global emissions in 2030 associated with policies implemented by the end of 2020 and NDCs announced prior to COP26, and associated emissions gaps. *Emissions projections for 2030 and absolute differences in emissions are based on emissions of 52–56 $GtCO_2$-eq yr^{-1} in 2019 as assumed in underlying model studies. (*medium confidence*) {4.2, Table 4.3, Cross-Chapter Box 4 in Chapter 4}

	Implied by policies implemented by the end of 2020 ($GtCO_2$-eq yr^{-1})	Implied by NDCs announced prior to COP26	
		Unconditional elements ($GtCO_2$-eq yr^{-1})	Including conditional elements ($GtCO_2$-eq yr^{-1})
Median projected global emissions (min–max)*	57 [52–60]	53 [50–57]	50 [47–55]
Implementation gap between implemented policies and NDCs (median)		4	7
Emissions gap between NDCs and pathways that limit warming to 2°C (>67%) with immediate action		10–16	6–14
Emissions gap between NDCs and pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot with immediate action		19–26	16–23

[23] NDCs announced prior to COP26 refer to the most recent Nationally Determined Contributions submitted to the UNFCCC up to the literature cut-off date of this report, 11 October 2021, and revised NDCs announced by China, Japan and the Republic of Korea prior to October 2021 but only submitted thereafter. 25 NDC updates were submitted between 12 October 2021 and the start of COP26.

[24] This implies that mitigation after 2030 can no longer establish a pathway with less than 67% probability to exceed 1.5°C during the 21st century, a defining feature of the class of pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot assessed in this report (category C1 in Table SPM.2). These pathways limit warming to 1.6°C or lower throughout the 21st century with a 50% likelihood.

[25] The policy cut-off date in studies used to project GHG emissions of 'policies implemented by the end of 2020' varies between July 2019 and November 2020. {Table 4.2}

[26] Immediate action in modelled global pathways refers to the adoption between 2020 and at latest before 2025 of climate policies intended to limit global warming to a given level. Modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) based on immediate action are summarised in category C3a in Table SPM.2. All assessed modelled global pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot assume immediate action as defined here (Category C1 in Table SPM.2).

[27] In this report, 'unconditional' elements of NDCs refer to mitigation efforts put forward without any conditions. 'Conditional' elements refer to mitigation efforts that are contingent on international cooperation, for example bilateral and multilateral agreements, financing or monetary and/or technological transfers. This terminology is used in the literature and the UNFCCC's NDC Synthesis Reports, not by the Paris Agreement. {4.2.1, 14.3.2}

[28] Two types of gaps are assessed: the implementation gap is calculated as the difference between the median of global emissions in 2030 implied by policies implemented by the end of 2020 and those implied by NDCs announced prior to COP26. The emissions gap is calculated as the difference between GHG emissions implied by the NDCs (minimum/maximum emissions in 2030) and the median of global GHG emissions in modelled pathways limiting warming to specific levels based on immediate action and with stated likelihoods as indicated (Table SPM.2).

[29] Original NDCs refer to those submitted to the UNFCCC in 2015 and 2016. Unconditional elements of NDCs announced prior to COP26 imply global GHG emissions in 2030 that are 3.8 [3.0–5.3] $GtCO_2$-eq yr^{-1} lower than those from the original NDCs, and 4.5 [2.7–6.3] $GtCO_2$-eq yr^{-1} lower when conditional elements of NDCs are included. NDC updates at or after COP26 could further change the implied emissions.

B.6.3 Modelled global emission pathways consistent with NDCs announced prior to COP26 that limit warming to 2°C (>67%) (category C3b in Table SPM.2) imply annual average global GHG emissions reduction rates of 0–0.7 $GtCO_2$-eq yr^{-1} during the decade 2020–2030, with an unprecedented acceleration to 1.4–2.0 $GtCO_2$-eq yr^{-1} during 2030–2050 (*medium confidence*). Continued investments in unabated high-emitting infrastructure and limited development and deployment of low-emitting alternatives prior to 2030 would act as barriers to this acceleration and increase feasibility risks (*high confidence*). {3.3, 3.5, 3.8, Cross-Chapter Box 5 in Chapter 4}

B.6.4 Modelled global emission pathways consistent with NDCs announced prior to COP26 will *likely* exceed 1.5°C during the 21st century. Those pathways that then return warming to 1.5°C by 2100 with a likelihood of 50% or greater imply a temperature overshoot of 0.15°C–0.3°C (42 pathways in category C2 in Table SPM.2). In such pathways, global cumulative net-negative CO_2 emissions are –380 [–860 to –200] $GtCO_2$[30] in the second half of the century, and there is a rapid acceleration of other mitigation efforts across all sectors after 2030. Such overshoot pathways imply increased climate-related risk, and are subject to increased feasibility concerns,[31] and greater social and environmental risks, compared to pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot. (*high confidence*) (Figure SPM.4, Table SPM.2) {3.3, 3.5, 3.8, 12.3; AR6 WGII SPM B.6}

Projected global GHG emissions from NDCs announced prior to COP26 would make it *likely* that warming will exceed 1.5°C and also make it harder after 2030 to limit warming to below 2°C.

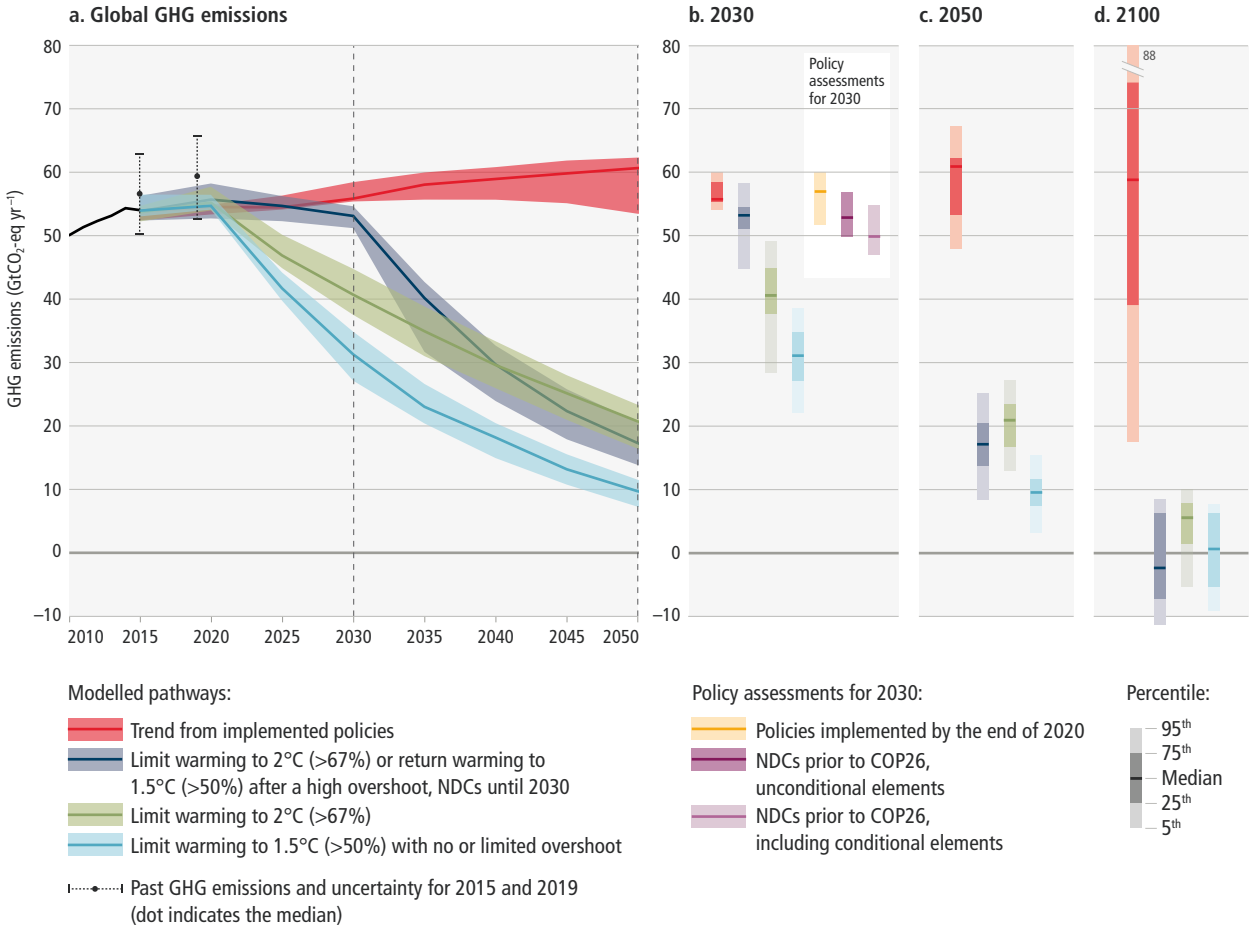


Figure SPM.4 | Global GHG emissions of modelled pathways (funnels in Panel a, and associated bars in Panels b, c, d) and projected emission outcomes from near-term policy assessments for 2030 (Panel b).

[30] Median and *very likely* range [5th to 95th percentile].

[31] Returning to below 1.5°C in 2100 from GHG emissions levels in 2030 associated with the implementation of NDCs is infeasible for some models due to model-specific constraints on the deployment of mitigation technologies and the availability of net negative CO_2 emissions.

Figure SPM.4 (continued): Global GHG emissions of modelled pathways (funnels in Panel a, and associated bars in Panels b, c, d) and projected emission outcomes from near-term policy assessments for 2030 (Panel b). Panel a shows global GHG emissions over 2015–2050 for four types of assessed modelled global pathways:

- Trend from implemented policies: Pathways with projected near-term GHG emissions in line with policies implemented until the end of 2020 and extended with comparable ambition levels beyond 2030 (29 scenarios across categories C5–C7, Table SPM.2).
- Limit to 2°C (>67%) or return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot, NDCs until 2030: Pathways with GHG emissions until 2030 associated with the implementation of NDCs announced prior to COP26, followed by accelerated emissions reductions *likely* to limit warming to 2°C (C3b, Table SPM.2) or to return warming to 1.5°C with a probability of 50% or greater after high overshoot (subset of 42 scenarios from C2, Table SPM.2).
- Limit to 2°C (>67%) with immediate action: Pathways that limit warming to 2°C (>67%) with immediate action after 2020[26] (C3a, Table SPM.2).
- Limit to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot: Pathways limiting warming to 1.5°C with no or limited overshoot (C1, Table SPM.2 C1). All these pathways assume immediate action after 2020.

Past GHG emissions for 2010–2015 used to project global warming outcomes of the modelled pathways are shown by a black line[32] and past global GHG emissions in 2015 and 2019 as assessed in Chapter 2 are shown by whiskers. **Panels b, c and d** show snapshots of the GHG emission ranges of the modelled pathways in 2030, 2050, and 2100, respectively. Panel b also shows projected emissions outcomes from near-term policy assessments in 2030 from Chapter 4.2 (Tables 4.2 and 4.3; median and full range). GHG emissions are in CO_2-equivalent using GWP100 from AR6 WGI. {3.5, 4.2, Table 4.2, Table 4.3, Cross-Chapter Box 4 in Chapter 4}

B.7 Projected cumulative future CO_2 emissions over the lifetime of existing and currently planned fossil fuel infrastructure without additional abatement exceed the total cumulative net CO_2 emissions in pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot. They are approximately equal to total cumulative net CO_2 emissions in pathways that limit warming to 2°C (>67%). (*high confidence*) {2.7, 3.3}

B.7.1 If historical operating patterns are maintained,[33] and without additional abatement,[34] estimated cumulative future CO_2 emissions from existing fossil fuel infrastructure, the majority of which is in the power sector, would, from 2018 until the end of its lifetime, amount to 660 [460–890] $GtCO_2$. They would amount to 850 [600–1100] $GtCO_2$ when unabated emissions from currently planned infrastructure in the power sector is included. These estimates compare with cumulative global net CO_2 emissions from all sectors of 510 [330–710] $GtCO_2$ until the time of reaching net zero CO_2 emissions[35] in pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, and 890 [640–1160] $GtCO_2$ in pathways that limit warming to 2°C (>67%). (*high confidence*) (Table SPM.2) {2.7, Figure 2.26, Figure TS.8}

B.7.2 In modelled global pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower, most remaining fossil fuel CO_2 emissions until the time of global net zero CO_2 emissions are projected to occur outside the power sector, mainly in industry and transport. Decommissioning and reduced utilisation of existing fossil fuel-based power sector infrastructure, retrofitting existing installations with CCS,[36] switches to low-carbon fuels, and cancellation of new coal installations without CCS are major options that can contribute to aligning future CO_2 emissions from the power sector with emissions in the assessed global modelled least-cost pathways. The most appropriate strategies will depend on national and regional circumstances, including enabling conditions and technology availability. (*high confidence*) (Box SPM.1) {Table 2.7, 2.7, 3.4, 6.3, 6.5, 6.7}

---

[32] See Box SPM.1 for a description of the approach to project global warming outcomes of modelled pathways and its consistency with the climate assessment in AR6 WGI.

[33] Historical operating patterns are described by load factors and lifetimes of fossil fuel installations as observed in the past (average and range).

[34] Abatement here refers to human interventions that reduce the amount of greenhouse gases that are released from fossil fuel infrastructure to the atmosphere.

[35] Total cumulative CO_2 emissions up to the time of global net zero CO_2 emissions are similar but not identical to the remaining carbon budget for a given temperature limit assessed by Working Group I. This is because the modelled emission scenarios assessed by Working Group III cover a range of temperature levels up to a specific limit, and exhibit a variety of reductions in non-CO_2 emissions that also contribute to overall warming. {Box 3.4}

[36] In this context, capture rates of new installations with CCS are assumed to be 90–95%+ {11.3.5}. Capture rates for retrofit installations can be comparable, if plants are specifically designed for CCS retrofits {11.3.6}.

C. System Transformations to Limit Global Warming

C.1 Global GHG emissions are projected to peak between 2020 and at the latest before 2025 in global modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot and in those that limit warming to 2°C (>67%) and assume immediate action (see Table SPM.2 footnote i).[37] In both types of modelled pathways, rapid and deep GHG emissions reductions follow throughout 2030, 2040 and 2050 (*high confidence*). Without a strengthening of policies beyond those that are implemented by the end of 2020, GHG emissions are projected to rise beyond 2025, leading to a median global warming of 3.2 [2.2 to 3.5] °C by 2100[38,39] (*medium confidence*). (Table SPM.2, Figure SPM.4, Figure SPM.5) {3.3, 3.4}

C.1.1 Net global GHG emissions are projected to fall from 2019 levels by 27% [13–45%] by 2030 and 63% [52–76%][40] by 2050 in global modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) and assuming immediate action (category C3a, Table SPM.2). This compares with reductions of 43% [34–60%] by 2030 and 84% [73–98%] by 2050 in pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot (C1, Table SPM.2) (*high confidence*).[41] In modelled pathways that return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot,[42] GHG emissions are reduced by 23% [0–44%] in 2030 and by 75% [62–91%] in 2050 (C2, Table SPM.2) (*high confidence*). Modelled pathways that are consistent with NDCs announced prior to COP26 until 2030 and assume no increase in ambition thereafter have higher emissions, leading to a median global warming of 2.8 [2.1–3.4] °C by 2100 (*medium confidence*).[23] (Figure SPM.4) {3.3}

C.1.2 In modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) assuming immediate action, global net CO_2 emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 27% [11–46%] in 2030 and by 52% [36–70%] in 2040; and global CH_4 emissions are reduced by 24% [9–53%] in 2030 and by 37% [20–60%] in 2040. In pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot global net CO_2 emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 48% [36–69%] in 2030 and by 80% [61–109%] in 2040; and global CH_4 emissions are reduced by 34% [21–57%] in 2030 and 44% [31–63%] in 2040. There are similar reductions of non-CO_2 emissions by 2050 in both types of pathways: CH_4 is reduced by 45% [25–70%]; N_2O is reduced by 20% [–5 to +55%]; and F-gases are reduced by 85% [20–90%].[43] Across most modelled pathways, this is the maximum technical potential for anthropogenic CH_4 reductions in the underlying models (*high confidence*). Further emissions reductions, as illustrated by the IMP-SP pathway, may be achieved through changes in activity levels and/or technological innovations beyond those represented in the majority of the pathways (*medium confidence*). Higher emissions reductions of CH_4 could further reduce peak warming. (*high confidence*) (Figure SPM.5) {3.3}

C.1.3 In modelled pathways consistent with the continuation of policies implemented by the end of 2020, GHG emissions continue to rise, leading to global warming of 3.2 [2.2–3.5] °C by 2100 (within C5–C7, Table SPM.2) (*medium confidence*). Pathways that exceed warming of >4°C (≥50%) (C8, SSP5-8.5, Table SPM.2) would imply a reversal of current technology and/or mitigation policy trends (*medium confidence*). Such warming could occur in emission pathways consistent with policies implemented by the end of 2020 if climate sensitivity is higher than central estimates (*high confidence*). (Table SPM.2, Figure SPM.4) {3.3, Box 3.3}

---

37 All reported warming levels are relative to the period 1850–1900. If not otherwise specified, 'pathways' always refer to pathways computed with a model. Immediate action in the pathways refers to the adoption of climate policies between 2020 and at latest 2025 intended to limit global warming at a given level.

38 Long-term warming is calculated from all modelled pathways assuming mitigation efforts consistent with national policies that were implemented by the end of 2020 (scenarios that fall into policy category P1b of Chapter 3) and that pass through the 2030 GHG emissions ranges of such pathways assessed in Chapter 4 (see footnote 25). {3.2, Table 4.2}

39 Warming estimates refer to the 50th and [5th–95th] percentile across the modelled pathways and the median temperature change estimate of the probabilistic WGI climate model emulators (see Table SPM.2 footnote a).

40 In this report, emissions reductions are reported relative to 2019 modelled emission levels, while in SR1.5 emissions reductions were calculated relative to 2010. Between 2010 and 2019 global GHG and global CO_2 emissions have grown by 12% (6.5 $GtCO_2$-eq) and 13% (5.0 $GtCO_2$) respectively. In global modelled pathways assessed in this report that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, GHG emissions are projected to be reduced by 37% [28–57%] in 2030 relative to 2010. In the same type of pathways assessed in SR1.5, reported GHG emissions reductions in 2030 were 39–51% (interquartile range) relative to 2010. In absolute terms, the 2030 GHG emissions levels of pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot are higher in AR6 (31 [21–36] $GtCO_2$-eq) than in SR1.5 (28 (26–31 interquartile range) $GtCO_2$-eq). (Figure SPM.1, Table SPM.2) {3.3, SR1.5 Figure SPM.3b}

41 Scenarios in this category limit peak warming to 2°C throughout the 21st century with close to, or more than, 90% likelihood.

42 This category contains 91 scenarios with immediate action and 42 scenarios that are consistent with the NDCs until 2030.

43 These numbers for CH_4, N_2O, and F-gases are rounded to the nearest 5% except numbers below 5%.

Table SPM.2 | Key characteristics of the modelled global emissions pathways. Summary of projected CO_2 and GHG emissions, projected net zero timings and the resulting global warming outcomes. Pathways are categorised (rows), according to their likelihood of limiting warming to different peak warming levels (if peak temperature occurs before 2100) and 2100 warming levels. Values shown are for the median [p50] and 5th–95th percentiles [p5–p95], noting that not all pathways achieve net zero CO_2 or GHGs.

p50 [p5–p95] [a]			GHG emissions ($GtCO_2$-eq yr^{-1}) [g]			GHG emissions reductions from 2019 (%) [h]			Emissions milestones [i,j]				Cumulative CO_2 emissions ($GtCO_2$) [m]		Cumulative net-negative CO_2 emissions ($GtCO_2$)	Global mean temperature changes 50% probability (°C) [n]		Likelihood of peak global warming staying below (%) [o]		
Category [b,c,d] [# pathways]	Category/subset label	WGI SSP & WGIII IPs/IMPs alignment [e,f]	2030	2040	2050	2030	2040	2050	Peak CO_2 emissions (% peak before 2100)	Peak GHG emissions (% peak before 2100)	Net zero CO_2 (% net zero pathways)	Net zero GHGs (% net zero pathways) [k,l]	2020 to net zero CO_2	2020–2100	Year of net zero CO_2 to 2100	at peak warming	2100	<1.5°C	<2.0°C	<3.0°C
Modelled global emissions pathways categorised by projected global warming levels (GWL). Detailed likelihood definitions are provided in SPM Box 1. The five illustrative scenarios (SSPx-yy) considered by AR6 WGI and the Illustrative (Mitigation) Pathways assessed in WGIII are aligned with the temperature categories and are indicated in a separate column. Global emission pathways contain regionally differentiated information. This assessment focuses on their global characteristics.			Projected median annual GHG emissions in the year across the scenarios, with the 5th–95th percentile in brackets. Modelled GHG emissions in 2019: 55 [53–58] $GtCO_2$-eq.			Projected median GHG emissions reductions of pathways in the year across the scenarios compared to modelled 2019, with the 5th–95th percentile in brackets. Negative numbers indicate increase in emissions compared to 2019.			Median 5-year intervals at which projected CO_2 & GHG emissions peak, with the 5th–95th percentile interval in square brackets. Percentage of peaking pathways is denoted in round brackets. Three dots (…) denotes emissions peak in 2100 or beyond for that percentile.		Median 5-year intervals at which projected CO_2 & GHG emissions of pathways in this category reach net zero, with the 5th–95th percentile interval in square brackets. Percentage of net zero pathways is denoted in round brackets. Three dots (…) denotes net zero not reached for that percentile.		Median cumulative net CO_2 emissions across the projected scenarios in this category until reaching net zero or until 2100, with the 5th–95th percentile interval in square brackets.		Median cumulative net-negative CO_2 emissions between the year of net zero CO_2 and 2100. More net-negative results in greater temperature declines after peak.	Projected temperature change of pathways in this category (50% probability across the range of climate uncertainties), relative to 1850–1900, at peak warming and in 2100, for the median value across the scenarios and the 5th–95th percentile interval in square brackets.		Median likelihood that the projected pathways in this category stay below a given global warming level, with the 5th–95th percentile interval in square brackets.		
C1 [97]	**limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot**		31 [21–36]	17 [6–23]	9 [1–15]	43 [34–60]	69 [58–90]	84 [73–98]	2020–2025 (100%) [2020–2025]		2050–2055 (100%) [2035–2070]	2095–2100 (52%) [2050–…]	510 [330–710]	320 [–210 to 570]	–220 [–660 to –20]	1.6 [1.4–1.6]	1.3 [1.1–1.5]	38 [33–58]	90 [86–97]	100 [99–100]
C1a [50]	**… with net zero GHGs**	SSP1–1.9, SP LD	33 [22–37]	18 [6–24]	8 [0–15]	41 [31–59]	66 [58–89]	85 [72–100]				2070–2075 (100%) [2050–2090]	550 [340–760]	160 [–220 to 620]	–360 [–680 to –140]	1.6 [1.4–1.6]	1.2 [1.1–1.4]	38 [34–60]	90 [85–98]	100 [99–100]
C1b [47]	**… without net zero GHGs**	Ren	29 [21–36]	16 [7–21]	9 [4–13]	48 [35–61]	70 [62–87]	84 [76–93]				…–… [0%] […–…]	460 [320–590]	360 [10–540]	–60 [–440 to 0]	1.6 [1.5–1.6]	1.4 [1.3–1.5]	37 [33–56]	89 [87–96]	100 [99–100]
C2 [133]	**return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot**	Neg	42 [31–55]	25 [17–34]	14 [5–21]	23 [0–44]	55 [40–71]	75 [62–91]	2020–2025 (100%) [2020–2030]	[2020–2025]	2055–2060 (100%) [2045–2070]	2070–2075 (87%) [2055–…]	720 [530–930]	400 [–90 to 620]	–360 [–680 to –60]	1.7 [1.5–1.8]	1.4 [1.2–1.5]	24 [15–42]	82 [71–93]	100 [99–100]
C3 [311]	**limit warming to 2°C (>67%)**		44 [32–55]	29 [20–36]	20 [13–26]	21 [1–42]	46 [34–63]	64 [53–77]	2020–2025 (100%) [2020–2030]	[2020–2025]	2070–2075 (93%) [2055–…]	…–… (30%) [2075–…]	890 [640–1160]	800 [510–1140]	–40 [–290 to 0]	1.7 [1.6–1.8]	1.6 [1.5–1.8]	20 [13–41]	76 [68–91]	99 [98–100]
C3a [204]	**… with action starting in 2020**	SSP1–2.6	40 [30–49]	29 [21–36]	20 [14–27]	27 [13–45]	47 [35–63]	63 [52–76]	2020–2025 (100%) [2020–2025]		2070–2075 (91%) [2055–…]	…–… (24%) [2080–…]	860 [640–1180]	790 [480–1150]	–30 [–280 to 0]	1.7 [1.6–1.8]	1.6 [1.5–1.8]	21 [14–42]	78 [69–91]	100 [98–100]

Table SPM.2 (continued):

p50 [p5–p95] [a]			GHG emissions ($GtCO_2$-eq yr^{-1}) [g]			GHG emissions reductions from 2019 (%) [h]			Emissions milestones [i,j]				Cumulative CO_2 emissions ($GtCO_2$) [m]		Cumulative net-negative CO_2 emissions ($GtCO_2$)	Global mean temperature changes 50% probability (°C) [n]		Likelihood of peak global warming staying below (%) [o]		
Category [b,c,d] [# pathways]	Category/subset label	WGI SSP & WGIII IPs/IMPs alignment [e,f]	2030	2040	2050	2030	2040	2050	Peak CO_2 emissions (% peak before 2100)	Peak GHG emissions (% peak before 2100)	Net zero CO_2 (% net zero pathways)	Net zero GHGs (% net zero pathways) [k,l]	2020 to net zero CO_2	2020–2100	Year of net zero CO_2 to 2100	at peak warming	2100	<1.5°C	<2.0°C	<3.0°C
Modelled global emissions pathways categorised by projected global warming levels (GWL). Detailed likelihood definitions are provided in SPM Box 1. The five illustrative scenarios (SSPx-yy) considered by AR6 WGI and the Illustrative (Mitigation) Pathways assessed in WGIII are aligned with the temperature categories and are indicated in a separate column. Global emission pathways contain regionally differentiated information. This assessment focuses on their global characteristics.			Projected median annual GHG emissions in the year across the scenarios, with the 5th–95th percentile in brackets. Modelled GHG emissions in 2019: 55 [53–58] $GtCO_2$-eq.			Projected median GHG emissions reductions of pathways in the year across the scenarios compared to modelled 2019, with the 5th–95th percentile in brackets. Negative numbers indicate increase in emissions compared to 2019.			Median 5-year intervals at which projected CO_2 & GHG emissions peak, with the 5th–95th percentile interval in square brackets. Percentage of peaking pathways is denoted in round brackets. Three dots (…) denotes emissions peak in 2100 or beyond for that percentile.		Median 5-year intervals at which projected CO_2 & GHG emissions of pathways in this category reach net zero, with the 5th–95th percentile interval in square brackets. Percentage of net zero pathways is denoted in round brackets. Three dots (…) denotes net zero not reached for that percentile.		Median cumulative net CO_2 emissions across the projected scenarios in this category until reaching net zero or until 2100, with the 5th–95th percentile interval in square brackets.		Median cumulative net-negative CO_2 emissions between the year of net zero CO_2 and 2100. More net-negative results in greater temperature declines after peak.	Projected temperature change of pathways in this category (50% probability across the range of climate uncertainties), relative to 1850–1900, at peak warming and in 2100, for the median value across the scenarios and the 5th–95th percentile interval in square brackets.		Median likelihood that the projected pathways in this category stay below a given global warming level, with the 5th–95th percentile interval in square brackets.		
C3b [97]	**… NDCs until 2030**	GS	52 [47–56]	29 [20–36]	18 [10–25]	5 [0–14]	46 [34–63]	68 [56–82]			2065–2070 (97%) [2055–2090]	…–… (41%) [2075–…]	910 [720–1150]	800 [560–1050]	–60 [–300 to 0]	1.8 [1.6–1.8]	1.6 [1.5–1.7]	17 [12–35]	73 [67–87]	99 [98–99]
C4 [159]	**limit warming to 2°C (>50%)**		50 [41–56]	38 [28–44]	28 [19–35]	10 [0–27]	31 [20–50]	49 [35–65]	2020–2025 (100%) [2020–2030]		2080–2085 (86%) [2065–…]	…–… (31%) [2075–…]	1210 [970–1490]	1160 [700–1490]	–30 [–390 to 0]	1.9 [1.7–2.0]	1.8 [1.5–2.0]	11 [7–22]	59 [50–77]	98 [95–99]
C5 [212]	**limit warming to 2.5°C (>50%)**		52 [46–56]	45 [37–53]	39 [30–49]	6 [–1 to 18]	18 [4–33]	29 [11–48]			…–… (41%) [2080–…]	…–… (12%) [2090–…]	1780 [1400–2360]	1780 [1260–2360]	0 [–160 to 0]	2.2 [1.9–2.5]	2.1 [1.9–2.5]	4 [0–10]	37 [18–59]	91 [83–98]
C6 [97]	**limit warming to 3°C (>50%)**	SSP2–4.5 ModAct	54 [50–62]	53 [48–61]	52 [45–57]	2 [–10 to 11]	3 [–14 to 14]	5 [–2 to 18]	2030–2035 (96%) 2020–2025 (97%) [2020–2090]		no net zero		no net zero	2790 [2440–3520]	no net zero	temperature does not peak by 2100	2.7 [2.4–2.9]	0 [0–0]	8 [2–18]	71 [53–88]
C7 [164]	**limit warming to 4°C (>50%)**	SSP3–7.0 CurPol	62 [53–69]	67 [56–76]	70 [58–83]	–11 [–18 to 3]	–19 [–31 to 1]	–24 [–41 to –2]	2085–2090 (57%) 2090–2095 (56%) [2040–…]					4220 [3160–5000]			3.5 [2.8–3.9]	0 [0–0]	0 [0–2]	22 [7–60]
C8 [29]	**exceed warming of 4°C (≥50%)**	SSP5–8.5	71 [69–81]	80 [78–96]	88 [82–112]	–20 [–34 to –17]	–35 [–65 to –29]	–46 [–92 to –36]	2080–2085 (90%) [2070–…]					5600 [4910–7450]			4.2 [3.7–5.0]	0 [0–0]	0 [0–0]	4 [0–11]

Table SPM.2 (continued):

[a] Values in the table refer to the 50th and [5th–95th] percentile values across the pathways falling within a given category as defined in Box SPM.1. For emissions-related columns these values relate to the distribution of all the pathways in that category. Harmonised emissions values are given for consistency with projected global warming outcomes using climate emulators. Based on the assessment of climate emulators in AR6 WGI (WG1 Chapter 7, Box 7.1), two climate emulators are used for the probabilistic assessment of the resulting warming of the pathways. For the 'Temperature change' and 'Likelihood' columns, the single upper-row values represent the 50th percentile across the pathways in that category and the median [50th percentile] across the warming estimates of the probabilistic MAGICC climate model emulator. For the bracketed ranges, the median warming for every pathway in that category is calculated for each of the two climate model emulators (MAGICC and FaIR). Subsequently, the 5th and 95th percentile values across all pathways for each emulator are calculated. The coolest and warmest outcomes (i.e., the lowest p5 of two emulators, and the highest p95, respectively) are shown in square brackets. These ranges therefore cover both the uncertainty of the emissions pathways as well as the climate emulators' uncertainty.

[b] For a description of pathways categories see Box SPM.1.

[c] All global warming levels are relative to 1850–1900. (See footnote n below and Box SPM.1[45] for more details.)

[d] C3 pathways are sub-categorised according to the timing of policy action to match the emissions pathways in Figure SPM.4. Two pathways derived from a cost-benefit analysis have been added to C3a, whilst 10 pathways with specifically designed near-term action until 2030, whose emissions fall below those implied by NDCs announced prior to COP26, are not included in either of the two subsets.

[e] Alignment with the categories of the illustrative SSP scenarios considered in AR6 WGI, and the Illustrative (Mitigation) Pathways (IPs/IMPs) of WGIII. The IMPs have common features such as deep and rapid emissions reductions, but also different combinations of sectoral mitigation strategies. See Box SPM.1 for an introduction of the IPs and IMPs, and Chapter 3 for full descriptions. {3.2, 3.3, Annex III.II.4}

[f] The Illustrative Mitigation Pathway 'Neg' has extensive use of carbon dioxide removal (CDR) in the AFOLU, energy and the industry sectors to achieve net negative emissions. Warming peaks around 2060 and declines to below 1.5°C (50% likelihood) shortly after 2100. Whilst technically classified as C3, it strongly exhibits the characteristics of C2 high-overshoot pathways, hence it has been placed in the C2 category. See Box SPM.1 for an introduction of the IPs and IMPs.

[g] The 2019 range of harmonised GHG emissions across the pathways [53–58 $GtCO_2$-eq] is within the uncertainty ranges of 2019 emissions assessed in Chapter 2 [53–66 $GtCO_2$-eq].[49] (Figure SPM.1, Figure SPM.2, Box SPM.1)

[h] Rates of global emission reduction in mitigation pathways are reported on a pathway-by-pathway basis relative to harmonised modelled global emissions in 2019 rather than the global emissions reported in SPM Section B and Chapter 2; this ensures internal consistency in assumptions about emission sources and activities, as well as consistency with temperature projections based on the physical climate science assessment by WGI.[49] {Annex III.II.2.5}. Negative values (e.g., in C7, C8) represent an increase in emissions.

[i] Emissions milestones are provided for five-year intervals in order to be consistent with the underlying five-year time-step data of the modelled pathways. Peak emissions (CO_2 and GHGs) are assessed for five-year reporting intervals starting in 2020. The interval 2020–2025 signifies that projected emissions peak as soon as possible between 2020 and at latest before 2025. The upper five-year interval refers to the median interval within which the emissions peak or reach net zero. Ranges in square brackets underneath refer to the range across the pathways, comprising the lower bound of the 5th percentile five-year interval and the upper bound of the 95th percentile five-year interval. Numbers in round brackets signify the fraction of pathways that reach specific milestones.

[j] Percentiles reported across all pathways in that category include those that do not reach net zero before 2100 (fraction of pathways reaching net zero is given in round brackets). If the fraction of pathways that reach net zero before 2100 is lower than the fraction of pathways covered by a percentile (e.g., 0.95 for the 95th percentile), the percentile is not defined and denoted with '…'. The fraction of pathways reaching net zero includes all with reported non-harmonised, and/or harmonised emissions profiles that reach net zero. Pathways were counted when at least one of the two profiles fell below 100 $MtCO_2\ yr^{-1}$ until 2100.

[k] The timing of net zero is further discussed in SPM C2.4 and Cross-Chapter Box 3 in Chapter 3 on net zero CO_2 and net zero GHG emissions.

[l] For cases where models do not report all GHGs, missing GHG species are infilled and aggregated into a Kyoto basket of GHG emissions in CO_2-eq defined by the 100-year global warming potential. For each pathway, reporting of CO_2, CH_4, and N_2O emissions was the minimum required for the assessment of the climate response and the assignment to a climate category. Emissions pathways without climate assessment are not included in the ranges presented here. {See Annex III.II.5}

[m] Cumulative emissions are calculated from the start of 2020 to the time of net zero and 2100, respectively. They are based on harmonised net CO_2 emissions, ensuring consistency with the WGI assessment of the remaining carbon budget.[50] {Box 3.4}

[n] Global mean temperature change for category (at peak, if peak temperature occurs before 2100, and in 2100) relative to 1850–1900, based on the median global warming for each pathway assessed using the probabilistic climate model emulators calibrated to the AR6 WGI assessment.[12] (See also Box SPM.1) {Annex III.II.2.5; WGI Cross-Chapter Box 7.1}

[o] Probability of staying below the temperature thresholds for the pathways in each category, taking into consideration the range of uncertainty from the climate model emulators consistent with the AR6 WGI assessment. The probabilities refer to the probability at peak temperature. Note that in the case of temperature overshoot (e.g., category C2 and some pathways in C1), the probabilities of staying below at the end of the century are higher than the probabilities at peak temperature.

C.1.4 Global modelled pathways falling into the lowest temperature category of the assessed literature (C1, Table SPM.2) are on average associated with a higher median peak warming in AR6 compared to pathways in the same category in SR1.5. In the modelled pathways in AR6, the likelihood of limiting warming to 1.5°C has on average declined compared to SR1.5. This is because GHG emissions have risen since 2017, and many recent pathways have higher projected emissions by 2030, higher cumulative net CO_2 emissions and slightly later dates for reaching net zero CO_2 or net zero GHG emissions. High mitigation challenges, for example, due to assumptions of slow technological change, high levels of global population growth, and high fragmentation as in the Shared Socio-economic Pathway SSP3, may render modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower infeasible. (*medium confidence*) (Table SPM.2, Box SPM.1) {3.3, 3.8, Annex III Figure II.1, Annex III Figure II.3}

Box SPM.1 | Assessment of Modelled Global Emission Scenarios

A wide range of modelled global emission pathways and scenarios from the literature is assessed in this report, including pathways and scenarios with and without mitigation.[44] Emissions pathways and scenarios project the evolution of GHG emissions based on a set of internally consistent assumptions about future socio-economic conditions and related mitigation measures.[45] These are quantitative projections and are neither predictions nor forecasts. Around half of all modelled global emission scenarios assume cost-effective approaches that rely on least-cost emission abatement options globally. The other half look at existing policies and regionally and sectorally differentiated actions. Most do not make explicit assumptions about global equity, environmental justice or intra-regional income distribution. Global emission pathways, including those based on cost-effective approaches, contain regionally differentiated assumptions and outcomes, and have to be assessed with the careful recognition of these assumptions. This assessment focuses on their global characteristics. The majority of the assessed scenarios (about 80%) have become available since the SR1.5, but some were assessed in that report. Scenarios with and without mitigation were categorised based on their projected global warming over the 21st century, following the same scheme as in the SR1.5 for warming up to and including 2°C. {1.5, 3.2, 3.3, Annex III.II.2, Annex III.II.3}

Scenario categories are defined by their likelihood of exceeding global warming levels (at peak and in 2100) and referred to in this report as follows:[46,47]

- Category C1 comprises modelled scenarios that limit warming to 1.5°C in 2100 with a likelihood of greater than 50%, and reach or exceed warming of 1.5°C during the 21st century with a likelihood of 67% or less. In this report, these scenarios are referred to as scenarios that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot. Limited overshoot refers to exceeding 1.5°C global warming by up to about 0.1°C and for up to several decades.[48]
- Category C2 comprises modelled scenarios that limit warming to 1.5°C in 2100 with a likelihood of greater than 50%, and exceed warming of 1.5°C during the 21st century with a likelihood of greater than 67%. In this report, these scenarios are also referred to as scenarios that return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot. High overshoot refers to temporarily exceeding 1.5°C global warming by 0.1°C–0.3°C for up to several decades.
- Category C3 comprises modelled scenarios that limit peak warming to 2°C throughout the 21st century with a likelihood of greater than 67%. In this report, these scenarios are also referred to as scenarios that limit warming to 2°C (>67%).
- Categories C4, C5, C6 and C7 comprise modelled scenarios that limit warming to 2°C, 2.5°C, 3°C, 4°C, respectively, throughout the 21st century with a likelihood of greater than 50%. In some scenarios in C4 and many scenarios in C5–C7, warming continues beyond the 21st century.

---

[44] In the literature, the terms 'pathways' and 'scenarios' are used interchangeably, with the former more frequently used in relation to climate goals. For this reason, this SPM uses mostly the term (emissions and mitigation) pathways. {Annex III.II.1.1}

[45] Key assumptions relate to technology development in agriculture and energy systems and socio-economic development, including demographic and economic projections. IPCC is neutral with regard to the assumptions underlying the scenarios in the literature assessed in this report, which do not cover all possible futures. Additional scenarios may be developed. The underlying population assumptions range from 8.5 to 9.7 billion in 2050 and 7.4 to 10.9 billion in 2100 (5–95th percentile) starting from 7.6 billion in 2019. The underlying assumptions on global GDP growth (ppp) range from 2.5 to 3.5% per year in the 2019–2050 period and 1.3 to 2.1% per year in the 2050–2100 (5–95th percentile). Many underlying assumptions are regionally differentiated. {1.5; 3.2; 3.3; Figure 3.9; Annex III.II.1.4; Annex III.II.3}

[46] The future scenario projections presented here are consistent with the total observed increase in global surface temperature between 1850–1900 and 1995–2014 as well as to 2011–2020 (with best estimates of 0.85°C and 1.09°C, respectively) assessed in WGI. The largest contributor to historical human-induced warming is CO_2, with historical cumulative CO_2 emissions from 1850 to 2019 being 2400 ± 240 $GtCO_2$. {WGI SPM A.1.2, WGI Table SPM.2, WGI Table 5.1, WGIII SPM Section B}.

[47] In case no explicit likelihood is provided, the reported warming levels are associated with a likelihood of >50%.

[48] Scenarios in this category are found to have simultaneous likelihood to limit peak global warming to 2°C throughout the 21st century of close to and more than 90%.

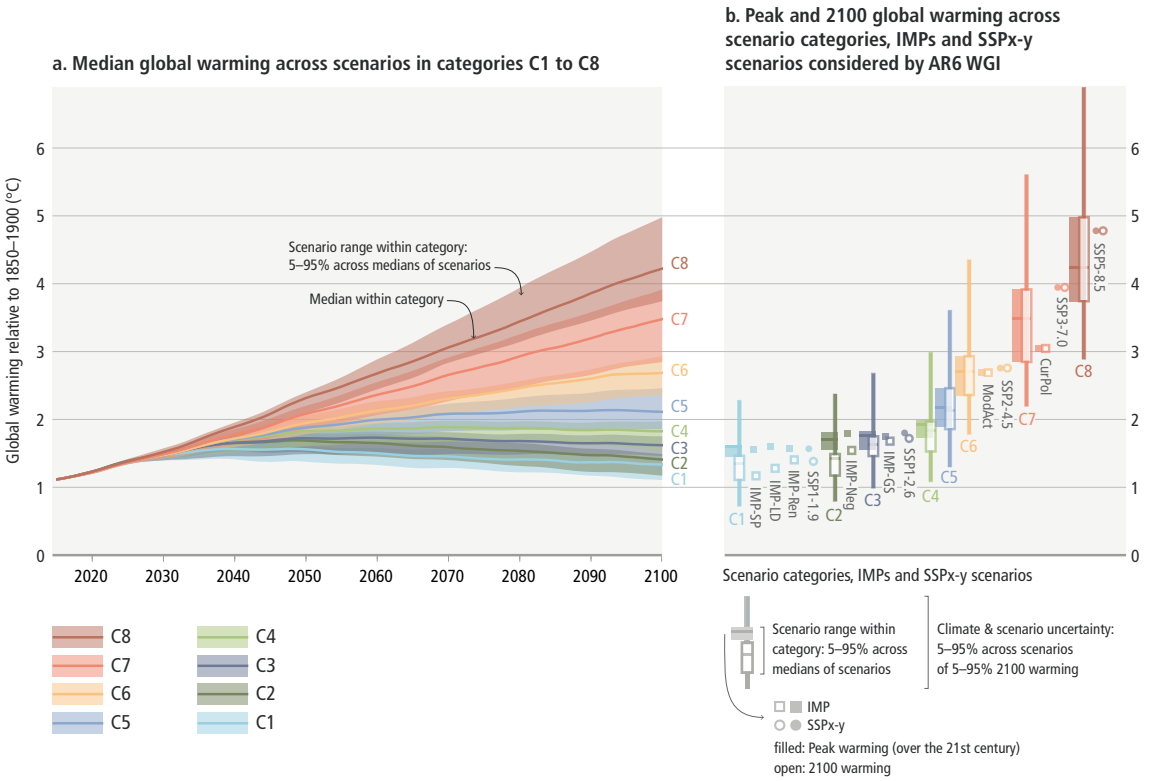
Box SPM.1 (continued)

- Category C8 comprises modelled scenarios that exceed warming of 4°C during the 21st century with a likelihood of 50% or greater. In these scenarios warming continues to rise beyond the 21st century.

Categories of modelled scenarios are distinct and do not overlap; they do not contain categories consistent with lower levels of global warming, for example, the category of C3 scenarios that limit warming to 2°C (>67%) does not include the C1 and C2 scenarios that limit or return warming to 1.5°C (>50%). Where relevant, scenarios belonging to the group of categories C1–C3 are referred to in this report as scenarios that limit warming to 2°C (>67%) or lower.

Methods to project global warming associated with the scenarios were updated to ensure consistency with the AR6 WGI assessment of physical climate science.[49] {3.2, Annex III.II.2.5; AR6 WGI Cross-Chapter Box 7.1}

The range of assessed scenarios results in a range of 21st century projected global warming.



Box SPM.1, Figure 1 | Projected global mean warming of the ensemble of modelled scenarios included in the climate categories C1–C8 and IMPs (based on emulators calibrated to the WGI assessment), as well as five illustrative scenarios (SSPx-y) as considered by AR6 WGI. **Panel a** shows the p5–p95 range of projected median warming across global modelled pathways within a category, with the category medians (line). **Panel b** shows the peak and 2100 emulated temperature outcomes for the categories C1 to C8 and for IMPs, and the five illustrative scenarios (SSPx-y) as considered by AR6 WGI. The boxes show the p5–p95 range within each scenario category, as in panel a. The combined p5–p95 range across scenarios and the climate uncertainty for each category C1–C8 is also shown for 2100 warming (thin vertical lines). (Table SPM.2) {Figure 3.11; AR6 WGI Figure SPM.8}

[49] This involved improved methodologies to use climate emulators (MAGICC7 and FAIR v1.6), which were evaluated and calibrated to closely match the global warming response to emissions as assessed in AR6 WGI. It included harmonisation of global GHG emissions in 2015 in modelled scenarios (51–56 $GtCO_2$-eq; 5th to 95th percentiles) with the corresponding emission value underlying the CMIP6 projected climate response assessed by WGI (54 $GtCO_2$-eq), based on similar data sources of historical emissions that are updated over time. The assessment of past GHG emissions in Chapter 2 of the report is based on a more recent dataset providing emissions of 57 [±6.3] $GtCO_2$-eq in 2015 (B.1). Differences are well within the assessed uncertainty range, and arise mainly from differences in estimated CO_2-LULUCF emissions, which are subject to large uncertainties, high annual variability and revisions over time. Projected rates of global emission reduction in mitigation scenarios are reported relative to modelled global emissions in 2019 rather than the global emissions reported in Chapter 2; this ensures internal consistency in assumptions about emission sources and activities, as well as consistency with temperature projections based on the physical climate science assessment by WG I. {Annex III.II.2.5}

Box SPM.1 (continued)

These updated methods affect the categorisation of some scenarios. On average across scenarios, peak global warming is projected to be lower by up to about 0.05 [±0.1] °C than if the same scenarios were evaluated using the SR1.5 methodology, and global warming in 2100 is projected to be lower by about 0.1 [±0.1] °C. {Annex III.II.2.5.1, Annex III Figure II.3}

Resulting changes to the emission characteristics of scenario categories described in Table SPM.2 interact with changes in the characteristics of the wider range of emission scenarios published since the SR1.5. Proportionally more scenarios assessed in AR6 are designed to limit temperature overshoot and more scenarios limit large-scale net negative CO_2 emissions than in SR1.5. As a result, AR6 scenarios in the lowest temperature category (C1) generally reach net zero GHG emissions later in the 21st century than scenarios in the same category assessed in SR1.5, and about half do not reach net zero GHG by 2100. The rate of decline of GHG emissions in the near term by 2030 in category C1 scenarios is very similar to the assessed rate in SR1.5, but absolute GHG emissions of category C1 scenarios in AR6 are slightly higher in 2030 than in SR1.5, since the reductions start from a higher emissions level in 2020. (Table SPM.2) {Annex III, 2.5, 3.2, 3.3}

The large number of global emissions scenarios assessed, including 1202 scenarios with projected global warming outcomes using climate emulators, come from a wide range of modelling approaches. They include the five illustrative scenarios (Shared Socio-economic Pathways; SSPs) assessed by WGI for their climate outcomes but cover a wider and more varied set in terms of assumptions and modelled outcomes. For this assessment, Illustrative Mitigation Pathways (IMPs) were selected from this larger set to illustrate a range of different mitigation strategies that would be consistent with different warming levels. The IMPs illustrate pathways that achieve deep and rapid emissions reductions through different combinations of mitigation strategies. The IMPs are not intended to be comprehensive and do not address all possible themes in the underlying report. They differ in terms of their focus, for example, placing greater emphasis on renewables (IMP-Ren), deployment of carbon dioxide removal that results in net negative global GHG emissions (IMP-Neg), and efficient resource use as well as shifts in consumption patterns globally, leading to low demand for resources, while ensuring a high level of services and satisfying basic needs (IMP-LD) (Figure SPM.5). Other IMPs illustrate the implications of a less rapid introduction of mitigation measures followed by a subsequent gradual strengthening (IMP-GS), and how shifting global pathways towards sustainable development, including by reducing inequality, can lead to mitigation (IMP-SP). The IMPs reach different climate goals as indicated in Table SPM.2 and Box SPM.1, Figure 1. {1.5, 3.1, 3.2, 3.3, 3.6, Figure 3.7, Figure 3.8, Box 3.4, Annex III.II.2.4}

C.2 Global net zero CO_2 emissions are reached in the early 2050s in modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, and around the early 2070s in modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%). Many of these pathways continue to net negative CO_2 emissions after the point of net zero. These pathways also include deep reductions in other GHG emissions. The level of peak warming depends on cumulative CO_2 emissions until the time of net zero CO_2 and the change in non-CO_2 climate forcers by the time of peaking. Deep GHG emissions reductions by 2030 and 2040, particularly reductions of methane emissions, lower peak warming, reduce the likelihood of overshooting warming limits and lead to less reliance on net negative CO_2 emissions that reverse warming in the latter half of the century. Reaching and sustaining global net zero GHG emissions results in a gradual decline in warming. (*high confidence*) (Table SPM.2) {3.3, 3.5, Box 3.4, Cross-Chapter Box 3 in Chapter 3, AR6 WGI SPM D1.8}

C.2.1 Modelled global pathways limiting warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot are associated with projected cumulative net CO_2 emissions[50] until the time of net zero CO_2 of 510 [330–710] $GtCO_2$. Pathways limiting warming to 2°C (>67%) are associated with 890 [640–1160] $GtCO_2$ (Table SPM.2). (*high confidence*) {3.3, Box 3.4}

C.2.2 Modelled global pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot involve more rapid and deeper near-term GHG emissions reductions through to 2030, and are projected to have less net negative CO_2 emissions and less carbon dioxide removal (CDR) in the longer term, than pathways that return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot (C2 category). Modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) have on average lower net negative CO_2 emissions compared to pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot and pathways that return warming

[50] Cumulative net CO_2 emissions from the beginning of the year 2020 until the time of net zero CO_2 in assessed pathways are consistent with the remaining carbon budgets assessed by WGI, taking account of the ranges in the WGIII temperature categories and warming from non-CO_2 gases. {Box 3.4}

to 1.5°C (>50%) after a high overshoot (C1 and C2 categories respectively). Modelled pathways that return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot (C2 category) show near-term GHG emissions reductions similar to pathways that limit warming to 2°C (>67%) (C3 category). For a given peak global warming level, greater and more rapid near-term GHG emissions reductions are associated with later net zero CO_2 dates. (*high confidence*) (Table SPM.2) {3.3, Table 3.5, Cross-Chapter Box 3 in Chapter 3, Annex I: Glossary}

C.2.3 Future non-CO_2 warming depends on reductions in non-CO_2 GHGs, aerosols and their precursors, and ozone precursor emissions. In modelled global low-emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls. Non-CO_2 GHG emissions at the time of net zero CO_2 are projected to be of similar magnitude in modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower. These non-CO_2 GHG emissions are about 8 [5–11] $GtCO_2$-eq yr^{-1}, with the largest fraction from CH_4 (60% [55–80%]), followed by N_2O (30% [20–35%]) and F-gases (3% [2–20%]).[51] Due to the short lifetime of CH_4 in the atmosphere, projected deep reduction of CH_4 emissions up until the time of net zero CO_2 in modelled mitigation pathways effectively reduces peak global warming. (*high confidence*) {3.3; AR6 WGI SPM D1.7}

C.2.4 At the time of global net zero GHG emissions, net negative CO_2 emissions counterbalance metric-weighted non-CO_2 GHG emissions. Typical emissions pathways that reach and sustain global net zero GHG emissions based on the 100-year global warming potential (GWP-100)[7] are projected to result in a gradual decline of global warming. About half of the assessed pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot (C1 category) reach net zero GHG emissions during the second half of the 21st century. These pathways show greater reduction in global warming after the peak to 1.2 [1.1–1.4] °C by 2100 than modelled pathways in the same category that do not reach net zero GHG emissions before 2100 and that result in warming of 1.4 [1.3–1.5] °C by 2100. In modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) (C3 category), there is no significant difference in warming by 2100 between those pathways that reach net zero GHGs (around 30%) and those that do not (*high confidence*). In pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower and that do reach net zero GHG, net zero GHG occurs around 10–40 years later than net zero CO_2 emissions (*medium confidence*). {Cross-Chapter Box 2 in Chapter 2, 3.3, Cross-Chapter Box 3 in Chapter 3; AR6 WGI SPM D1.8}

C.3 All global modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, and those that limit warming to 2°C (>67%), involve rapid and deep and in most cases immediate GHG emission reductions in all sectors. Modelled mitigation strategies to achieve these reductions include transitioning from fossil fuels without CCS to very low- or zero-carbon energy sources, such as renewables or fossil fuels with CCS, demand side measures and improving efficiency, reducing non-CO_2 emissions, and deploying carbon dioxide removal (CDR) methods to counterbalance residual GHG emissions. Illustrative Mitigation Pathways (IMPs) show different combinations of sectoral mitigation strategies consistent with a given warming level. (*high confidence*) (Figure SPM.5) {3.2, 3.3, 3.4, 6.4, 6.6}

C.3.1 There is a variation in the contributions of different sectors in modelled mitigation pathways, as illustrated by the Illustrative Mitigation Pathways (IMPs). However, modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower share common characteristics, including rapid and deep GHG emission reductions. Doing less in one sector needs to be compensated by further reductions in other sectors if warming is to be limited. (*high confidence*) (Figure SPM.5) {3.2, 3.3, 3.4}

C.3.2 In modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, the global use of coal, oil and gas in 2050 is projected to decline with median values of about 95%, 60% and 45% respectively, compared to 2019. The interquartile ranges are (80 to 100%), (40 to 75%) and (20 to 60%) and the p5–p95 ranges are [60 to 100%], [25 to 90%] and [–30 to +85%], respectively. In modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%), these projected declines have a median value and interquartile range of 85% (65 to 95%), 30% (15 to 50%) and 15% (–10 to +40%) respectively by 2050. The use of coal, oil and gas without CCS in modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot is projected to be reduced to a greater degree, with median values of about 100%, 60% and 70% in 2050 compared to 2019. The interquartile ranges are (95 to 100%), (45 to 75%) and (60 to 80%) and the p5–p95 ranges about [85 to 100%], [25 to 90%] and [35 to 90%] for coal, oil and gas respectively. In these global modelled pathways, in 2050 almost all electricity is supplied from zero- or low-carbon sources, such as renewables or fossil fuels with CCS, combined with increased

[51] All numbers here rounded to the closest 5%, except values below 5% (for F-gases).

electrification of energy demand. As indicated by the ranges, choices in one sector can be compensated for by choices in another while being consistent with assessed warming levels.[52] (*high confidence*) {3.4, 3.5, Table 3.6, Figure 3.22, Figure 6.35}

C.3.3 In modelled pathways that reach global net zero CO_2 emissions: at the point they reach net zero, 5–16 $GtCO_2$ of emissions from some sectors are compensated for by net negative CO_2 emissions in other sectors. In most global modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower, the AFOLU sector, via reforestation and reduced deforestation, and the energy supply sector reach net zero CO_2 emissions earlier than the buildings, industry and transport sectors. (*high confidence*) (Figure SPM.5e,f) {3.4}

C.3.4 In modelled pathways that reach global net zero GHG emissions, at the point they reach net zero GHG, around 74% [54 to 90%] of global emissions reductions are achieved by CO_2 reductions in energy supply and demand, 13% [4 to 20%] by CO_2 mitigation options in the AFOLU sector, and 13% [10 to 18%] through the reduction of non-CO_2 emissions from land-use, energy and industry (*medium confidence*). (Figure SPM.5f) {3.3, 3.4}

C.3.5 Methods and levels of CDR deployment in global modelled mitigation pathways vary depending on assumptions about costs, availability and constraints.[53] In modelled pathways that report CDR and that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, global cumulative CDR during 2020–2100 from bioenergy with carbon dioxide capture and storage (BECCS) and direct air carbon dioxide capture and storage (DACCS) is 30–780 $GtCO_2$ and 0–310 $GtCO_2$, respectively. In these modelled pathways, the AFOLU sector contributes 20–400 $GtCO_2$ net negative emissions. Total cumulative net negative CO_2 emissions including CDR deployment across all options represented in these modelled pathways are 20–660 $GtCO_2$. In modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%), global cumulative CDR during 2020–2100 from BECCS and DACCS is 170–650 $GtCO_2$ and 0–250 $GtCO_2$ respectively, the AFOLU sector contributes 10–250 $GtCO_2$ net negative emissions, and total cumulative net negative CO_2 emissions are around 40 [0–290] $GtCO_2$. (Table SPM.2) (*high confidence*) {Table 3.2, 3.3, 3.4}

C.3.6 All mitigation strategies face implementation challenges, including technology risks, scaling, and costs. Many challenges, such as dependence on CDR, pressure on land and biodiversity (e.g., bioenergy) and reliance on technologies with high upfront investments (e.g., nuclear), are significantly reduced in modelled pathways that assume using resources more efficiently (e.g., IMP-LD) or that shift global development towards sustainability (e.g., IMP-SP). (*high confidence*) (Figure SPM.5) {3.2, 3.4, 3.7, 3.8, 4.3, 5.1}

---

[52] Most but not all models include the use of fossil fuels for feedstock with varying underlying standards.

[53] Aggregate levels of CDR deployment are higher than total net negative CO_2 emissions given that some of the deployed CDR is used to counterbalance remaining gross emissions. Total net negative CO_2 emissions in modelled pathways might not match the aggregated net negative CO_2 emissions attributed to individual CDR methods. Ranges refer to the 5–95th percentile across modelled pathways that include the specific CDR method. Cumulative levels of CDR from AFOLU cannot be quantified precisely given that: (i) some pathways assess CDR deployment relative to a baseline; and (ii) different models use different reporting methodologies that in some cases combine gross emissions and removals in AFOLU. Total CDR from AFOLU equals or exceeds the net negative emissions mentioned.

Modelled mitigation pathways that limit warming to 1.5°C, and 2°C, involve deep, rapid and sustained emissions reductions.

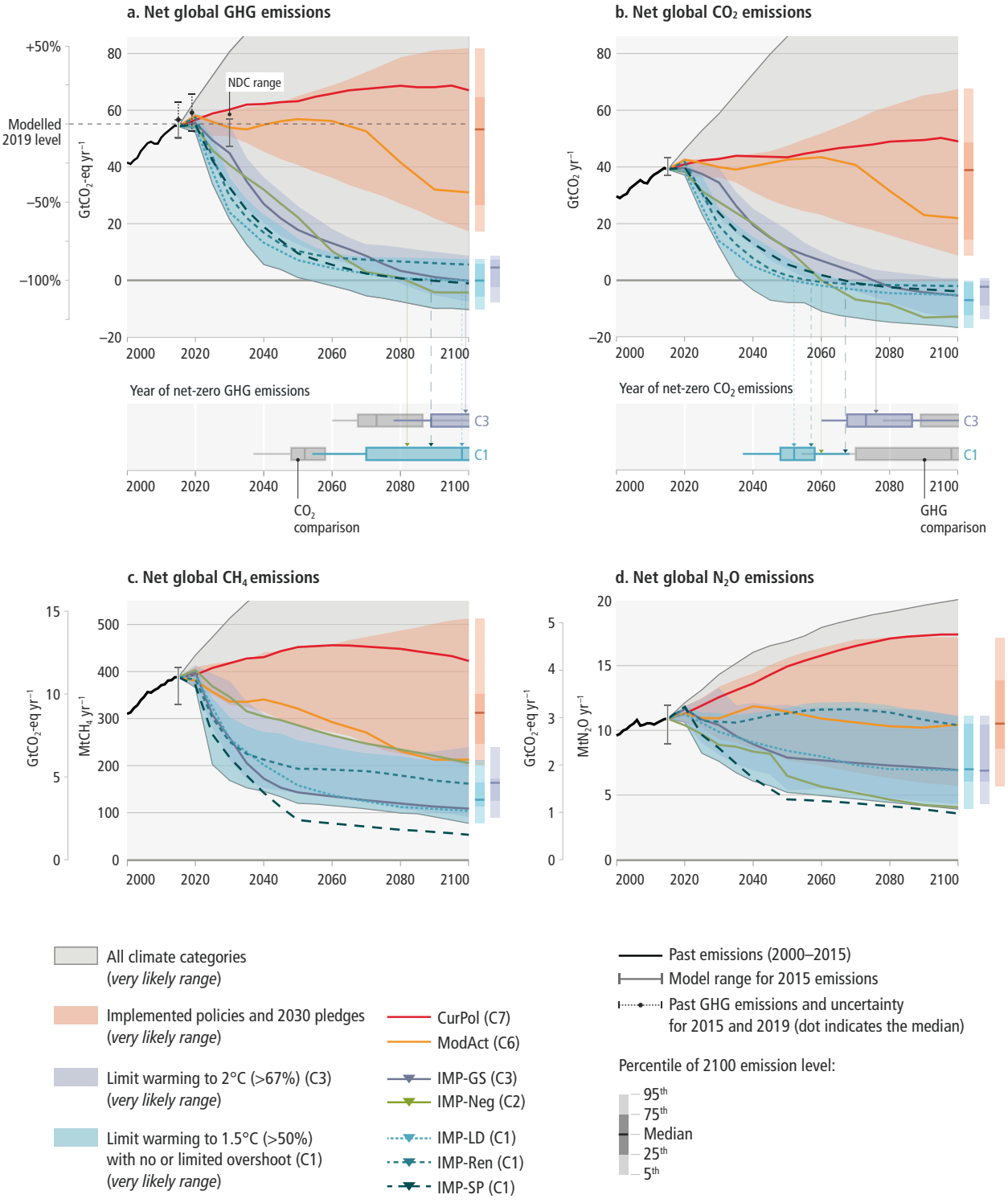


Figure SPM.5 | Illustrative Mitigation Pathways (IMPs) and net zero CO_2 and GHG emissions strategies.

Net zero CO_2 and net zero GHG emissionsare possible through different modelled mitigation pathways.

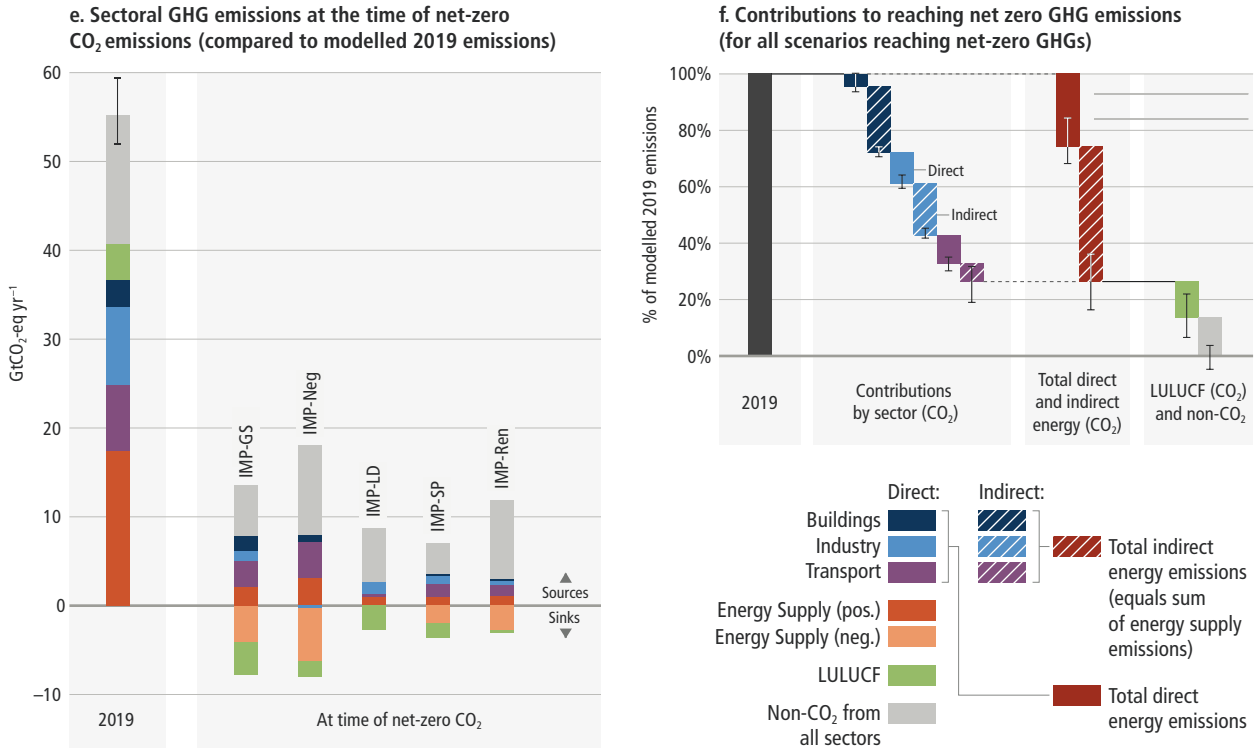


Figure SPM.5 (continued): Illustrative Mitigation Pathways (IMPs) and net zero CO_2 and GHG emissions strategies. Panels a and b show the development of global GHG and CO_2 emissions in modelled global pathways (upper sub-panels) and the associated timing of when GHG and CO_2 emissions reach net zero (lower sub-panels). **Panels c and d** show the development of global CH_4 and N_2O emissions, respectively. Coloured ranges denote the 5th to 95th percentile across pathways. The red ranges depict emissions pathways assuming policies that were implemented by the end of 2020 and pathways assuming implementation of NDCs (announced prior to COP26). Ranges of modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot are shown in light blue (category C1) and pathways that limit warming to 2°C (>67%) are shown in light purple (category C3). The grey range comprises all assessed pathways (C1–C8) from the 5th percentile of the lowest warming category (C1) to the 95th percentile of the highest warming category (C8). The modelled pathway ranges are compared to the emissions from two pathways illustrative of high emissions (CurPol and ModAct) and five IMPs: IMP-LD, IMP-Ren, IMP-SP, IMP-Neg and IMP-GS. Emissions are harmonised to the same 2015 base year. The vertical error bars in 2015 show the 5–95th percentile uncertainty range of the non-harmonised emissions across the pathways, and the uncertainty range, and median value, in emission estimates for 2015 and 2019. The vertical error bars in 2030 (panel a) depict the assessed range of the NDCs, as announced prior to COP26 (Figure SPM.4).[23] **Panel e** shows the sectoral contributions of CO_2 and non-CO_2 emissions sources and sinks at the time when net zero CO_2 emissions are reached in the IMPs. Positive and negative emissions for different IMPs are compared to the GHG emissions from the year 2019. Energy supply (neg.) includes BECCS and DACCS. DACCS features in only two of the five IMPs (IMP-REN and IMP-GS) and contributes <1% and 64%, respectively, to the net negative emissions in Energy Supply (neg.). **Panel f** shows the contribution of different sectors and sources to the emissions reductions from a 2019 baseline for reaching net zero GHG emissions. Bars denote the median emissions reductions for all pathways that reach net zero GHG emissions. The whiskers indicate the p5–p95 range. The contributions of the service sectors (transport, buildings, industry) are split into direct (demand-side) as well as indirect (supply-side) CO_2 emissions reductions. Direct emissions represent demand-side emissions due to the fuel use in the respective demand sector. Indirect emissions represent upstream emissions due to industrial processes and energy conversion, transmission and distribution. In addition, the contributions from the LULUCF sector and reductions from non-CO_2 emissions sources (green and grey bars) are displayed. {3.3, 3.4}

C.4 Reducing GHG emissions across the full energy sector requires major transitions, including a substantial reduction in overall fossil fuel use, the deployment of low-emission energy sources, switching to alternative energy carriers, and energy efficiency and conservation. The continued installation of unabated fossil fuel[54] infrastructure will 'lock-in' GHG emissions. (*high confidence*) {2.7, 6.6, 6.7, 16.4}

C.4.1 Net-zero CO_2 energy systems entail: a substantial reduction in overall fossil fuel use, minimal use of unabated fossil fuels, and use of CCS in the remaining fossil fuel system;[54] electricity systems that emit no net CO_2; widespread electrification of the energy system including end uses; energy carriers such as sustainable biofuels, low-emissions hydrogen, and derivatives in applications less amenable to electrification; energy conservation and efficiency; and greater physical, institutional, and operational integration across the energy system. CDR will be needed to counterbalance residual emissions in the energy sector. The most appropriate strategies depend on national and regional circumstances, including enabling conditions and technology availability. (*high confidence*) {3.4, 6.6, 11.3, 16.4}

C.4.2 Unit cost reductions in key technologies, notably wind power, solar power, and storage, have increased the economic attractiveness of low-emission energy sector transitions through 2030. Maintaining emission-intensive systems may, in some regions and sectors, be more expensive than transitioning to low emission systems. Low-emission energy sector transitions will have multiple co-benefits, including improvements in air quality and health. The long-term economic attractiveness of deploying energy system mitigation options depends, *inter alia*, on policy design and implementation, technology availability and performance, institutional capacity, equity, access to finance, and public and political support. (*high confidence*) (Figure SPM.3) {3.4, 6.4, 6.6, 6.7, 13.7}

C.4.3 Electricity systems powered predominantly by renewables are becoming increasingly viable. Electricity systems in some countries and regions are already predominantly powered by renewables. It will be more challenging to supply the entire energy system with renewable energy. Even though operational, technological, economic, regulatory, and social challenges remain, a variety of systemic solutions to accommodate large shares of renewables in the energy system have emerged. A broad portfolio of options, such as integrating systems, coupling sectors, energy storage, smart grids, demand-side management, sustainable biofuels, electrolytic hydrogen and derivatives, and others will ultimately be needed to accommodate large shares of renewables in energy systems. (*high confidence*) {Box 6.8, 6.4, 6.6}

C.4.4 Limiting global warming to 2°C or below will leave a substantial amount of fossil fuels unburned and could strand considerable fossil fuel infrastructure (*high confidence*). Depending on its availability, CCS could allow fossil fuels to be used longer, reducing stranded assets (*high confidence*). The combined global discounted value of the unburned fossil fuels and stranded fossil fuel infrastructure has been projected to be around USD1–4 trillion from 2015 to 2050 to limit global warming to approximately 2°C, and it will be higher if global warming is limited to approximately 1.5°C (*medium confidence*). In this context, coal assets are projected to be at risk of being stranded before 2030, while oil and gas assets are projected to be more at risk of being stranded towards mid-century. A low-emission energy sector transition is projected to reduce international trade in fossil fuels. (*high confidence*) {6.7, Figure 6.35}

C.4.5 Global methane emissions from energy supply, primarily fugitive emissions from production and transport of fossil fuels, accounted for about 18% [13–23%] of global GHG emissions from energy supply, 32% [22–42%] of global CH_4 emissions, and 6% [4–8%] of global GHG emissions in 2019 (*high confidence*). About 50–80% of CH_4 emissions from these fossil fuels could be avoided with currently available technologies at less than USD50 tCO_2-eq^{-1} (*medium confidence*). {6.3, 6.4.2, Box 6.5, 11.3, 2.2.2, Table 2.1, Figure 2.5, Annex1: Glossary}

C.4.6 CCS is an option to reduce emissions from large-scale fossil-based energy and industry sources, provided geological storage is available. When CO_2 is captured directly from the atmosphere (DACCS), or from biomass (BECCS), CCS provides the storage component of these CDR methods. CO_2 capture and subsurface injection is a mature technology for gas processing and enhanced oil recovery. In contrast to the oil and gas sector, CCS is less mature in the power sector, as well as in cement and chemicals production, where it is a critical mitigation option. The technical geological CO_2 storage capacity is estimated to be on the order of 1000 $GtCO_2$, which is more than the CO_2 storage requirements through 2100 to limit global warming to 1.5°C, although the regional availability of geological storage could be a limiting factor. If the geological storage site is appropriately selected and managed, it is estimated that the CO_2 can be permanently isolated from the atmosphere. Implementation of CCS currently faces technological, economic, institutional, ecological-environmental and socio-cultural barriers. Currently, global rates of CCS deployment are far below those in modelled pathways limiting global warming to 1.5°C or 2°C. Enabling

[54] In this context, 'unabated fossil fuels' refers to fossil fuels produced and used without interventions that substantially reduce the amount of GHG emitted throughout the life cycle; for example, capturing 90% or more CO_2 from power plants, or 50–80% of fugitive methane emissions from energy supply. {Box 6.5, 11.3}

conditions such as policy instruments, greater public support and technological innovation could reduce these barriers. (*high confidence*) {2.5, 6.3, 6.4, 6.7, 11.3, 11.4, Cross-Chapter Box 8 in Chapter 12, Figure TS.31; SRCCL Chapter 5}

C.5 Net zero CO_2 emissions from the industrial sector are challenging but possible. Reducing industry emissions will entail coordinated action throughout value chains to promote all mitigation options, including demand management, energy and materials efficiency, circular material flows, as well as abatement technologies and transformational changes in production processes. Progressing towards net zero GHG emissions from industry will be enabled by the adoption of new production processes using low- and zero-GHG electricity, hydrogen, fuels, and carbon management. (*high confidence*) {11.2, 11.3, 11.4, Box TS.4}

C.5.1 The use of steel, cement, plastics, and other materials is increasing globally, and in most regions. There are many sustainable options for demand management, materials efficiency, and circular material flows that can contribute to reduced emissions, but how these can be applied will vary across regions and different materials. These options have a potential for being more used in industrial practice and would need more attention from industrial policy. These options, as well as new production technologies, are generally not considered in recent global scenarios nor in national economy-wide scenarios due to relative newness. As a consequence, the mitigation potential in some scenarios is underestimated compared to bottom-up industry-specific models. (*high confidence*) {3.4, 5.3, Figure 5.7, 11.2, Box 11.2, 11.3, 11.4, 11.5.2, 11.6}

C.5.2 For almost all basic materials – primary metals,[55] building materials and chemicals – many low- to zero-GHG intensity production processes are at the *pilot* to *near-commercial* and in some cases *commercial* stage but they are not yet established industrial practice. Introducing new sustainable production processes for basic materials could increase production costs but, given that only a small fraction of consumer costs are based on materials, such new processes are expected to translate into minimal cost increases for final consumers. Hydrogen direct reduction for primary steelmaking is *near-commercial* in some regions. Until new chemistries are mastered, deep reduction of cement process emissions will rely on already commercialised cementitious material substitution and the availability of CCS. Reducing emissions from the production and use of chemicals would need to rely on a life cycle approach, including increased plastics recycling, fuel and feedstock switching, and carbon sourced through biogenic sources, and, depending on availability, carbon capture and use (CCU), direct air CO_2 capture, as well as CCS. Light industry, mining and manufacturing have the potential to be decarbonised through available abatement technologies (e.g., material efficiency, circularity), electrification (e.g., electrothermal heating, heat pumps) and low- or zero-GHG emitting fuels (e.g., hydrogen, ammonia, and bio-based and other synthetic fuels). (*high confidence*) {Table 11.4, Box 11.2, 11.3, 11.4}

C.5.3 Action to reduce industry sector emissions may change the location of GHG-intensive industries and the organisation of value chains. Regions with abundant low-GHG energy and feedstocks have the potential to become exporters of hydrogen-based chemicals and materials processed using low-carbon electricity and hydrogen. Such reallocation will have global distributional effects on employment and economic structure. (*medium confidence*) {Box 11.1}

C.5.4 Emissions-intensive and highly traded basic materials industries are exposed to international competition, and international cooperation and coordination may be particularly important in enabling change. For sustainable industrial transitions, broad and sequential national and sub-national policy strategies reflecting regional contexts will be required. These may combine policy packages including: transparent GHG accounting and standards; demand management; materials and energy efficiency policies; R&D and niche markets for commercialisation of low-emission materials and products; economic and regulatory instruments to drive market uptake; high quality recycling, low-emissions energy and other abatement infrastructure (e.g., for CCS); and socially inclusive phase-out plans of emissions-intensive facilities within the context of just transitions. The coverage of mitigation policies could be expanded nationally and sub-nationally to include all industrial emission sources, and both available and emerging mitigation options. (*high confidence*) {11.6}

[55] Primary metals refers to virgin metals produced from ore.

C.6 Urban areas can create opportunities to increase resource efficiency and significantly reduce GHG emissions through the systemic transition of infrastructure and urban form through low-emission development pathways towards net-zero emissions. Ambitious mitigation efforts for established, rapidly growing and emerging cities will encompass (i) reducing or changing energy and material consumption, (ii) electrification, and (iii) enhancing carbon uptake and storage in the urban environment. Cities can achieve net-zero emissions, but only if emissions are reduced within and outside of their administrative boundaries through supply chains, which will have beneficial cascading effects across other sectors. (*very high confidence*) {8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, Figure 8.21, 13.2}

C.6.1 In modelled scenarios, global consumption-based urban CO_2 and CH_4 emissions[15] are projected to rise from 29 $GtCO_2$-eq in 2020 to 34 $GtCO_2$-eq in 2050 with moderate mitigation efforts (intermediate GHG emissions, SSP2-4.5), and up to 40 $GtCO_2$-eq in 2050 with low mitigation efforts (high GHG emissions, SSP3-7.0). With ambitious and immediate mitigation efforts, including high levels of electrification and improved energy and material efficiency, global consumption-based urban CO_2 and CH_4 emissions could be reduced to 3 $GtCO_2$-eq in 2050 in the modelled scenario with very low GHG emissions (SSP1-1.9).[56] (*medium confidence*) {8.3}

C.6.2 The potential and sequencing of mitigation strategies to reduce GHG emissions will vary depending on a city's land use, spatial form, development level, and state of urbanisation (*high confidence*). Strategies for established cities to achieve large GHG emissions savings include efficiently improving, repurposing or retrofitting the building stock, targeted infilling, and supporting non-motorised (e.g., walking, bicycling) and public transport. Rapidly growing cities can avoid future emissions by co-locating jobs and housing to achieve compact urban form, and by leapfrogging or transitioning to low-emissions technologies. New and emerging cities will have significant infrastructure development needs to achieve high quality of life, which can be met through energy efficient infrastructures and services, and people-centred urban design (*high confidence*). For cities, three broad mitigation strategies have been found to be effective when implemented concurrently: (i) reducing or changing energy and material use towards more sustainable production and consumption; (ii) electrification in combination with switching to low-emission energy sources; and (iii) enhancing carbon uptake and storage in the urban environment, for example through bio-based building materials, permeable surfaces, green roofs, trees, green spaces, rivers, ponds and lakes.[57] (*very high confidence*) {5.3, Figure 5.7, Supplementary Material Table 5.SM.2, 8.2, 8.4, 8.6, Figure 8.21, 9.4, 9.6, 10.2}

C.6.3 The implementation of packages of multiple city-scale mitigation strategies can have cascading effects across sectors and reduce GHG emissions both within and outside a city's administrative boundaries. The capacity of cities to develop and implement mitigation strategies varies with the broader regulatory and institutional settings, as well as enabling conditions, including access to financial and technological resources, local governance capacity, engagement of civil society, and municipal budgetary powers. (*very high confidence*) {Figure 5.7, Supplementary Material Table 5.SM.2, 8.4, 8.5, 8.6, 13.2, 13.3, 13.5, 13.7, Cross-Chapter Box 9 in Chapter 13}

C.6.4 A growing number of cities are setting climate targets, including net-zero GHG targets. Given the regional and global reach of urban consumption patterns and supply chains, the full potential for reducing consumption-based urban emissions to net zero GHG can be met only when emissions beyond cities' administrative boundaries are also addressed. The effectiveness of these strategies depends on cooperation and coordination with national and sub-national governments, industry, and civil society, and whether cities have adequate capacity to plan and implement mitigation strategies. Cities can play a positive role in reducing emissions across supply chains that extend beyond cities' administrative boundaries, for example through building codes and the choice of construction materials. (*very high confidence*) {8.4, Box 8.4, 8.5, 9.6, 9.9, 13.5, 13.9}

---

[56] These scenarios have been assessed by WGI to correspond to intermediate, high and very low GHG emissions.

[57] These examples are considered to be a subset of nature-based solutions or ecosystem-based approaches.

C.7. In modelled global scenarios, existing buildings, if retrofitted, and buildings yet to be built, are projected to approach net zero GHG emissions in 2050 if policy packages, which combine ambitious sufficiency, efficiency, and renewable energy measures, are effectively implemented and barriers to decarbonisation are removed. Low ambition policies increase the risk of locking-in buildings' carbon for decades, while well-designed and effectively implemented mitigation interventions (in both new buildings and existing ones if retrofitted), have significant potential to contribute to achieving SDGs in all regions while adapting buildings to future climate. (*high confidence*) {9.1, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6, 9.9}

C.7.1 In 2019, global direct and indirect GHG emissions from buildings and emissions from cement and steel use for building construction and renovation were 12 $GtCO_2$-eq. These emissions include indirect emissions from offsite generation of electricity and heat, direct emissions produced onsite and emissions from cement and steel used for building construction and renovation. In 2019, global direct and indirect emissions from non-residential buildings increased by about 55% and those from residential buildings increased by about 50% compared to 1990. The latter increase, according to the decomposition analysis, was mainly driven by the increase of the floor area per capita, population growth and the increased use of emission-intensive electricity and heat while efficiency improvements have partly decreased emissions. There are great differences in the contribution of each of these drivers to regional emissions. (*high confidence*) {9.3}

C.7.2 Integrated design approaches to the construction and retrofit of buildings have led to increasing examples of zero energy or zero carbon buildings in several regions. However, the low renovation rates and low ambition of retrofitted buildings have hindered the decrease of emissions. Mitigation interventions at the design stage include buildings typology, form, and multi-functionality to allow for adjusting the size of buildings to the evolving needs of their users and repurposing unused existing buildings to avoid using GHG-intensive materials and additional land. Mitigation interventions include: at the construction phase, low-emission construction materials, highly efficient building envelope and the integration of renewable energy solutions;[58] at the use phase, highly efficient appliances/equipment, the optimisation of the use of buildings and their supply with low-emission energy sources; and at the disposal phase, recycling and re-using construction materials. (*high confidence*) {9.4, 9.5, 9.6, 9.7}

C.7.3 By 2050, bottom-up studies show that up to 61% (8.2 $GtCO_2$) of global building emissions could be mitigated. Sufficiency policies[59] that avoid the demand for energy and materials contribute 10% to this potential, energy efficiency policies contribute 42%, and renewable energy policies 9%. The largest share of the mitigation potential of new buildings is available in developing countries while in developed countries the highest mitigation potential is within the retrofit of existing buildings. The 2020–2030 decade is critical for accelerating the learning of know-how, building the technical and institutional capacity, setting the appropriate governance structures, ensuring the flow of finance, and in developing the skills needed to fully capture the mitigation potential of buildings. (*high confidence*) {9.3, 9.4, 9.5, 9.6, 9.7, 9.9}

---

[58] Integration of renewable energy solutions refers to the integration of solutions such as solar photovoltaics, small wind turbines, solar thermal collectors, and biomass boilers.

[59] Sufficiency policies are a set of measures and daily practices that avoid demand for energy, materials, land and water while delivering human well-being for all within planetary boundaries.

C.8 Demand-side options and low-GHG emissions technologies can reduce transport sector emissions in developed countries and limit emissions growth in developing countries (*high confidence*). Demand-focused interventions can reduce demand for all transport services and support the shift to more energy efficient transport modes (*medium confidence*). Electric vehicles powered by low-emissions electricity offer the largest decarbonisation potential for land-based transport, on a life cycle basis (*high confidence*). Sustainable biofuels can offer additional mitigation benefits in land-based transport in the short and medium term (*medium confidence*). Sustainable biofuels, low-emissions hydrogen, and derivatives (including synthetic fuels) can support mitigation of CO_2 emissions from shipping, aviation, and heavy-duty land transport but require production process improvements and cost reductions (*medium confidence*). Many mitigation strategies in the transport sector would have various co-benefits, including air quality improvements, health benefits, equitable access to transportation services, reduced congestion, and reduced material demand (*high confidence*). {10.2, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7}

C.8.1 In scenarios that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, global transport-related CO_2 emissions fall by 59% (42–68% interquartile range) by 2050 relative to modelled 2020 emissions, but with regionally differentiated trends (*high confidence*). In global modelled scenarios that limit warming to 2°C (>67%), transport-related CO_2 emissions are projected to decrease by 29% [14–44% interquartile range] by 2050 compared to modelled 2020 emissions. In both categories of scenarios, the transport sector likely does not reach zero CO_2 emissions by 2100 so negative emissions are likely needed to counterbalance residual CO_2 emissions from the sector (*high confidence*). {3.4, 10.7}

C.8.2 Changes in urban form (e.g., density, land-use mix, connectivity, and accessibility) in combination with programmes that encourage changes in consumer behaviour (e.g., transport pricing) could reduce transport-related greenhouse gas emissions in developed countries and slow growth in emissions in developing countries (*high confidence*). Investments in public inter- and intra-city transport and active transport infrastructure (e.g., bicycle and pedestrian pathways) can further support the shift to less GHG-intensive transport modes (*high confidence*). Combinations of systemic changes, including teleworking, digitalisation, dematerialisation, supply chain management, and smart and shared mobility may reduce demand for passenger and freight services across land, air, and sea (*high confidence*). Some of these changes could lead to induced demand for transport and energy services, which may decrease their GHG emissions reduction potential (*medium confidence*). {5.3, 10.2, 10.8}

C.8.3 Electric vehicles powered by low-GHG emissions electricity have large potential to reduce land-based transport GHG emissions, on a life cycle basis (*high confidence*). Costs of electrified vehicles, including automobiles, two- and three-wheelers, and buses, are decreasing and their adoption is accelerating, but they require continued investments in supporting infrastructure to increase scale of deployment (*high confidence*). Advances in battery technologies could facilitate the electrification of heavy-duty trucks and complement conventional electric rail systems (*medium confidence*). There are growing concerns about critical minerals needed for batteries. Material and supply diversification strategies, energy and material efficiency improvements, and circular material flows can reduce the environmental footprint and material supply risks for battery production (*medium confidence*). Sourced sustainably and with low-GHG emissions feedstocks, bio-based fuels, blended or unblended with fossil fuels, can provide mitigation benefits, particularly in the short and medium term (*medium confidence*). Low-GHG emissions hydrogen and hydrogen derivatives, including synthetic fuels, can offer mitigation potential in some contexts and land-based transport segments (*medium confidence*). {3.4, 6.3, 10.3, 10.4, 10.7, 10.8, Box 10.6}

C.8.4 While efficiency improvements (e.g., optimised aircraft and vessel designs, mass reduction, and propulsion system improvements) can provide some mitigation potential, additional CO_2 emissions mitigation technologies for aviation and shipping will be required (*high confidence*). For aviation, such technologies include high energy density biofuels (*high confidence*), and low-emission hydrogen and synthetic fuels (*medium confidence*). Alternative fuels for shipping include low-emission hydrogen, ammonia, biofuels, and other synthetic fuels (*medium confidence*). Electrification could play a niche role for aviation and shipping for short trips (*medium confidence*) and can reduce emissions from port and airport operations (*high confidence*). Improvements to national and international governance structures would further enable the decarbonisation of shipping and aviation (*medium confidence*). Such improvements could include, for example, the implementation of stricter efficiency and carbon intensity standards for the sectors (*medium confidence*). {10.3. 10.5, 10.6, 10.7, 10.8, Box 10.5}

C.8.5 The substantial potential for GHG emissions reductions, both direct and indirect, in the transport sector largely depends on power sector decarbonisation, and low-emissions feedstocks and production chains (*high confidence*). Integrated transport and energy infrastructure planning and operations can enable sectoral synergies and reduce the environmental, social, and economic impacts of decarbonising the transport and energy sectors (*high confidence*). Technology transfer and financing can support developing countries leapfrogging or transitioning to low-emissions transport systems thereby providing multiple co-benefits (*high confidence*). {10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.8}

C.9 AFOLU mitigation options, when sustainably implemented, can deliver large-scale GHG emission reductions and enhanced removals, but cannot fully compensate for delayed action in other sectors. In addition, sustainably sourced agricultural and forest products can be used instead of more GHG-intensive products in other sectors. Barriers to implementation and trade-offs may result from the impacts of climate change, competing demands on land, conflicts with food security and livelihoods, the complexity of land ownership and management systems, and cultural aspects. There are many country-specific opportunities to provide co-benefits (such as biodiversity conservation, ecosystem services, and livelihoods) and avoid risks (for example, through adaptation to climate change). (*high confidence*) {7.4, 7.6, 7.7, 12.5, 12.6}

C.9.1 The projected economic mitigation potential of AFOLU options between 2020 and 2050, at costs below USD100 tCO_2-eq^{-1}, is 8–14 $GtCO_2$-eq yr^{-1} [60] (*high confidence*). 30–50% of this potential is available at less than USD20 tCO_2-eq and could be upscaled in the near term across most regions (*high confidence*). The largest share of this economic potential [4.2–7.4 $GtCO_2$-eq yr^{-1}] comes from the conservation, improved management, and restoration of forests and other ecosystems (coastal wetlands, peatlands, savannas and grasslands), with reduced deforestation in tropical regions having the highest total mitigation. Improved and sustainable crop and livestock management, and carbon sequestration in agriculture (the latter including soil carbon management in croplands and grasslands, agroforestry and biochar), can contribute 1.8–4.1 $GtCO_2$-eq yr^{-1} reduction. Demand-side and material substitution measures, such as shifting to balanced, sustainable healthy diets,[61] reducing food loss and waste, and using bio-materials, can contribute 2.1 [1.1–3.6] $GtCO_2$-eq yr^{-1} reduction. In addition, demand-side measures together with the sustainable intensification of agriculture can reduce ecosystem conversion and CH_4 and N_2O emissions, and free up land for reforestation and restoration, and the production of renewable energy. The improved and expanded use of wood products sourced from sustainably managed forests also has potential through the allocation of harvested wood to longer-lived products, increasing recycling or material substitution. AFOLU mitigation measures cannot compensate for delayed emission reductions in other sectors. Persistent and region-specific barriers continue to hamper the economic and political feasibility of deploying AFOLU mitigation options. Assisting countries to overcome barriers will help to achieve significant mitigation (*medium confidence*). (Figure SPM.6) {7.1, 7.4, 7.5, 7.6}

C.9.2 AFOLU carbon sequestration and GHG emission reduction options have both co-benefits and risks in terms of biodiversity and ecosystem conservation, food and water security, wood supply, livelihoods and land tenure and land-use rights of Indigenous Peoples, local communities and small land owners. Many options have co-benefits but those that compete for land and land-based resources can pose risks. The scale of benefit or risk largely depends on the type of activity undertaken, deployment strategy (e.g., scale, method), and context (e.g., soil, biome, climate, food system, land ownership) that vary geographically and over time. Risks can be avoided when AFOLU mitigation is pursued in response to the needs and perspectives of multiple stakeholders to achieve outcomes that maximize co-benefits while limiting trade-offs. (*high confidence*) {7.4, 7.6, 12.3}

C.9.3 Realising the AFOLU mitigation potential entails overcoming institutional, economic and policy constraints and managing potential trade-offs (*high confidence*). Land-use decisions are often spread across a wide range of land owners; demand-side measures depend on billions of consumers in diverse contexts. Barriers to the implementation of AFOLU mitigation include insufficient institutional and financial support, uncertainty over long-term additionality and trade-offs, weak governance, insecure land ownership, low incomes and the lack of access to alternative sources of income, and the risk of reversal. Limited access to technology, data, and know-how is a barrier to implementation. Research and development are key for all measures. For example, measures for the mitigation of agricultural CH_4 and N_2O emissions with emerging technologies show promising results. However, the mitigation of agricultural CH_4 and N_2O emissions is still constrained by cost, the diversity and complexity of agricultural systems, and by increasing demands to raise agricultural yields, and increasing demand for livestock products. (*high confidence*) {7.4, 7.6}

C.9.4 Net costs of delivering 5–6 $GtCO_2$ yr^{-1} of forest-related carbon sequestration and emission reduction as assessed with sectoral models are estimated to reach to about USD400 billion yr^{-1} by 2050. The costs of other AFOLU mitigation measures are highly context specific. Financing needs in AFOLU, and in particular in forestry, include both the direct effects of any changes in

---

[60] The global top-down estimates and sectoral bottom-up estimates described here do not include the substitution of emissions from fossil fuels and GHG-intensive materials. 8–14 $GtCO_2$-eq yr^{-1} represents the mean of the AFOLU economic mitigation potential estimates from top-down estimates (lower bound of range) and global sectoral bottom-up estimates (upper bound of range). The full range from top-down estimates is 4.1–17.3 $GtCO_2$-eq yr^{-1} using a 'no policy' baseline. The full range from global sectoral studies is 6.7–23.4 $GtCO_2$-eq yr^{-1} using a variety of baselines. (*high confidence*)

[61] 'Sustainable healthy diets' promote all dimensions of individuals' health and well-being; have low environmental pressure and impact; are accessible, affordable, safe and equitable; and are culturally acceptable, as described in FAO and WHO. The related concept of 'balanced diets' refers to diets that feature plant-based foods, such as those based on coarse grains, legumes, fruits and vegetables, nuts and seeds, and animal-sourced food produced in resilient, sustainable and low-GHG emission systems, as described in SRCCL.

activities as well as the opportunity costs associated with land-use change. Enhanced monitoring, reporting and verification capacity, and the rule of law, are crucial for land-based mitigation in combination with policies also recognising interactions with wider ecosystem services, could enable engagement by a wider array of actors, including private businesses, NGOs, and Indigenous Peoples and local communities. (*medium confidence*) {7.6, 7.7}

C.9.5 Context specific policies and measures have been effective in demonstrating the delivery of AFOLU carbon sequestration and GHG emission reduction options but the above-mentioned constraints hinder large scale implementation (*medium confidence*). Deploying land-based mitigation can draw on lessons from experience with regulations, policies, economic incentives, payments (e.g., for biofuels, control of nutrient pollution, water regulations, conservation and forest carbon, ecosystem services, and rural livelihoods), and from diverse forms of knowledge such as Indigenous knowledge, local knowledge and scientific knowledge. Indigenous Peoples, private forest owners, local farmers and communities manage a significant share of global forests and agricultural land and play a central role in land-based mitigation options. Scaling successful policies and measures relies on governance that emphasises integrated land-use planning and management framed by SDGs, with support for implementation. (*high confidence*) {7.4, Box 7.2, 7.6}

C.10 Demand-side mitigation encompasses changes in infrastructure use, end-use technology adoption, and socio-cultural and behavioural change. Demand-side measures and new ways of end-use service provision can reduce global GHG emissions in end-use sectors by 40–70% by 2050 compared to baseline scenarios, while some regions and socioeconomic groups require additional energy and resources. Demand-side mitigation response options are consistent with improving basic well-being for all. (*high confidence*) (Figure SPM.6) {5.3, 5.4, Figure 5.6, Figure 5.14, 8.2, 9.4, 10.2, 11.3, 11.4, 12.4, Figure TS.22}

C.10.1 Infrastructure design and access, and technology access and adoption, including information and communication technologies, influence patterns of demand and ways of providing services, such as mobility, shelter, water, sanitation, and nutrition. Illustrative global low-demand scenarios, accounting for regional differences, indicate that more efficient end-use energy conversion can improve services while reducing the need for upstream energy by 45% by 2050 compared to 2020. Demand-side mitigation potential differs between and within regions, and some regions and populations require additional energy, capacity, and resources for human well-being. The lowest population quartile by income worldwide faces shortfalls in shelter, mobility, and nutrition. (*high confidence*) {5.2, 5.3, 5.4, 5.5, Figure 5.6, Figure 5.10, Table 5.2, Figure TS.20, Figure TS.22}

C.10.2 By 2050, comprehensive demand-side strategies could reduce direct and indirect CO_2 and non-CO_2 GHG emissions in three end-use sectors (buildings, land transport, and food) globally by 40%–70% compared to the 2050 emissions projection of two scenarios consistent with policies announced by national governments until 2020. With policy support, socio-cultural options and behavioural change can reduce global GHG emissions of end-use sectors by at least 5% rapidly, with most of the potential in developed countries, and more until 2050, if combined with improved infrastructure design and access. Individuals with high socio-economic status contribute disproportionately to emissions and have the highest potential for emissions reductions, e.g., as citizens, investors, consumers, role models, and professionals. (*high confidence*) (Figure SPM.6) {5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, Supplementary Material Table 5.SM.2, 8.4, 9.9, 13.2, 13.5, 13.8, Figure TS.20}

C.10.3 A range of 5–30% of global annual GHG emissions from end-use sectors are avoidable by 2050, compared to 2050 emissions projection of two scenarios consistent with policies announced by national governments until 2020, through changes in the built environment, new and repurposed infrastructures and service provision through compact cities, co-location of jobs and housing, more efficient use of floor space and energy in buildings, and reallocation of street space for active mobility (*high confidence*). (Figure SPM.6) {5.3.1, 5.3.3, 5.4, Figure 5.7, Figure 5.13, Table 5.1, Table 5.5, Supplementary Material Table 5. SM.2, 8.4, 9.5, 10.2, 11.3, 11.4, Table 11.6, Box TS.12}

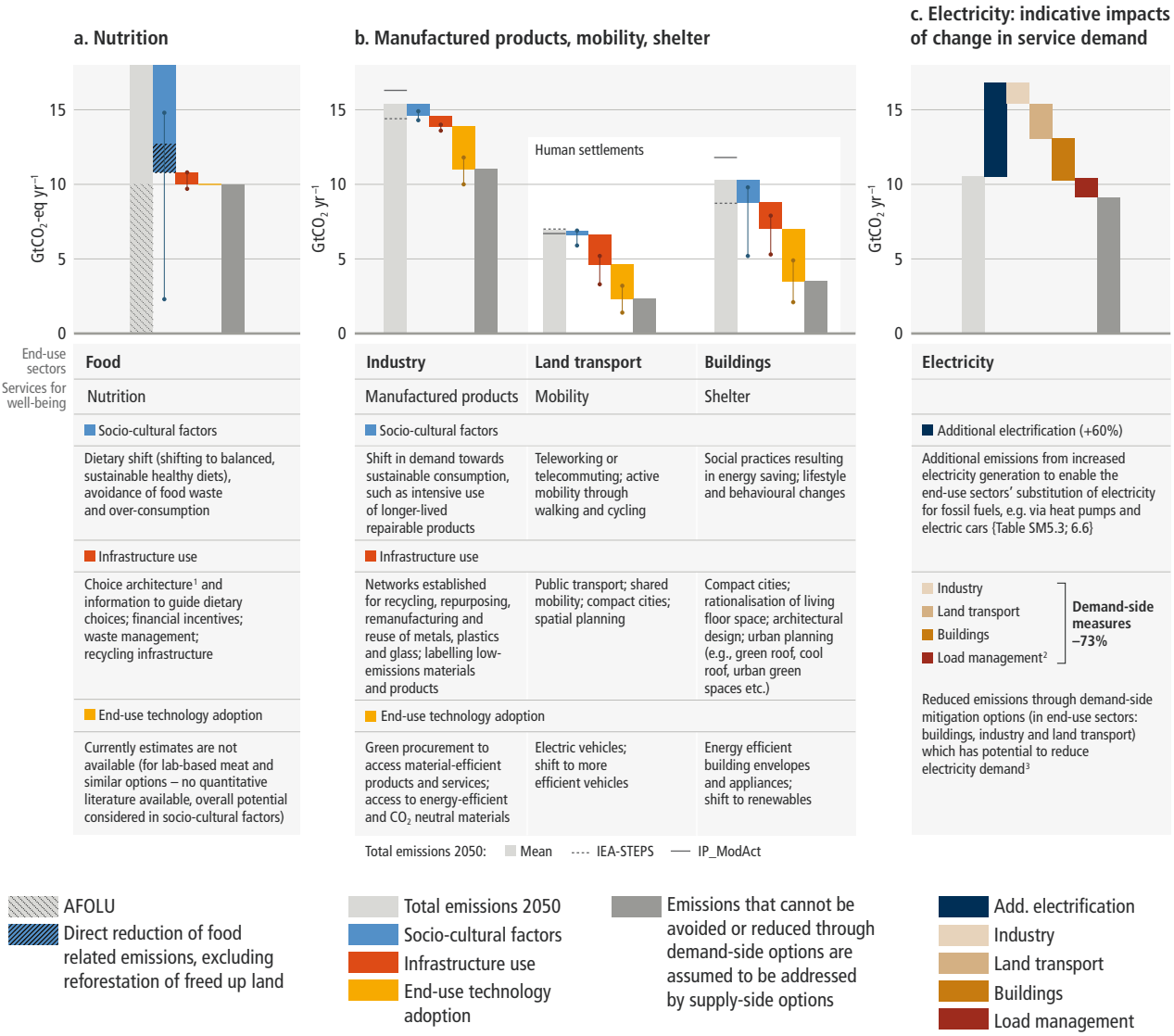
C.10.4 Choice architecture[62] can help end-users adopt, as relevant to consumers, culture and country contexts, low-GHG-intensive options such as balanced, sustainable healthy diets[61] acknowledging nutritional needs; food waste reduction; adaptive heating and cooling choices for thermal comfort; building-integrated renewable energy; and electric light-duty vehicles, and shifts to walking, cycling, shared pooled and public transit; and sustainable consumption by intensive use of longer-lived repairable products (*high confidence*). Addressing inequality and many forms of status consumption[63] and focusing on wellbeing supports climate change mitigation efforts (*high confidence*). (Figure SPM.6) {2.4.3, 2.6.2, 4.2.5, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, Figure 5.4, Figure 5.10, Table 5.2, Supplementary Material Table 5.SM.2, 7.4.5, 8.2, 8.4, 9.4, 10.2, 12.4, Figure TS.20}

---

62 'Choice architecture' describes the presentation of choices to consumers, and the impact that presentation has on consumer decision-making.

63 'Status consumption' refers to the consumption of goods and services which publicly demonstrates social prestige.

Demand-side mitigation can be achieved through changes in socio-cultural factors, infrastructure design and use, and end-use technology adoption by 2050.



[1] The presentation of choices to consumers, and the impact of that presentation on consumer decision-making.

[2] Load management refers to demand-side flexibility that cuts across all sectors and can be achieved through incentive design like time of use pricing/monitoring by artificial intelligence, diversification of storage facilities, etc.

[3] The impact of demand-side mitigation on electricity sector emissions depends on the baseline carbon intensity of electricity supply, which is scenario dependent.

Figure SPM.6 | Indicative potential of demand-side mitigation options by 2050. Figure SPM.6 covers the indicative potential of demand-side options for the year 2050. Figure SPM.7 covers cost and potentials for the year 2030. Demand-side mitigation response options are categorised into three broad domains: 'socio-cultural factors', associated with individual choices, behaviour, lifestyle changes, social norms, and culture; 'infrastructure use', related to the design and use of supporting hard and soft infrastructure that enables changes in individual choices and behaviour; and 'end-use technology adoption', referring to the uptake of technologies by end-users. Demand-side mitigation is a central element of the IMP-LD and IMP-SP scenarios (Figure SPM.5). **Panel a** (Nutrition) demand-side potentials in 2050 assessment is based on bottom-up studies and is estimated following the 2050 baseline for the food sector presented in peer-reviewed literature (more information in Supplementary Material 5.II, and Section 7.4.5). **Panel b** (Manufactured products, mobility, shelter) the assessment of potentials for total emissions in 2050 are estimated based on approximately 500 bottom-up studies representing all global regions (detailed list is in Supplementary Material Table 5.SM.2). Baseline is provided by the sectoral mean GHG emissions in 2050 of the two scenarios consistent with policies announced by national governments until 2020. The heights of the coloured columns represent the potentials represented by the median value. These are based on a range of values available in the case studies from literature shown in Supplementary Material 5.SM.II. The range is shown by the dots connected by dotted lines representing the highest and the lowest potentials reported in the literature. **Panel a** shows the demand-side potential of socio-cultural factors and infrastructure use. The median value of direct emissions (mostly non-CO_2) reduction through socio-cultural factors is 1.9 $GtCO_2$-eq without considering land-use change through reforestation of freed up land. If changes in land-use pattern enabled by this change in food demand are considered, the indicative potential could reach 7 $GtCO_2$-eq. Panel b illustrates mitigation potential in industry, land transport and buildings end-use sectors through demand-side options. Key options are presented in the summary table below the figure and the details are in Supplementary Material Table 5.SM.2. **Panel c** visualises how sectoral demand-side mitigation options (presented in panel b) change demand on the electricity distribution system. Electricity accounts for an increasing proportion of final energy demand in 2050 (additional electricity bar) in line with multiple bottom-up studies (detailed list is in Supplementary Material Table 5.SM.3), and Chapter 6 (Section 6.6). These studies are used to compute the impact of end-use electrification which increases overall electricity demand. Some of the projected increase in electricity demand can be avoided through demand-side mitigation options in the domains of socio-cultural factors and infrastructure use in end-use electricity use in buildings, industry, and land transport found in literature based on bottom-up assessments. Dark grey columns show the emissions that cannot be avoided through demand-side mitigation options. {5.3, Figure 5.7, Supplementary Material 5.SM.II}

C.11 The deployment of carbon dioxide removal (CDR) to counterbalance hard-to-abate residual emissions is unavoidable if net zero CO_2 or GHG emissions are to be achieved. The scale and timing of deployment will depend on the trajectories of gross emission reductions in different sectors. Upscaling the deployment of CDR depends on developing effective approaches to address feasibility and sustainability constraints especially at large scales. (*high confidence*) {3.4, 7.4, 12.3, Cross-Chapter Box 8 in Chapter 12}

C.11.1 CDR refers to anthropogenic activities that remove CO_2 from the atmosphere and store it durably in geological, terrestrial, or ocean reservoirs, or in products. CDR methods vary in terms of their maturity, removal process, time scale of carbon storage, storage medium, mitigation potential, cost, co-benefits, impacts and risks, and governance requirements (*high confidence*). Specifically, maturity ranges from lower maturity (e.g., ocean alkalinisation) to higher maturity (e.g., reforestation); removal and storage potential ranges from lower potential (<1 $GtCO_2$ yr^{-1}, e.g., blue carbon management) to higher potential (>3 $GtCO_2$ yr^{-1}, e.g., agroforestry); costs range from lower cost (e.g., USD-45–100 per tCO_2 for soil carbon sequestration) to higher cost (e.g., USD100–300 per tCO_2 for DACCS) (*medium confidence*). Estimated storage time scales vary from decades to centuries for methods that store carbon in vegetation and through soil carbon management, to 10,000 years or more for methods that store carbon in geological formations (*high confidence*). The processes by which CO_2 is removed from the atmosphere are categorised as biological, geochemical or chemical. Afforestation, reforestation, improved forest management, agroforestry and soil carbon sequestration are currently the only widely practiced CDR methods (*high confidence*). {7.4, 7.6, 12.3, Table 12.6, Cross-Chapter Box 8 in Chapter 12, Table TS.7; AR6 WGI 5.6}

C.11.2 The impacts, risks and co-benefits of CDR deployment for ecosystems, biodiversity and people will be highly variable depending on the method, site-specific context, implementation and scale (*high confidence*). Reforestation, improved forest management, soil carbon sequestration, peatland restoration and blue carbon management are examples of methods that can enhance biodiversity and ecosystem functions, employment and local livelihoods, depending on context (*high confidence*). In contrast, afforestation or production of biomass crops for BECCS or biochar, when poorly implemented, can have adverse socio-economic and environmental impacts, including on biodiversity, food and water security, local livelihoods and on the rights of Indigenous Peoples, especially if implemented at large scales and where land tenure is insecure (*high confidence*). Ocean fertilisation, if implemented, could lead to nutrient redistribution, restructuring of ecosystems, enhanced oxygen consumption and acidification in deeper waters (*medium confidence*). {7.4, 7.6, 12.3, 12.5}

C.11.3 The removal and storage of CO_2 through vegetation and soil management can be reversed by human or natural disturbances; it is also prone to climate change impacts. In comparison, CO_2 stored in geological and ocean reservoirs (via BECCS, DACCS, ocean alkalinisation) and as carbon in biochar is less prone to reversal. (*high confidence*) {6.4, 7.4, 12.3}

C.11.4 In addition to deep, rapid, and sustained emission reductions CDR can fulfil three different complementary roles globally or at country level: lowering net CO_2 or net GHG emissions in the near term; counterbalancing 'hard-to-abate' residual emissions (e.g., emissions from agriculture, aviation, shipping, industrial processes) in order to help reach net zero CO_2 or net zero GHG emissions in the mid-term; and achieving net negative CO_2 or GHG emissions in the long term if deployed at levels exceeding annual residual emissions. (*high confidence*) {3.3, 7.4, 11.3, 12.3, Cross-Chapter Box 8 in Chapter 12}

C.11.5 Rapid emission reductions in all sectors interact with future scale of deployment of CDR methods, and their associated risks, impacts and co-benefits. Upscaling the deployment of CDR methods depends on developing effective approaches to address sustainability and feasibility constraints, potential impacts, co-benefits and risks. Enablers of CDR include accelerated research, development and demonstration, improved tools for risk assessment and management, targeted incentives and development of agreed methods for measurement, reporting and verification of carbon flows. (*high confidence*) {3.4, 7.6, 12.3}

C.12 Mitigation options costing USD100 tCO_2-eq^{-1} or less could reduce global GHG emissions by at least half the 2019 level by 2030 (*high confidence*). Global GDP continues to grow in modelled pathways[64] but, without accounting for the economic benefits of mitigation action from avoided damages from climate change nor from reduced adaptation costs, it is a few percent lower in 2050 compared to pathways without mitigation beyond current policies. The global economic benefit of limiting warming to 2°C is reported to exceed the cost of mitigation in most of the assessed literature (*medium confidence*). (Figure SPM.7) {3.6, 3.8, Cross-Working Group Box 1 in Chapter 3, 12.2, Box TS.7}

C.12.1 Based on a detailed sectoral assessment of mitigation options, it is estimated that mitigation options costing USD100 tCO_2-eq^{-1} or less could reduce global GHG emissions by at least half of the 2019 level by 2030 (options costing less than USD20 tCO_2-eq^{-1} are estimated to make up more than half of this potential).[65] For a smaller part of the potential, deployment leads to net cost savings. Large contributions with costs less than USD20 tCO_2-eq^{-1} come from solar and wind energy, energy efficiency improvements, reduced conversion of natural ecosystems, and CH_4 emissions reductions (coal mining, oil and gas, waste). The mitigation potentials and mitigation costs of individual technologies in a specific context or region may differ greatly from the provided estimates. The assessment of the underlying literature suggests that the relative contribution of the various options could change beyond 2030. (*medium confidence*) (Figure SPM.7) {12.2}

C.12.2 The aggregate effects of climate change mitigation on global GDP are small compared to global projected GDP growth in assessed modelled global scenarios that quantify the macroeconomic implications of climate change mitigation, but that do not account for damages from climate change nor adaptation costs (*high confidence*). For example, compared to pathways that assume the continuation of policies implemented by the end of 2020, assessed global GDP reached in 2050 is reduced by 1.3–2.7% in modelled pathways assuming coordinated global action starting between now and 2025 at the latest to limit warming to 2°C (>67%). The corresponding average reduction in annual global GDP growth over 2020–2050 is 0.04–0.09 percentage points. In assessed modelled pathways, regardless of the level of mitigation action, global GDP is projected to at least double (increase by at least 100%) over 2020–2050. For modelled global pathways in other temperature categories, the reductions in global GDP in 2050 compared to pathways that assume the continuation of policies implemented by the end of 2020 are as follows: 2.6–4.2% (C1), 1.6–2.8% (C2), 0.8–2.1% (C4), 0.5–1.2% (C5). The corresponding reductions in average annual global GDP growth over 2020–2050, in percentage points, are as follows: 0.09–0.14 (C1), 0.05–0.09 (C2), 0.03–0.07 (C4), 0.02–0.04 (C5).[66] There are large variations in the modelled effects of mitigation on GDP across regions, depending notably on economic structure, regional emissions reductions, policy design and level of international cooperation[67] (*high confidence*). Country-level studies also show large variations in the effect of mitigation on GDP depending notably on the level of mitigation and on the way it is achieved (*high confidence*). Macroeconomic implications of mitigation co-benefits and trade-offs are not quantified comprehensively across the above scenarios and depend strongly on mitigation strategies (*high confidence*). {3.6, 4.2, Box TS.7, Annex III.I.2, Annex III.I.9, Annex III.I.10 and Annex III.II.3}

C.12.3 Estimates of aggregate economic benefits from avoiding damages from climate change, and from reduced adaptation costs, increase with the stringency of mitigation (*high confidence*). Models that incorporate the economic damages from climate change find that the global cost of limiting warming to 2°C over the 21st century is lower than the global economic benefits of reducing warming, unless: (i) climate damages are towards the low end of the range; or, (ii) future damages are discounted at high rates (*medium confidence*).[68] Modelled pathways with a peak in global emissions between now and 2025 at the latest, compared to modelled pathways with a later peak in global emissions, entail more rapid near-term transitions and higher up-front investments, but bring long-term gains for the economy, as well as earlier benefits of avoided climate change impacts (*high confidence*). The precise magnitude of these gains and benefits is difficult to quantify. {1.7, 3.6, Cross-Working Group Box 1 in Chapter 3, Box TS.7; AR6 WGII SPM B.4}

---

64 In modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower.

65 The methodology underlying the assessment is described in the caption to Figure SPM.7.

66 These estimates are based on 311 pathways that report effects of mitigation on GDP and that could be classified in temperature categories, but that do not account for damages from climate change nor adaptation costs and that mostly do not reflect the economic impacts of mitigation co-benefits and trade-offs. The ranges given are interquartile ranges. The macroeconomic implications quantified vary largely depending on technology assumptions, climate/emissions target formulation, model structure and assumptions, and the extent to which pre-existing inefficiencies are considered. Models that produced the pathways classified in temperature categories do not represent the full diversity of existing modelling paradigms, and there are in the literature models that find higher mitigation costs, or conversely lower mitigation costs and even gains. {1.7, 3.2, 3.6, Annex III.I.2, Annex III.I.9, Annex III.I.10 and Annex III.II.3}

67 In modelled cost-effective pathways with a globally uniform carbon price, without international financial transfers or complementary policies, carbon intensive and energy exporting countries are projected to bear relatively higher mitigation costs because of a deeper transformation of their economies and changes in international energy markets. {3.6}

68 The evidence is too limited to make a similar robust conclusion for limiting warming to 1.5°C.

Many options available now in all sectors are estimated to offer substantial potential to reduce net emissions by 2030. Relative potentials and costs will vary across countries and in the longer term compared to 2030.

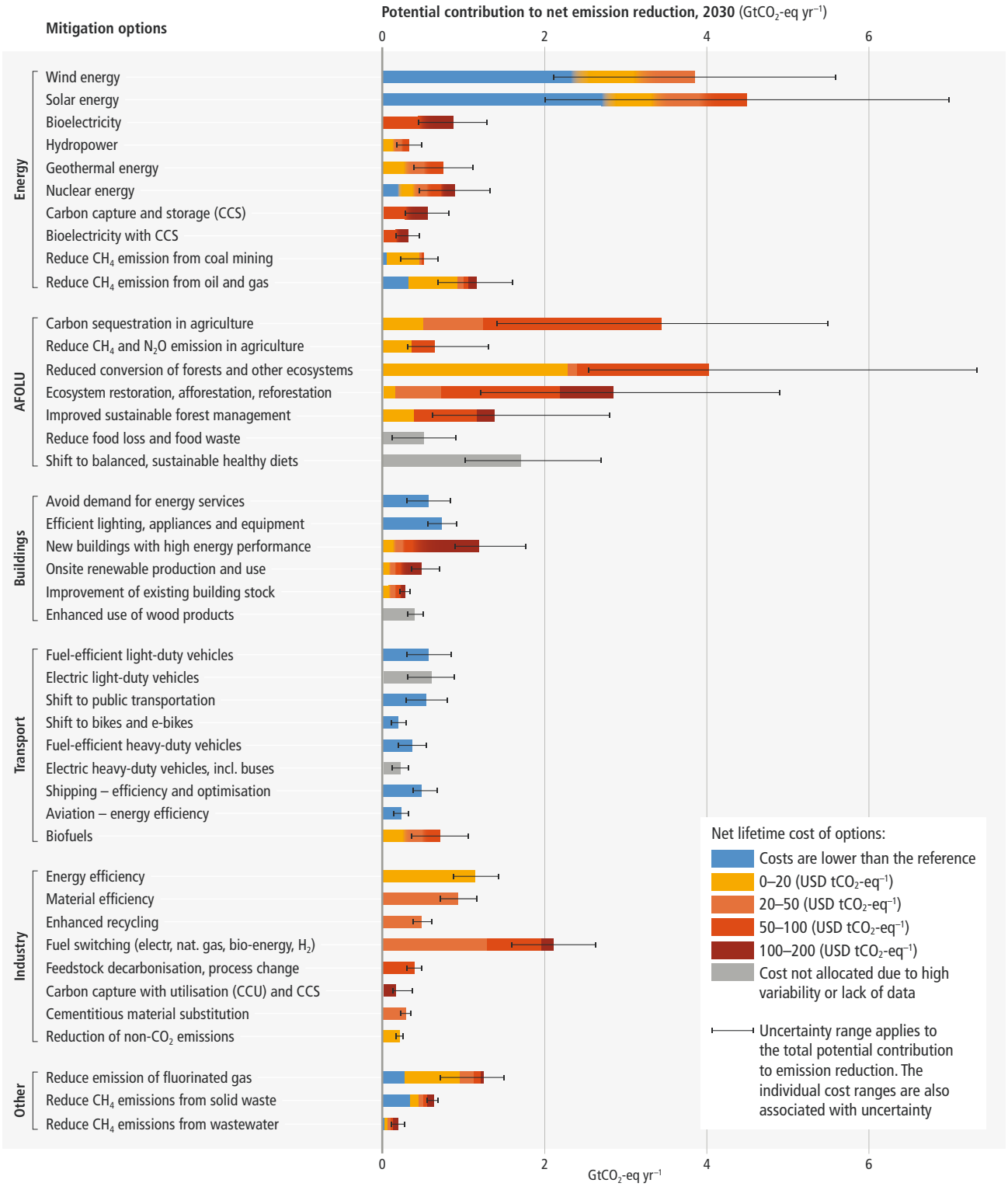


Figure SPM.7 | Overview of mitigation options and their estimated ranges of costs and potentials in 2030.

Figure SPM.7 (continued): Overview of mitigation options and their estimated ranges of costs and potentials in 2030. Costs shown are net lifetime costs of avoided greenhouse gas emissions. Costs are calculated relative to a reference technology. The assessments per sector were carried out using a common methodology, including definition of potentials, target year, reference scenarios, and cost definitions. The mitigation potential (shown in the horizontal axis) is the quantity of net GHG emission reductions that can be achieved by a given mitigation option relative to a specified emission baseline. Net GHG emission reductions are the sum of reduced emissions and/or enhanced sinks. The baseline used consists of current policy (around 2019) reference scenarios from the AR6 scenarios database (25/75 percentile values). The assessment relies on approximately 175 underlying sources, that together give a fair representation of emission reduction potentials across all regions. The mitigation potentials are assessed independently for each option and are not necessarily additive. {12.2.1, 12.2.2} The length of the solid bars represents the mitigation potential of an option. The error bars display the full ranges of the estimates for the total mitigation potentials. Sources of uncertainty for the cost estimates include assumptions on the rate of technological advancement, regional differences, and economies of scale, among others. Those uncertainties are not displayed in the figure. Potentials are broken down into cost categories, indicated by different colours (see legend). Only discounted lifetime monetary costs are considered. Where a gradual colour transition is shown, the breakdown of the potential into cost categories is not well known or depends heavily on factors such as geographical location, resource availability, and regional circumstances, and the colours indicate the range of estimates. Costs were taken directly from the underlying studies (mostly in the period 2015–2020) or recent datasets. No correction for inflation was applied, given the wide cost ranges used. The cost of the reference technologies were also taken from the underlying studies and recent datasets. Cost reductions through technological learning are taken into account.[69]

- When interpreting this figure, the following should be taken into account:
- The mitigation potential is uncertain, as it will depend on the reference technology (and emissions) being displaced, the rate of new technology adoption, and several other factors.
- Cost and mitigation potential estimates were extrapolated from available sectoral studies. Actual costs and potentials would vary by place, context and time.
- Beyond 2030, the relative importance of the assessed mitigation options is expected to change, in particular while pursuing long-term mitigation goals, recognising also that the emphasis for particular options will vary across regions (for specific mitigation options see SPM Sections C4.1, C5.2, C7.3, C8.3 and C9.1).
- Different options have different feasibilities beyond the cost aspects, which are not reflected in the figure (compare with SPM Section E.1).
- The potentials in the cost range USD100–200 tCO_2-eq^{-1} may be underestimated for some options.
- Costs for accommodating the integration of variable renewable energy sources in electricity systems are expected to be modest until 2030, and are not included because of complexities in attributing such costs to individual technology options.
- Cost range categories are ordered from low to high. This order does not imply any sequence of implementation.
- Externalities are not taken into account. {12.2, Table 12.3, 6.4, Table 7.3, Supplementary Material Table 9.SM.2, Supplementary Material Table 9.SM.3, 10.6, 11.4, Figure 11.13, Supplementary Material 12.SM.1.2.3}

[69] For nuclear energy, modelled costs for long-term storage of radioactive waste are included.

D. Linkages between Mitigation, Adaptation, and Sustainable Development

D.1 Accelerated and equitable climate action in mitigating, and adapting to, climate change impacts is critical to sustainable development. Climate change actions can also result in some trade-offs. The trade-offs of individual options could be managed through policy design. The Sustainable Development Goals (SDGs) adopted under the UN 2030 Agenda for Sustainable Development can be used as a basis for evaluating climate action in the context of sustainable development. (*high confidence*) (Figure SPM.8) {1.6, 3.7, 17.3, Figure TS.29}

D.1.1 Human-induced climate change is a consequence of more than a century of net GHG emissions from unsustainable energy use, land-use and land use change, lifestyle and patterns of consumption and production. Without urgent, effective and equitable mitigation actions, climate change increasingly threatens the health and livelihoods of people around the globe, ecosystem health and biodiversity. There are both synergies and trade-offs between climate action and the pursuit of other SDGs. Accelerated and equitable climate action in mitigating, and adapting to, climate change impacts is critical to sustainable development. (*high confidence*) {1.6, Cross-Chapter Box 5 in Chapter 4, 7.2, 7.3, 17.3; AR6 WGI SPM.A, Figure SPM.2; AR6 WGII SPM.B2, Figure SPM.3, Figure SPM.4b, Figure SPM.5}

D.1.2 Synergies and trade-offs depend on the development context including inequalities, with consideration of climate justice. They also depend on means of implementation, intra- and inter-sectoral interactions, cooperation between countries and regions, the sequencing, timing and stringency of mitigation actions, governance, and policy design. Maximising synergies and avoiding trade-offs pose particular challenges for developing countries, vulnerable populations, and Indigenous Peoples with limited institutional, technological and financial capacity, and with constrained social, human, and economic capital. Trade-offs can be evaluated and minimised by giving emphasis to capacity building, finance, governance, technology transfer, investments, and development and social equity considerations with meaningful participation of Indigenous Peoples and vulnerable populations. (*high confidence*) {1.6, 1.7, 3.7, 5.2, 5.6, 7.4, 7.6, 17.4}

D.1.3 There are potential synergies between sustainable development and energy efficiency, renewable energy, urban planning with more green spaces, reduced air pollution, and demand-side mitigation including shifts to balanced, sustainable healthy diets (*high confidence*). Electrification combined with low-GHG energy, and shifts to public transport can enhance health, employment, and can elicit energy security and deliver equity (*high confidence*). In industry, electrification and circular material flows contribute to reduced environmental pressures and increased economic activity and employment. However, some industrial options could impose high costs (*medium confidence*). (Figure SPM.8) {5.2, 8.2, 11.3, 11.5, 17.3, Figure TS.29}

D.1.4 Land-based options such as reforestation and forest conservation, avoided deforestation, restoration and conservation of natural ecosystems and biodiversity, improved sustainable forest management, agroforestry, soil carbon management and options that reduce CH_4 and N_2O emissions in agriculture from livestock and soil, can have multiple synergies with the SDGs. These include enhancing sustainable agricultural productivity and resilience, food security, providing additional biomass for human use, and addressing land degradation. Maximising synergies and managing trade-offs depend on specific practices, scale of implementation, governance, capacity building, integration with existing land use, and the involvement of local communities and Indigenous Peoples and through benefit-sharing, supported by frameworks such as Land Degradation Neutrality within the UNCCD. (*high confidence*) {3.7, 7.4, 12.5, 17.3}

D.1.5 Trade-offs in terms of employment, water use, land-use competition and biodiversity, as well as access to, and the affordability of, energy, food, and water can be avoided by well-implemented land-based mitigation options, especially those that do not threaten existing sustainable land uses and land rights, though more frameworks for integrated policy implementation are required. The sustainability of bioenergy and other bio-based products is influenced by feedstock, land management practice, climatic region, the context of existing land management, and the timing, scale and speed of deployment. (*medium confidence*) {3.5, 3.7, 7.4, 12.4, 12.5, 17.1}

D.1.6 CDR methods such as soil carbon sequestration and biochar[70] can improve soil quality and food production capacity. Ecosystem restoration and reforestation sequester carbon in plants and soil, and can enhance biodiversity and provide additional

[70] Potential risks, knowledge gaps due to the relative immaturity of use of biochar as a soil amendment and unknown impacts of widespread application, and co-benefits of biochar are reviewed in Section 7.4.3.2.

biomass, but can displace food production and livelihoods, which calls for integrated approaches to land-use planning, to meet multiple objectives including food security. However, due to limited application of some of the options today, there are some uncertainties about potential benefits. (*high confidence*) {3.7, 7.4, 7.6, 12.5, 17.3, Table TS.7}

Mitigation options have synergies with many Sustainable Development Goals, but some options can also have trade-offs. The synergies and trade-offs vary dependent on context and scale.

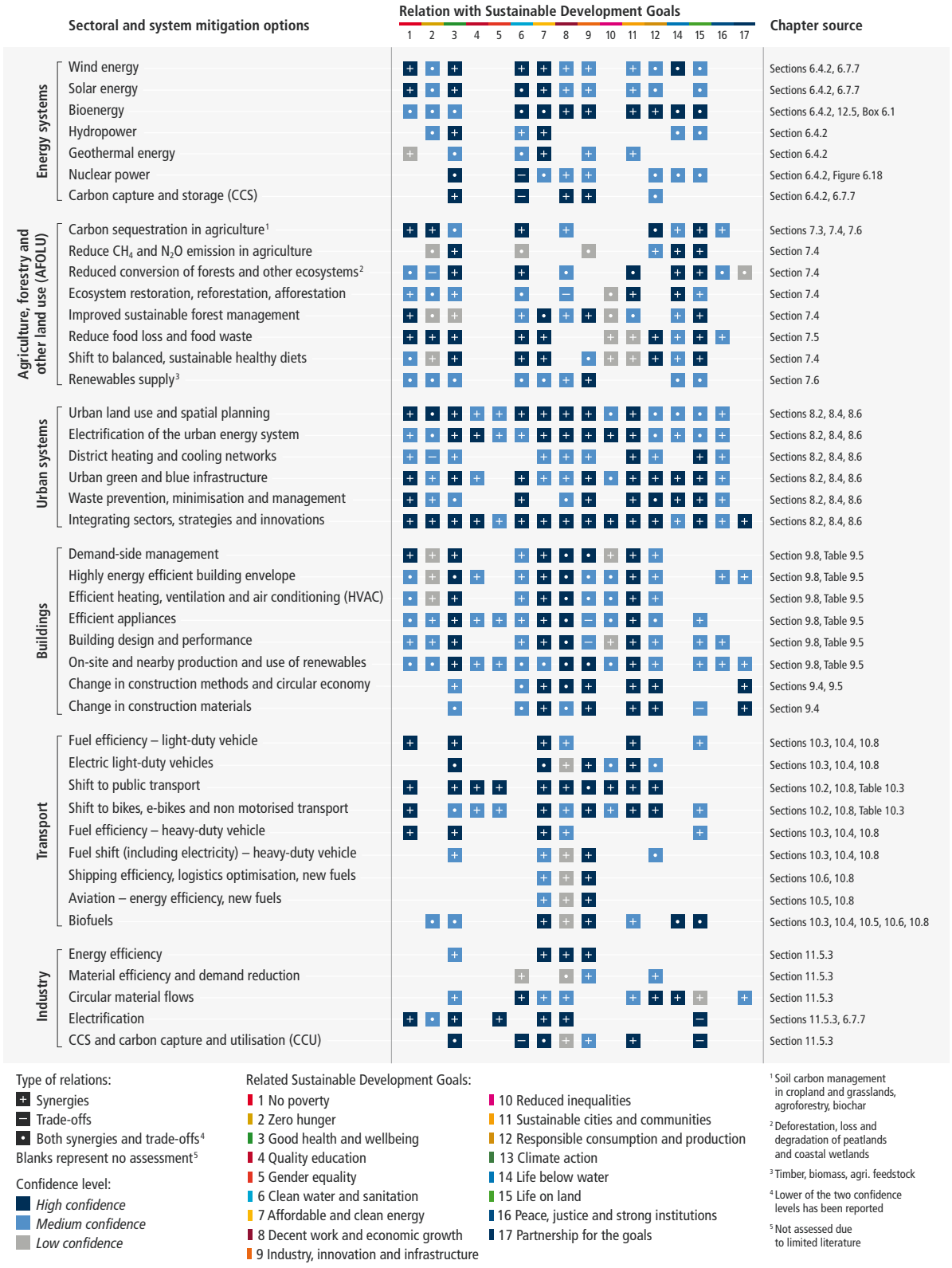


Figure SPM.8 | Synergies and trade-offs between sectoral and system mitigation options and the SDGs.

Figure SPM.8 (continued): Synergies and trade-offs between sectoral and system mitigation options and the SDGs. The sectoral chapters (Chapters 6–11) include qualitative assessments of synergies and trade-offs between sectoral mitigation options and the SDGs. Figure SPM.8 presents a summary of the chapter-level assessment for selected mitigation options (see Supplementary Material Table 17.SM.1 for the underlying assessment). The last column provides a line of sight to the sectoral chapters, which provide details on context specificity and dependence of interactions on the scale of implementation. Blank cells indicate that interactions have not been assessed due to limited literature. They do not indicate the absence of interactions between mitigation options and the SDGs. Confidence levels depend on the quality of evidence and level of agreement in the underlying literature assessed by the sectoral chapters. Where both synergies and trade-offs exist, the lower of the confidence levels for these interactions is used. Some mitigation options may have applications in more than one sector or system. The interactions between mitigation options and the SDGs might differ depending on the sector or system, and also on the context and the scale of implementation. Scale of implementation particularly matters when there is competition for scarce resources. {6.3, 6.4, 6.7, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 8.2, 8.4, 8.6, Figure 8.4, Supplementary Material Table 8.SM.1, Supplementary Material Table 8.SM.2, 9.4, 9.5, 9.8, Table 9.5, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.8, Table 10.3, 11.5, 12.5, 17.3, Figure 17.1, Supplementary Material Table 17.SM.1, Annex II.IV.12}

D.2 There is a strong link between sustainable development, vulnerability and climate risks. Limited economic, social and institutional resources often result in high vulnerability and low adaptive capacity, especially in developing countries (*medium confidence*). Several response options deliver both mitigation and adaptation outcomes, especially in human settlements, land management, and in relation to ecosystems. However, land and aquatic ecosystems can be adversely affected by some mitigation actions, depending on their implementation (*medium confidence*). Coordinated cross-sectoral policies and planning can maximise synergies and avoid or reduce trade-offs between mitigation and adaptation (*high confidence*). {3.7, 4.4, 13.8, 17.3; AR6 WGII}

D.2.1 Sustainable urban planning and infrastructure design including green roofs and facades, networks of parks and open spaces, management of urban forests and wetlands, urban agriculture, and water-sensitive design can deliver both mitigation and adaptation benefits in settlements (*medium confidence*). These options can also reduce flood risks, pressure on urban sewer systems, urban heat island effects, and can deliver health benefits from reduced air pollution (*high confidence*). There could also be trade-offs. For example, increasing urban density to reduce travel demand, could imply high vulnerability to heat waves and flooding (*high confidence*). (Figure SPM.8) {3.7, 8.2, 8.4, 12.5, 13.8, 17.3}

D.2.2 Land-related mitigation options with potential co-benefits for adaptation include agroforestry, cover crops, intercropping, perennial plants, restoring natural vegetation and rehabilitating degraded land. These can enhance resilience by maintaining land productivity and protecting and diversifying livelihoods. Restoration of mangroves and coastal wetlands sequesters carbon, while also reducing coastal erosion and protecting against storm surges, thus, reducing the risks from sea level rise and extreme weather. (*high confidence*) {4.4, 7.4, 7.6, 12.5, 13.8}

D.2.3 Some mitigation options can increase competition for scarce resources including land, water and biomass. Consequently, these can also reduce adaptive capacity, especially if deployed at larger scale and with high expansion rates thus exacerbating existing risks, in particular where land and water resources are very limited. Examples include the large-scale or poorly planned deployment of bioenergy, biochar, and afforestation of naturally unforested land. (*high confidence*) {12.5, 17.3}

D.2.4 Coordinated policies, equitable partnerships and integration of adaptation and mitigation within and across sectors can maximise synergies and minimise trade-offs and thereby enhance the support for climate action (*medium confidence*). Even if extensive global mitigation efforts are implemented, there will be a large need for financial, technical, and human resources for adaptation. Absence or limited resources in social and institutional systems can lead to poorly coordinated responses, thus reducing the potential for maximising mitigation and adaptation benefits, and increasing risk (*high confidence*). {12.6, 13.8, 17.1, 17.3}

D.3 Enhanced mitigation and broader action to shift development pathways towards sustainability will have distributional consequences within and between countries. Attention to equity and broad and meaningful participation of all relevant actors in decision-making at all scales can build social trust, and deepen and widen support for transformative changes. (*high confidence*) {3.6, 4.2, 4.5, 5.2, 13.2, 17.3, 17.4}

D.3.1 Countries at all stages of economic development seek to improve the well-being of people, and their development priorities reflect different starting points and contexts. Different contexts include social, economic, environmental, cultural, or political conditions, resource endowment, capabilities, international environment, and history. The enabling conditions for shifting development pathways towards increased sustainability will therefore also differ, giving rise to different needs. (*high confidence*) (Figure SPM.2) {1.6, 1.7, 2.4, 2.6, Cross-Chapter Box 5 in Chapter 4, 4.3.2, 17.4}

D.3.2 Ambitious mitigation pathways imply large and sometimes disruptive changes in economic structure, with significant distributional consequences, within and between countries. Equity remains a central element in the UN climate regime, notwithstanding shifts in differentiation between states over time and challenges in assessing fair shares. Distributional consequences within and between countries include shifting of income and employment during the transition from high- to low-emissions activities. While some jobs may be lost, low-emissions development can also open more opportunities to enhance skills and create more jobs that last, with differences across countries and sectors. Integrated policy packages can improve the ability to integrate considerations of equity, gender equality and justice. (*high confidence*) {1.4, 1.6, 3.6, 4.2, 5.2, Box 11.1, 14.3, 15.2, 15.5, 15.6}

D.3.3 Inequalities in the distribution of emissions and in the impacts of mitigation policies within countries affect social cohesion and the acceptability of mitigation and other environmental policies. Equity and just transitions can enable deeper ambitions for accelerated mitigation. Applying just transition principles and implementing them through collective and participatory decision-making processes is an effective way of integrating equity principles into policies at all scales, in different ways depending on national circumstances (*medium confidence*). This is already taking place in many countries and regions, as national just transition commissions or task forces, and related national policies, have been established in several countries. A multitude of actors, networks, and movements are engaged (*high confidence*). {1.6, 1.7, 2.4, 2.6, 4.5, 13.2, 13.9, 14.3, 14.5}

D.3.4 Broadening equitable access to domestic and international finance, technologies that facilitate mitigation, and capacity, while explicitly addressing needs can further integrate equity and justice into national and international policies and act as a catalyst for accelerating mitigation and shifting development pathways (*medium confidence*). The consideration of ethics and equity can help address the uneven distribution of adverse impacts associated with 1.5°C and higher levels of global warming, in all societies (*high confidence*). Consideration of climate justice can help to facilitate shifting development pathways towards sustainability, including through equitable sharing of benefits and burdens of mitigation, increasing resilience to the impacts of climate change, especially for vulnerable countries and communities, and equitably supporting those in need (*high confidence*). {1.4, 1.6, 1.7, 3.6, 4.2, 4.5, Box 5.10, 13.4, 13.8, 13.9, 14.3, 14.5, 15.2, 15.5, 15.6, 16.5, 17.3, 17.4; SR1.5 SPM, AR6 WGII Chapter 18}

E. Strengthening the Response

E.1 There are mitigation options which are feasible[71] to deploy at scale in the near term. Feasibility differs across sectors and regions, and according to capacities and the speed and scale of implementation. Barriers to feasibility would need to be reduced or removed, and enabling conditions[72] strengthened to deploy mitigation options at scale. These barriers and enablers include geophysical, environmental-ecological, technological, and economic factors, and especially institutional and socio-cultural factors. Strengthened near-term action beyond the NDCs (announced prior to UNFCCC COP26) can reduce and/or avoid long-term feasibility challenges of global modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot. (*high confidence*) {3.8, 6.4, 8.5, 9.9, 10.8, 12.3, Figure TS.31, Annex II.IV.11}

E.1.1 Several mitigation options, notably solar energy, wind energy, electrification of urban systems, urban green infrastructure, energy efficiency, demand-side management, improved forest- and crop/grassland management, and reduced food waste and loss, are technically viable, are becoming increasingly cost effective, and are generally supported by the public. This enables deployment in many regions (*high confidence*). While many mitigation options have environmental co-benefits, including improved air quality and reducing toxic waste, many also have adverse environmental impacts, such as reduced biodiversity, when applied at very large scale, for example very large scale bioenergy or large scale use of battery storage, that would have to be managed (*medium confidence*). Almost all mitigation options face institutional barriers that need to be addressed to enable their application at scale (*medium confidence*). {6.4, Figure 6.19, 7.4, 8.5, Figure 8.19, 9.9, Figure 9.20, 10.8, Figure 10.23, 12.3, Figure 12.4, Figure TS.31}

E.1.2 The feasibility of mitigation options varies according to context and time. For example, the institutional capacity to support deployment varies across countries; the feasibility of options that involve large-scale land-use changes varies across regions; spatial planning has a higher potential at early stages of urban development; the potential of geothermal is site specific; and capacities, cultural and local conditions can either inhibit or enable demand-side responses. The deployment of solar and wind energy has been assessed to become increasingly feasible over time. The feasibility of some options can increase when combined or integrated, such as using land for both agriculture and centralised solar production. (*high confidence*) {6.4, 6.6, Supplementary Material Table 6.SM, 7.4, 8.5, Supplementary Material Table 8.SM.2, 9.9, Supplementary Material Table 9.SM.1, 10.8, Appendix 10.3, 12.3, Tables 12.SM.2.1 to 12.SM.2.6}

E.1.3 Feasibility depends on the scale and speed of implementation. Most options face barriers when they are implemented rapidly at a large scale, but the scale at which barriers manifest themselves varies. Strengthened and coordinated near-term actions in cost-effective modelled global pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower, reduce the overall risks to the feasibility of the system transitions, compared to modelled pathways with relatively delayed or uncoordinated action.[73] (*high confidence*) {3.8, 6.4, 10.8, 12.3}

---

[71] In this report, the term 'feasibility' refers to the potential for a mitigation or adaptation option to be implemented. Factors influencing feasibility are context-dependent and may change over time. Feasibility depends on geophysical, environmental-ecological, technological, economic, socio-cultural and institutional factors that enable or constrain the implementation of an option. The feasibility of options may change when different options are combined and increase when enabling conditions are strengthened.

[72] In this report, the term 'enabling conditions' refers to conditions that enhance the feasibility of adaptation and mitigation options. Enabling conditions include finance, technological innovation, strengthening policy instruments, institutional capacity, multi-level governance, and changes in human behaviour and lifestyles.

[73] The future feasibility challenges described in the modelled pathways may differ from the real-world feasibility experiences of the past.

E.2 In all countries, mitigation efforts embedded within the wider development context can increase the pace, depth and breadth of emissions reductions (*medium confidence*). Policies that shift development pathways towards sustainability can broaden the portfolio of available mitigation responses, and enable the pursuit of synergies with development objectives (*medium confidence*). Actions can be taken now to shift development pathways and accelerate mitigation and transitions across systems (*high confidence*). {4.3, 4.4, Cross-Chapter Box 5 in Chapter 4, 5.2, 5.4, 13.9, 14.5, 15.6, 16.3, 16.4, 16.5}

E.2.1 Current development pathways may create behavioural, spatial, economic and social barriers to accelerated mitigation at all scales (*high confidence*). Choices made by policymakers, citizens, the private sector and other stakeholders influence societies' development pathways (*high confidence*). Actions that steer, for example, energy and land systems transitions, economy-wide structural change, and behaviour change, can shift development pathways towards sustainability[74] (*medium confidence*). {4.3, Cross-Chapter Box 5 in Chapter 4, 5.4, 13.9}

E.2.2 Combining mitigation with policies to shift development pathways, such as broader sectoral policies, policies that induce lifestyle or behaviour changes, financial regulation, or macroeconomic policies can overcome barriers and open up a broader range of mitigation options (*high confidence*). It can also facilitate the combination of mitigation and other development goals (*high confidence*). For example, measures promoting walkable urban areas combined with electrification and renewable energy can create health co-benefits from cleaner air and benefits from enhanced mobility (*high confidence*). Coordinated housing policies that broaden relocation options can make mitigation measures in transport more effective (*medium confidence*). {3.2, 4.3, 4.4, Cross-Chapter Box 5 in Chapter 4, 5.3, 8.2, 8.4}

E.2.3 Institutional and regulatory capacity, innovation, finance, improved governance and collaboration across scales, and multi-objective policies enable enhanced mitigation and shifts in development pathways. Such interventions can be mutually reinforcing and establish positive feedback mechanisms, resulting in accelerated mitigation. (*high confidence*) {4.4, 5.4, Figure 5.14, 5.6, 9.9, 13.9, 14.5, 15.6, 16.3, 16.4, 16.5, Cross-Chapter Box 12 in Chapter 16}

E.2.4 Enhanced action on all the above enabling conditions can be taken now (*high confidence*). In some situations, such as with innovation in technology at an early stage of development and some changes in behaviour towards low emissions, because the enabling conditions may take time to be established, action in the near term can yield accelerated mitigation in the mid-term (*medium confidence*). In other situations, the enabling conditions can be put in place and yield results in a relatively short time frame, for example the provision of energy related information, advice and feedback to promote energy saving behaviour (*high confidence*). {4.4, 5.4, Figure 5.14, 5.6, 6.7, 9.9, 13.9, 14.5, 15.6, 16.3, 16.4, 16.5, Cross-Chapter Box 12 in Chapter 16}

E.3 Climate governance, acting through laws, strategies and institutions, based on national circumstances, supports mitigation by providing frameworks through which diverse actors interact, and a basis for policy development and implementation (*medium confidence*). Climate governance is most effective when it integrates across multiple policy domains, helps realise synergies and minimise trade-offs, and connects national and sub-national policymaking levels (*high confidence*). Effective and equitable climate governance builds on engagement with civil society actors, political actors, businesses, youth, labour, media, Indigenous Peoples and local communities (*medium confidence*). {5.4, 5.6, 8.5, 9.9, 13.2, 13.7, 13.9}

E.3.1 Climate governance enables mitigation by providing an overall direction, setting targets, mainstreaming climate action across policy domains, enhancing regulatory certainty, creating specialised organisations and creating the context to mobilise finance (*medium confidence*). These functions can be promoted by climate-relevant laws, which are growing in number, or climate strategies, among others, based on national and sub-national context (*medium confidence*). Framework laws set an overarching legal basis, either operating through a target and implementation approach, or a sectoral mainstreaming approach, or both, depending on national circumstance (*medium confidence*). Direct national and sub-national laws that explicitly target mitigation and indirect laws that impact emissions through mitigation-related policy domains have both been shown to be relevant to mitigation outcomes (*medium confidence*). {13.2}

[74] Sustainability may be interpreted differently in various contexts as societies pursue a variety of sustainable development objectives.

E.3.2 Effective national climate institutions address coordination across sectors, scales and actors, build consensus for action among diverse interests, and inform strategy setting (*medium confidence*). These functions are often accomplished through independent national expert bodies, and high-level coordinating bodies that transcend departmental mandates. Complementary sub-national institutions tailor mitigation actions to local context and enable experimentation but can be limited by inequities and resource and capacity constraints (*high confidence*). Effective governance requires adequate institutional capacity at all levels (*high confidence*). {4.4, 8.5, 9.9, 11.3, 11.5, 11.6, 13.2, 13.5, 13.7, 13.9}

E.3.3 The extent to which civil society actors, political actors, businesses, youth, labour, media, Indigenous Peoples, and local communities are engaged influences political support for climate change mitigation and eventual policy outcomes. Structural factors of national circumstances and capabilities (e.g., economic and natural endowments, political systems and cultural factors and gender considerations) affect the breadth and depth of climate governance. Mitigation options that align with prevalent ideas, values and beliefs are more easily adopted and implemented. Climate-related litigation, for example by governments, private sector, civil society and individuals, is growing - with a large number of cases in some developed countries, and with a much smaller number in some developing countries - and in some cases, has influenced the outcome and ambition of climate governance. (*medium confidence*) {5.2, 5.4, 5.5, 5.6, 9.9, 13.3, 13.4}

E.4 Many regulatory and economic instruments have already been deployed successfully. Instrument design can help address equity and other objectives. These instruments could support deep emissions reductions and stimulate innovation if scaled up and applied more widely (*high confidence*). Policy packages that enable innovation and build capacity are better able to support a shift towards equitable low-emission futures than are individual policies (*high confidence*). Economy-wide packages, consistent with national circumstances, can meet short-term economic goals while reducing emissions and shifting development pathways towards sustainability (*medium confidence*). {Cross-Chapter Box 5 in Chapter 4, 13.6, 13.7, 13.9, 16.3, 16.4, 16.6}

E.4.1 A wide range of regulatory instruments at the sectoral level have proven effective in reducing emissions. These instruments, and broad-based approaches including relevant economic instruments,[75] are complementary (*high confidence*). Regulatory instruments that are designed to be implemented with flexibility mechanisms can reduce costs (*medium confidence*). Scaling up and enhancing the use of regulatory instruments, consistent with national circumstances, could improve mitigation outcomes in sectoral applications, including but not limited to renewable energy, land use and zoning, building codes, vehicle and energy efficiency, fuel standards, and low-emissions industrial processes and materials (*high confidence*). {6.7, 7.6, 8.4, 9.9, 10.4, 11.5, 11.6, 13.6}

E.4.2 Economic instruments have been effective in reducing emissions, complemented by regulatory instruments mainly at the national and also sub-national and regional level (*high confidence*). Where implemented, carbon pricing instruments have incentivised low-cost emissions reduction measures, but have been less effective, on their own and at prevailing prices during the assessment period, in promoting the higher-cost measures necessary for further reductions (*medium confidence*). Equity and distributional impacts of such carbon pricing instruments can be addressed by using revenue from carbon taxes or emissions trading to support low-income households, among other approaches (*high confidence*). Practical experience has informed instrument design and helped to improve predictability, environmental effectiveness, economic efficiency, distributional goals and social acceptance (*high confidence*). Removing fossil fuel subsidies would reduce emissions, improve public revenue and macroeconomic performance, and yield other environmental and sustainable development benefits; subsidy removal may have adverse distributional impacts especially on the most economically vulnerable groups which, in some cases can be mitigated by measures such as redistributing revenue saved, all of which depend on national circumstances (*high confidence*); fossil fuel subsidy removal is projected by various studies to reduce global CO_2 emissions by 1–4%, and GHG emissions by up to 10% by 2030, varying across regions (*medium confidence*). {6.3, 13.6}

E.4.3 Low-emission technological innovation is strengthened through the combination of dedicated technology-push policies and investments (e.g., for scientific training, R&D, demonstration), with tailored demand-pull policies (e.g., standards, feed-in tariffs, taxes), which create incentives and market opportunities. Developing countries' abilities to deploy low-emission technologies, seize socio-economic benefits and manage trade-offs would be enhanced with increased financial resources and capacity for innovation which are currently concentrated in developed countries, alongside technology transfer. (*high confidence*) {16.2, 16.3, 16.4, 16.5}

---

[75] Economic instruments are structured to provide a financial incentive to reduce emissions and include, among others, market- and price-based instruments.

E.4.4 Effective policy packages would be comprehensive in coverage, harnessed to a clear vision for change, balanced across objectives, aligned with specific technology and system needs, consistent in terms of design and tailored to national circumstances. They are better able to realise synergies and avoid trade-offs across climate and development objectives. Examples include: emissions reductions from buildings through a mix of efficiency targets, building codes, appliance performance standards, information provision, carbon pricing, finance and technical assistance; and industrial GHG emissions reductions through innovation support, market creation and capacity building. (*high confidence*) {4.4, 6.7, 9.9, 11.6, 13.7, 13.9, 16.3, 16.4}

E.4.5 Economy-wide packages that support mitigation and avoid negative environmental outcomes include: long-term public spending commitments; pricing reform; and investment in education and training, natural capital, R&D and infrastructure (*high confidence*). They can meet short-term economic goals while reducing emissions and shifting development pathways towards sustainability (*medium confidence*). Infrastructure investments can be designed to promote low-emissions futures that meet development needs (*medium confidence*). {Cross-Chapter Box 5 in Chapter 4, 5.4, 5.6, 8.5, 13.6, 13.9, 16.3, 16.5, 16.6}

E.4.6 National policies to support technology development and diffusion, and participation in international markets for emission reduction, can bring positive spillover effects for other countries (*medium confidence*), although reduced demand for fossil fuels could result in costs to exporting countries (*high confidence*). There is no consistent evidence that current emission trading systems have led to significant emissions leakage, which can be attributed to design features aimed at minimising competitiveness effects, among other reasons (*medium confidence*). {13.6, 13.7, 13.8, 16.2, 16.3, 16.4}

E.5 Tracked financial flows fall short of the levels needed to achieve mitigation goals across all sectors and regions. The challenge of closing gaps is largest in developing countries as a whole. Scaling up mitigation financial flows can be supported by clear policy choices and signals from governments and the international community (*high confidence*). Accelerated international financial cooperation is a critical enabler of low-GHG and just transitions, and can address inequities in access to finance and the costs of, and vulnerability to, the impacts of climate change (*high confidence*). {15.2, 15.3, 15.4, 15.5, 15.6}

E.5.1 Average annual modelled investment requirements for 2020 to 2030 in scenarios that limit warming to 2°C or 1.5°C are a factor of three to six greater than current levels, and total mitigation investments (public, private, domestic and international) would need to increase across all sectors and regions (*medium confidence*). Mitigation investment gaps are wide for all sectors, and widest for the AFOLU sector in relative terms and for developing countries[76] (*high confidence*). Financing and investment requirements for adaptation, reduction of losses and damages, general infrastructure, regulatory environment and capacity building, and climate-responsive social protection further exacerbate the magnitude of the challenges for developing countries to attract financing (*high confidence*). {3.2, 14.4, 15.1, 15.2, 15.3, 15.4, 15.5}

E.5.2 There is sufficient global capital and liquidity to close global investment gaps, given the size of the global financial system, but there are barriers to redirect capital to climate action both within and outside the global financial sector, and in the macroeconomic headwinds facing developing regions. Barriers to the deployment of commercial finance from within the financial sector as well as macroeconomic considerations include: inadequate assessment of climate-related risks and investment opportunities; regional mismatch between available capital and investment needs; home bias factors; country indebtedness levels; economic vulnerability; and limited institutional capacities (*high confidence*). Challenges from outside the financial sector include: limited local capital markets; unattractive risk-return profiles, in particular due to missing or weak regulatory environments consistent with ambition levels; limited institutional capacity to ensure safeguards; standardisation, aggregation, scalability and replicability of investment opportunities and financing models; and, a pipeline ready for commercial investments. (*high confidence*) {15.2, 15.3, 15.5, 15.6}

E.5.3 Accelerated financial support for developing countries from developed countries and other sources is a critical enabler to enhance mitigation action and address inequities in access to finance, including its costs, terms and conditions, and economic vulnerability to climate change for developing countries (*high confidence*). Scaled-up public grants for mitigation and adaptation funding for vulnerable regions, especially in Sub-Saharan Africa, would be cost-effective and have high social returns in terms of access to basic energy (*high confidence*). Options for scaling up mitigation in developing regions include: increased levels of public finance and publicly mobilised private finance flows from developed to developing countries in the context of the USD100 billion-a-year goal; increase the use of public guarantees to reduce risks and leverage private flows

[76] In modelled pathways, regional investments are projected to occur when and where they are most cost-effective to limit global warming. The model quantifications help to identify high-priority areas for cost-effective investments, but do not provide any indication on who would finance the regional investments.

at lower cost; local capital markets development; and building greater trust in international cooperation processes (*high confidence*). A coordinated effort to make the post-pandemic recovery sustainable and increased flows of financing over the next decade can accelerate climate action, including in developing regions and countries facing high debt costs, debt distress and macroeconomic uncertainty (*high confidence*). {15.2, 15.3, 15.4, 15.5, 15.6, Box 15.6}

E.5.4 Clear signalling by governments and the international community, including a stronger alignment of public sector finance and policy, and higher levels of public sector climate finance, reduces uncertainty and transition risks for the private sector. Depending on national contexts, investors and financial intermediaries, central banks, and financial regulators can support climate action and can shift the systemic underpricing of climate-related risk by increasing awareness, transparency and consideration of climate-related risk, and investment opportunities. Financial flows can also be aligned with funding needs through: greater support for technology development; a continued role for multilateral and national climate funds and development banks; lowering financing costs for underserved groups through entities such as green banks existing in some countries, funds and risk-sharing mechanisms; economic instruments which consider economic and social equity and distributional impacts; gender-responsive and women-empowerment programmes as well as enhanced access to finance for local communities and Indigenous Peoples and small land owners; and greater public-private cooperation. (*high confidence*) {15.2, 15.5, 15.6}

E.6 International cooperation is a critical enabler for achieving ambitious climate change mitigation goals. The UNFCCC, Kyoto Protocol, and Paris Agreement are supporting rising levels of national ambition and encouraging development and implementation of climate policies, although gaps remain. Partnerships, agreements, institutions and initiatives operating at the sub-global and sectoral levels and engaging multiple actors are emerging, with mixed levels of effectiveness. (*high confidence*) {8.5, 14.2, 14.3, 14.5, 14.6, 15.6, 16.5}

E.6.1 Internationally agreed processes and goals, such as those in the UNFCCC, Kyoto Protocol, and Paris Agreement – including transparency requirements for national reporting on emissions, actions and support, and tracking progress towards the achievement of Nationally Determined Contributions – are enhancing international cooperation, national ambition and policy development. International financial, technology and capacity building support to developing countries will enable greater implementation and encourage ambitious Nationally Determined Contributions over time. (*medium confidence*) {14.3}

E.6.2 International cooperation on technology development and transfer accompanied by capacity building, knowledge sharing, and technical and financial support can accelerate the global diffusion of mitigation technologies, practices and policies at national and sub-national levels, and align these with other development objectives (*high confidence*). Challenges in and opportunities to enhance innovation cooperation exist, including in the implementation of elements of the UNFCCC and the Paris Agreement as per the literature assessed, such as in relation to technology development and transfer, and finance (*high confidence*). International cooperation on innovation works best when tailored to specific institutional and capability contexts, when it benefits local value chains, when partners collaborate equitably and on voluntary and mutually agreed terms, when all relevant voices are heard, and when capacity building is an integral part of the effort (*medium confidence*). Support to strengthen technological innovation systems and innovation capabilities, including through financial support in developing countries would enhance engagement in and improve international cooperation on innovation (*high confidence*). {4.4, 14.2, 14.4, 16.3, 16.5, 16.6}

E.6.3 Transnational partnerships can stimulate policy development, low-emissions technology diffusion and emission reductions by linking sub-national and other actors, including cities, regions, non-governmental organisations and private sector entities, and by enhancing interactions between state and non-state actors. While this potential of transnational partnerships is evident, uncertainties remain over their costs, feasibility, and effectiveness. Transnational networks of city governments are leading to enhanced ambition and policy development and a growing exchange of experience and best practices (*medium confidence*). {8.5, 11.6, 14.5, 16.5, Cross-Chapter Box 12 in Chapter 16}

E.6.4 International environmental and sectoral agreements, institutions, and initiatives are helping, and in some cases may help, to stimulate low-GHG emissions investment and reduce emissions. Agreements addressing ozone depletion and transboundary air pollution are contributing to mitigation, and in other areas, such as atmospheric emissions of mercury, may contribute to mitigation (*high confidence*). Trade rules have the potential to stimulate international adoption of mitigation technologies and policies, but may also limit countries' ability to adopt trade-related climate policies (*medium confidence*). Current sectoral levels of ambition vary, with emission reduction aspirations in international aviation and shipping lower than in many other sectors (*medium confidence*). {14.5, 14.6}

SYNTHESIS REPORT
OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)

Summary for Policymakers

Core Writing Team: Hoesung Lee (Chair), Katherine Calvin (USA), Dipak Dasgupta (India/USA), Gerhard Krinner (France/Germany), Aditi Mukherji (India), Peter Thorne (Ireland/United Kingdom), Christopher Trisos (South Africa), José Romero (Switzerland), Paulina Aldunce (Chile), Ko Barrett (USA), Gabriel Blanco (Argentina), William W. L. Cheung (Canada), Sarah L. Connors (France/United Kingdom), Fatima Denton (The Gambia), Aïda Diongue-Niang (Senegal), David Dodman (Jamaica/United Kingdom/Netherlands), Matthias Garschagen (Germany), Oliver Geden (Germany), Bronwyn Hayward (New Zealand), Christopher Jones (United Kingdom), Frank Jotzo (Australia), Thelma Krug (Brazil), Rodel Lasco (Philippines), June-Yi Lee (Republic of Korea), Valérie Masson-Delmotte (France), Malte Meinshausen (Australia/Germany), Katja Mintenbeck (Germany), Abdalah Mokssit (Morocco), Friederike E. L. Otto (United Kingdom/Germany), Minal Pathak (India), Anna Pirani (Italy), Elvira Poloczanska (UK/Australia), Hans-Otto Pörtner (Germany), Aromar Revi (India), Debra C. Roberts (South Africa), Joyashree Roy (India/Thailand), Alex C. Ruane (USA), Jim Skea (United Kingdom), Priyadarshi R. Shukla (India), Raphael Slade (United Kingdom), Aimée Slangen (The Netherlands), Youba Sokona (Mali), Anna A. Sörensson (Argentina), Melinda Tignor (USA/Germany), Detlef van Vuuren (The Netherlands), Yi-Ming Wei (China), Harald Winkler (South Africa), Panmao Zhai (China), Zinta Zommers (Latvia)

Extended Writing Team: Jean-Charles Hourcade (France), Francis X. Johnson (Thailand/Sweden), Shonali Pachauri (Austria/India), Nicholas P. Simpson (South Africa/Zimbabwe), Chandni Singh (India), Adelle Thomas (Bahamas), Edmond Totin (Benin)

Contributing Authors: Andrés Alegría (Germany/Honduras), Kyle Armour (USA), Birgit Bednar-Friedl (Austria), Kornelis Blok (The Netherlands) Guéladio Cissé (Switzerland/Mauritania/France), Frank Dentener (EU/Netherlands), Siri Eriksen (Norway), Erich Fischer (Switzerland), Gregory Garner (USA), Céline Guivarch (France), Marjolijn Haasnoot (The Netherlands), Gerrit Hansen (Germany), Matthias Hauser (Switzerland), Ed Hawkins (UK), Tim Hermans (The Netherlands), Robert Kopp (USA), Noëmie Leprince-Ringuet (France), Debora Ley (Mexico/Guatemala), Jared Lewis (Australia/New Zealand), Chloé Ludden (Germany/France), Zebedee Nicholls (Australia), Leila Niamir (Iran/The Netherlands/Austria), Shreya Some (India/Thailand), Sophie Szopa (France), Blair Trewin (Australia), Kaj-Ivar van der Wijst (The Netherlands), Gundula Winter (The Netherlands/Germany), Maximilian Witting (Germany)

Review Editors: Paola Arias (Colombia), Mercedes Bustamante (Brazil), Ismail Elgizouli (Sudan), Gregory Flato (Canada), Mark Howden (Australia), Carlos Méndez (Venezuela), Joy Pereira (Malaysia), Ramón Pichs-Madruga (Cuba), Steven K Rose (USA), Yamina Saheb (Algeria/France), Roberto Sánchez (Mexico), Diana Ürge-Vorsatz (Hungary), Cunde Xiao (China), Noureddine Yassaa (Algeria)

Scientific Steering Committee: Hoesung Lee (Chair, IPCC), Amjad Abdulla (Maldives), Edvin Aldrian (Indonesia), Ko Barrett (United States of America), Eduardo Calvo (Peru), Carlo Carraro (Italy), Fatima Driouech (Morocco), Andreas Fischlin (Switzerland), Jan Fuglestvedt (Norway), Diriba Korecha Dadi (Ethiopia), Thelma Krug (Brazil), Nagmeldin G.E. Mahmoud (Sudan), Valérie Masson-Delmotte (France), Carlos Méndez (Venezuela), Joy Jacqueline Pereira (Malaysia), Ramón Pichs-Madruga (Cuba), Hans-Otto Pörtner (Germany), Andy Reisinger (New Zealand), Debra Roberts (South Africa), Sergey Semenov (Russian Federation), Priyadarshi Shukla (India), Jim Skea (United Kingdom), Youba Sokona (Mali), Kiyoto Tanabe (Japan), Muhammad Irfan Tariq (Pakistan), Diana Ürge-Vorsatz (Hungary), Carolina Vera (Argentina), Pius Yanda (United Republic of Tanzania), Noureddine Yassaa (Algeria), Taha M. Zatari (Saudi Arabia), Panmao Zhai (China)

Visual Conception and Information Design: Arlene Birt (USA), Meeyoung Ha (Republic of Korea)

Notes: TSU Compiled Version

Table of Contents

Introduction 3

A. Current Status and Trends 4

Box SPM.1 Scenarios and pathways 9

B. Future Climate Change, Risks, and Long-Term Responses 12

C. Responses in the Near Term 25

Sources cited in this Summary for Policymakers (SPM)

References for material contained in this report are given in curly brackets {} at the end of each paragraph.

In the Summary for Policymakers, the references refer to the numbers of the Sections, figures, tables and boxes in the underlying Longer Report of the Synthesis Report, or to other sections of the SPM itself (in round brackets).

Other IPCC reports cited in this Synthesis Report:
AR5 Fifth Assessment Report

Introduction

This Synthesis Report (SYR) of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6) summarises the state of knowledge of climate change, its widespread impacts and risks, and climate change mitigation and adaptation. It integrates the main findings of the Sixth Assessment Report (AR6) based on contributions from the three Working Groups[1], and the three Special Reports[2]. The summary for Policymakers (SPM) is structured in three parts: SPM.A Current Status and Trends, SPM.B Future Climate Change, Risks, and Long-Term Responses, and SPM.C Responses in the Near Term[3].

This report recognizes the interdependence of climate, ecosystems and biodiversity, and human societies; the value of diverse forms of knowledge; and the close linkages between climate change adaptation, mitigation, ecosystem health, human well-being and sustainable development, and reflects the increasing diversity of actors involved in climate action.

Based on scientific understanding, key findings can be formulated as statements of fact or associated with an assessed level of confidence using the IPCC calibrated language[4].

[1] The three Working Group contributions to AR6 are: AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis; AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability; and AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Their assessments cover scientific literature accepted for publication respectively by 31 January 2021, 1 September 2021 and 11 October 2021.

[2] The three Special Reports are: Global Warming of 1.5°C (2018): an IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (SR1.5); Climate Change and Land (2019): an IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (SRCCL); and The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (2019) (SROCC). The Special Reports cover scientific literature accepted for publication respectively by 15 May 2018, 7 April 2019 and 15 May 2019.

[3] In this report, the near term is defined as the period until 2040. The long term is defined as the period beyond 2040.

[4] Each finding is grounded in an evaluation of underlying evidence and agreement. The IPCC calibrated language uses five qualifiers to express a level of confidence: very low, low, medium, high and very high, and typeset in italics, for example, *medium confidence*. The following terms are used to indicate the assessed likelihood of an outcome or a result: virtually certain 99–100% probability, very likely 90–100%, likely 66–100%, more likely than not >50–100%, about as likely as not 33–66%, unlikely 0–33%, very unlikely 0–10%, exceptionally unlikely 0–1%. Additional terms (extremely likely 95–100%; more likely than not >50–100%; and extremely unlikely 0–5%) are also used when appropriate. Assessed likelihood is typeset in italics, e.g., *very likely*. This is consistent with AR5 and the other AR6 Reports.

A. Current Status and Trends

Observed Warming and its Causes

A.1 Human activities, principally through emissions of greenhouse gases, have unequivocally caused global warming, with global surface temperature reaching 1.1°C above 1850–1900 in 2011–2020. Global greenhouse gas emissions have continued to increase, with unequal historical and ongoing contributions arising from unsustainable energy use, land use and land-use change, lifestyles and patterns of consumption and production across regions, between and within countries, and among individuals (*high confidence*). {2.1, Figure 2.1, Figure 2.2}

A.1.1 Global surface temperature was 1.09°C [0.95°C–1.20°C][5] higher in 2011–2020 than 1850–1900[6], with larger increases over land (1.59°C [1.34°C–1.83°C]) than over the ocean (0.88°C [0.68°C–1.01°C]). Global surface temperature in the first two decades of the 21st century (2001-2020) was 0.99 [0.84 to 1.10]°C higher than 1850-1900. Global surface temperature has increased faster since 1970 than in any other 50-year period over at least the last 2000 years (*high confidence*). {2.1.1, Figure 2.1}

A.1.2 The *likely* range of total human-caused global surface temperature increase from 1850–1900 to 2010–2019[7] is 0.8°C–1.3°C, with a best estimate of 1.07°C. Over this period, it is *likely* that well-mixed greenhouse gases (GHGs) contributed a warming of 1.0°C–2.0°C[8], and other human drivers (principally aerosols) contributed a cooling of 0.0°C–0.8°C, natural (solar and volcanic) drivers changed global surface temperature by –0.1°C to +0.1°C, and internal variability changed it by –0.2°C to +0.2°C. {2.1.1, Figure 2.1}

A.1.3 Observed increases in well-mixed GHG concentrations since around 1750 are unequivocally caused by GHG emissions from human activities over this period. Historical cumulative net CO_2 emissions from 1850 to 2019 were 2400±240 $GtCO_2$ of which more than half (58%) occurred between 1850 and 1989, and about 42% occurred between 1990 and 2019 (*high confidence*). In 2019, atmospheric CO_2 concentrations (410 parts per million) were higher than at any time in at least 2 million years (*high confidence*), and concentrations of methane (1866 parts per billion) and nitrous oxide (332 parts per billion) were higher than at any time in at least 800,000 years (*very high confidence*). {2.1.1, Figure 2.1}

A.1.4 Global net anthropogenic GHG emissions have been estimated to be 59±6.6 $GtCO_2$-eq[9] in 2019, about 12% (6.5 $GtCO_2$-eq) higher than in 2010 and 54% (21 $GtCO_2$-eq) higher than in 1990, with the largest share and growth in gross GHG emissions occurring in CO_2 from fossil fuels combustion and industrial processes (CO_2-FFI) followed by methane, whereas the highest relative growth occurred in fluorinated gases (F-gases), starting from low levels in 1990. Average annual GHG emissions during 2010-2019 were higher than in any previous decade on record, while the rate of growth between 2010 and 2019 (1.3% $year^{-1}$) was lower than that between 2000 and 2009 (2.1% $year^{-1}$). In 2019, approximately 79% of global GHG emissions came from the sectors of energy, industry, transport and buildings together and 22%[10] from agriculture, forestry and other land use (AFOLU). Emissions reductions in CO_2-FFI due to improvements in energy intensity of GDP and carbon intensity of energy, have been less than emissions increases from rising global activity levels in industry, energy supply, transport, agriculture and buildings. (*high confidence*) {2.1.1}

[5] Ranges given throughout the SPM represent *very likely* ranges (5–95% range) unless otherwise stated.

[6] The estimated increase in global surface temperature since AR5 is principally due to further warming since 2003–2012 (+0.19°C [0.16°C–0.22°C]). Additionally, methodological advances and new datasets have provided a more complete spatial representation of changes in surface temperature, including in the Arctic. These and other improvements have also increased the estimate of global surface temperature change by approximately 0.1°C, but this increase does not represent additional physical warming since AR5.

[7] The period distinction with A.1.1 arises because the attribution studies consider this slightly earlier period. The observed warming to 2010–2019 is 1.06°C [0.88°C–1.21°C].

[8] Contributions from emissions to the 2010-2019 warming relative to 1850-1900 assessed from radiative forcing studies are: CO_2 0.8 [0.5 to 1.2]°C; methane 0.5 [0.3 to 0.8]°C; nitrous oxide 0.1 [0.0 to 0.2]°C and fluorinated gases 0.1 [0.0 to 0.2]°C. {2.1.1}

[9] GHG emission metrics are used to express emissions of different greenhouse gases in a common unit. Aggregated GHG emissions in this report are stated in CO_2-equivalents (CO_2-eq) using the Global Warming Potential with a time horizon of 100 years (GWP100) with values based on the contribution of Working Group I to the AR6. The AR6 WGI and WGIII reports contain updated emission metric values, evaluations of different metrics with regard to mitigation objectives, and assess new approaches to aggregating gases. The choice of metric depends on the purpose of the analysis and all GHG emission metrics have limitations and uncertainties, given that they simplify the complexity of the physical climate system and its response to past and future GHG emissions. {2.1.1}

[10] GHG emission levels are rounded to two significant digits; as a consequence, small differences in sums due to rounding may occur. {2.1.1}

A.1.5 Historical contributions of CO_2 emissions vary substantially across regions in terms of total magnitude, but also in terms of contributions to CO_2-FFI and net CO_2 emissions from land use, land-use change and forestry (CO_2-LULUCF). In 2019, around 35% of the global population live in countries emitting more than 9 tCO_2-eq per capita[11] (excluding CO_2-LULUCF) while 41% live in countries emitting less than 3 tCO_2-eq per capita; of the latter a substantial share lacks access to modern energy services. Least developed countries (LDCs) and Small Island Developing States (SIDS) have much lower per capita emissions (1.7 tCO_2-eq and 4.6 tCO_2-eq, respectively) than the global average (6.9 tCO_2-eq), excluding CO_2-LULUCF. The 10% of households with the highest per capita emissions contribute 34–45% of global consumption-based household GHG emissions, while the bottom 50% contribute 13–15%. *(high confidence)* {2.1.1, Figure 2.2}

Observed Changes and Impacts

A.2 Widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere have occurred. Human-caused climate change is already affecting many weather and climate extremes in every region across the globe. This has led to widespread adverse impacts and related losses and damages to nature and people (*high confidence*). Vulnerable communities who have historically contributed the least to current climate change are disproportionately affected (*high confidence*). {2.1, Table 2.1, Figure 2.2 and 2.3} (Figure SPM.1)

A.2.1 It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Global mean sea level increased by 0.20 [0.15–0.25] m between 1901 and 2018. The average rate of sea level rise was 1.3 [0.6 to 2.1]mm yr^{-1} between 1901 and 1971, increasing to 1.9 [0.8 to 2.9] mm yr^{-1} between 1971 and 2006, and further increasing to 3.7 [3.2 to 4.2] mm yr^{-1} between 2006 and 2018 (*high confidence*). Human influence was *very likely* the main driver of these increases since at least 1971. Evidence of observed changes in extremes such as heatwaves, heavy precipitation, droughts, and tropical cyclones, and, in particular, their attribution to human influence, has further strengthened since AR5. Human influence has *likely* increased the chance of compound extreme events since the 1950s, including increases in the frequency of concurrent heatwaves and droughts (*high confidence*). {2.1.2, Table 2.1, Figure 2.3, Figure 3.4} (Figure SPM.1)

A.2.2 Approximately 3.3–3.6 billion people live in contexts that are highly vulnerable to climate change. Human and ecosystem vulnerability are interdependent. Regions and people with considerable development constraints have high vulnerability to climatic hazards. Increasing weather and climate extreme events have exposed millions of people to acute food insecurity[12] and reduced water security, with the largest adverse impacts observed in many locations and/or communities in Africa, Asia, Central and South America, LDCs, Small Islands and the Arctic, and globally for Indigenous Peoples, small-scale food producers and low-income households. Between 2010 and 2020, human mortality from floods, droughts and storms was 15 times higher in highly vulnerable regions, compared to regions with very low vulnerability. (*high confidence*) {2.1.2, 4.4} (Figure SPM.1)

A.2.3 Climate change has caused substantial damages, and increasingly irreversible losses, in terrestrial, freshwater, cryospheric, and coastal and open ocean ecosystems (*high confidence*). Hundreds of local losses of species have been driven by increases in the magnitude of heat extremes (*high confidence*) with mass mortality events recorded on land and in the ocean (*very high confidence*). Impacts on some ecosystems are approaching irreversibility such as the impacts of hydrological changes resulting from the retreat of glaciers, or the changes in some mountain (*medium confidence*) and Arctic ecosystems driven by permafrost thaw (*high confidence*). {2.1.2, Figure 2.3} (Figure SPM.1)

A.2.4 Climate change has reduced food security and affected water security, hindering efforts to meet Sustainable Development Goals (*high confidence*). Although overall agricultural productivity has increased, climate change has slowed this growth over the past 50 years globally (*medium confidence*), with related negative impacts mainly in mid- and low latitude regions but positive impacts in some high latitude regions (*high confidence*). Ocean warming and ocean acidification have adversely affected food production from

[11] Territorial emissions.
[12] Acute food insecurity can occur at any time with a severity that threatens lives, livelihoods or both, regardless of the causes, context or duration, as a result of shocks risking determinants of food security and nutrition, and is used to assess the need for humanitarian action {2.1}.

fisheries and shellfish aquaculture in some oceanic regions (*high confidence*). Roughly half of the world's population currently experience severe water scarcity for at least part of the year due to a combination of climatic and non-climatic drivers (*medium confidence*). {2.1.2, Figure 2.3} (Figure SPM.1)

A.2.5 In all regions increases in extreme heat events have resulted in human mortality and morbidity (*very high confidence*). The occurrence of climate-related food-borne and water-borne diseases (*very high confidence*) and the incidence of vector-borne diseases (*high confidence*) have increased. In assessed regions, some mental health challenges are associated with increasing temperatures (*high confidence*), trauma from extreme events (*very high confidence*), and loss of livelihoods and culture (*high confidence*). Climate and weather extremes are increasingly driving displacement in Africa, Asia, North America (*high confidence*), and Central and South America (*medium confidence*), with small island states in the Caribbean and South Pacific being disproportionately affected relative to their small population size (*high confidence*). {2.1.2, Figure 2.3} (Figure SPM.1)

A.2.6 Climate change has caused widespread adverse impacts and related losses and damages[13] to nature and people that are unequally distributed across systems, regions and sectors. Economic damages from climate change have been detected in climate-exposed sectors, such as agriculture, forestry, fishery, energy, and tourism. Individual livelihoods have been affected through, for example, destruction of homes and infrastructure, and loss of property and income, human health and food security, with adverse effects on gender and social equity. (*high confidence*) {2.1.2} (Figure SPM.1)

A.2.7 In urban areas, observed climate change has caused adverse impacts on human health, livelihoods and key infrastructure. Hot extremes have intensified in cities. Urban infrastructure, including transportation, water, sanitation and energy systems have been compromised by extreme and slow-onset events[14], with resulting economic losses, disruptions of services and negative impacts to well-being. Observed adverse impacts are concentrated amongst economically and socially marginalised urban residents. (*high confidence*) {2.1.2}

[START FIGURE SPM.1 HERE]

[13] In this report, the term 'losses and damages' refer to adverse observed impacts and/or projected risks and can be economic and/or non-economic. (See Annex I: Glossary)

[14] Slow-onset events are described among the climatic-impact drivers of the WGI AR6 and refer to the risks and impacts associated with e.g., increasing temperature means, desertification, decreasing precipitation, loss of biodiversity, land and forest degradation, glacial retreat and related impacts, ocean acidification, sea level rise and salinization. {2.1.2}

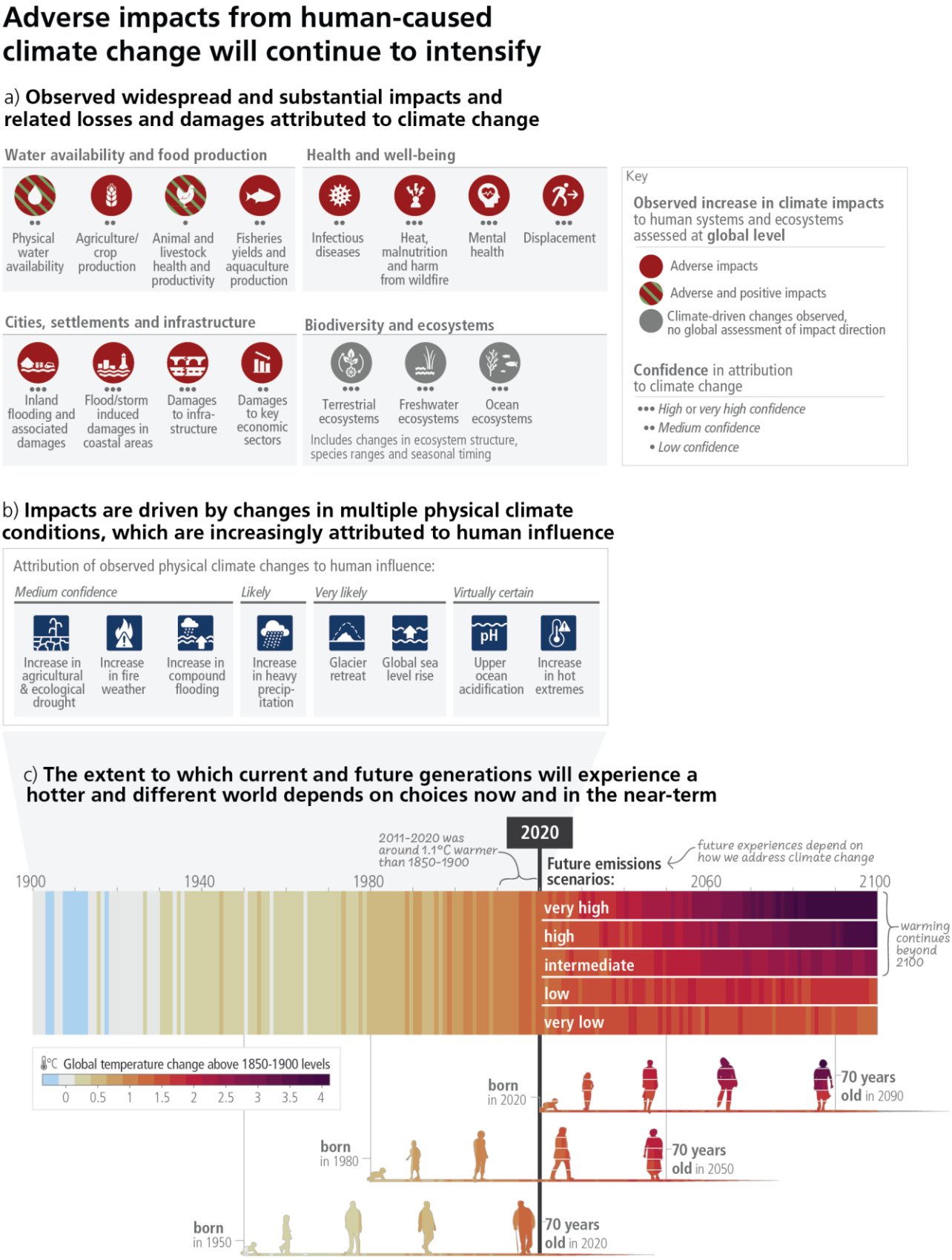


Figure SPM.1: (a) Climate change has already caused widespread impacts and related losses and damages on human systems and altered terrestrial, freshwater and ocean ecosystems worldwide. Physical water availability includes balance of water available from various sources including ground water, water quality and demand for water. Global mental health and displacement assessments reflect only assessed regions. Confidence levels reflect the assessment of attribution of the observed impact to climate change. **(b)** Observed impacts are connected to physical climate changes including many that have been attributed to human influence such as the selected climatic impact-drivers shown. Confidence and likelihood levels reflect the assessment of attribution

of the observed climatic impact-driver to human influence. **(c)** Observed (1900–2020) and projected (2021–2100) changes in global surface temperature (relative to 1850–1900), which are linked to changes in climate conditions and impacts, illustrate how the climate has already changed and will change along the lifespan of three representative generations (born in 1950, 1980 and 2020). Future projections (2021–2100) of changes in global surface temperature are shown for very low (SSP1-1.9), low (SSP1-2.6), intermediate (SSP2-4.5), high (SSP3-7.0) and very high (SSP5-8.5) GHG emissions scenarios. Changes in annual global surface temperatures are presented as 'climate stripes', with future projections showing the human-caused long-term trends and continuing modulation by natural variability (represented here using observed levels of past natural variability). Colours on the generational icons correspond to the global surface temperature stripes for each year, with segments on future icons differentiating possible future experiences. {2.1, 2.1.2, Figure 2.1, Table 2.1, Figure 2.3, Cross-Section Box.2, 3.1, Figure 3.3, 4.1, 4.3} (Box SPM.1)

[END FIGURE SPM.1 HERE]

Current Progress in Adaptation and Gaps and Challenges

A.3 Adaptation planning and implementation has progressed across all sectors and regions, with documented benefits and varying effectiveness. Despite progress, adaptation gaps exist, and will continue to grow at current rates of implementation. Hard and soft limits to adaptation have been reached in some ecosystems and regions. Maladaptation is happening in some sectors and regions. Current global financial flows for adaptation are insufficient for, and constrain implementation of, adaptation options, especially in developing countries (*high confidence*). {2.2, 2.3}

A.3.1 Progress in adaptation planning and implementation has been observed across all sectors and regions, generating multiple benefits (*very high confidence*). Growing public and political awareness of climate impacts and risks has resulted in at least 170 countries and many cities including adaptation in their climate policies and planning processes (*high confidence*). {2.2.3}

A.3.2 Effectiveness[15] of adaptation in reducing climate risks[16] is documented for specific contexts, sectors and regions (*high confidence*). Examples of effective adaptation options include: cultivar improvements, on-farm water management and storage, soil moisture conservation, irrigation, agroforestry, community-based adaptation, farm and landscape level diversification in agriculture, sustainable land management approaches, use of agroecological principles and practices and other approaches that work with natural processes (*high confidence*). Ecosystem-based adaptation[17] approaches such as urban greening, restoration of wetlands and upstream forest ecosystems have been effective in reducing flood risks and urban heat (*high confidence*). Combinations of non-structural measures like early warning systems and structural measures like levees have reduced loss of lives in case of inland flooding (*medium confidence*). Adaptation options such as disaster risk management, early warning systems, climate services and social safety nets have broad applicability across multiple sectors (*high confidence*). {2.2.3}

A.3.3 Most observed adaptation responses are fragmented, incremental[18], sector-specific and unequally distributed across regions. Despite progress, adaptation gaps exist across sectors and regions, and will continue to grow under current levels of implementation, with the largest adaptation gaps among lower income groups. (*high confidence*) {2.3.2}

A.3.4 There is increased evidence of maladaptation in various sectors and regions (*high confidence*). Maladaptation especially affects marginalised and vulnerable groups adversely (*high confidence*). {2.3.2}

A.3.5 Soft limits to adaptation are currently being experienced by small-scale farmers and households along some low-lying coastal areas (*medium confidence*) resulting from financial, governance, institutional and policy constraints (*high confidence*). Some tropical, coastal, polar and mountain ecosystems have reached hard

[15] Effectiveness refers here to the extent to which an adaptation option is anticipated or observed to reduce climate-related risk. {2.2.3}
[16] See Annex I: Glossary {2.2.3}
[17] Ecosystem based Adaptation (EbA) is recognized internationally under the Convention on Biological Diversity (CBD14/5). A related concept is Nature-based Solutions (NbS), see Annex I: Glossary.
[18] Incremental adaptations to change in climate are understood as extensions of actions and behaviours that already reduce the losses or enhance the benefits of natural variations in extreme weather/climate events. {2.3.2}

adaptation limits (*high confidence*). Adaptation does not prevent all losses and damages, even with effective adaptation and before reaching soft and hard limits (*high confidence*). {2.3.2}

A.3.6 Key barriers to adaptation are limited resources, lack of private sector and citizen engagement, insufficient mobilization of finance (including for research), low climate literacy, lack of political commitment, limited research and/or slow and low uptake of adaptation science, and low sense of urgency. There are widening disparities between the estimated costs of adaptation and the finance allocated to adaptation (*high confidence*). Adaptation finance has come predominantly from public sources, and a small proportion of global tracked climate finance was targeted to adaptation and an overwhelming majority to mitigation (*very high confidence*). Although global tracked climate finance has shown an upward trend since AR5, current global financial flows for adaptation, including from public and private finance sources, are insufficient and constrain implementation of adaptation options, especially in developing countries (*high confidence*). Adverse climate impacts can reduce the availability of financial resources by incurring losses and damages and through impeding national economic growth, thereby further increasing financial constraints for adaptation, particularly for developing and least developed countries (*medium confidence*). {2.3.2; 2.3.3}

[START BOX SPM.1 HERE]

Box SPM.1 The use of scenarios and modelled pathways in the AR6 Synthesis Report

Modelled scenarios and pathways[19] are used to explore future emissions, climate change, related impacts and risks, and possible mitigation and adaptation strategies and are based on a range of assumptions, including socio-economic variables and mitigation options. These are quantitative projections and are neither predictions nor forecasts. Global modelled emission pathways, including those based on cost effective approaches contain regionally differentiated assumptions and outcomes, and have to be assessed with the careful recognition of these assumptions. Most do not make explicit assumptions about global equity, environmental justice or intra-regional income distribution. IPCC is neutral with regard to the assumptions underlying the scenarios in the literature assessed in this report, which do not cover all possible futures.[20] {Cross-Section Box.2}

WGI assessed the climate response to five illustrative scenarios based on Shared Socio-economic Pathways (SSPs)[21] that cover the range of possible future development of anthropogenic drivers of climate change found in the literature. High and very high GHG emissions scenarios (SSP3-7.0 and SSP5-8.5[22]) have CO_2 emissions that roughly double from current levels by 2100 and 2050, respectively. The intermediate GHG emissions scenario (SSP2-4.5) has CO_2 emissions remaining around current levels until the middle of the century. The very low and low GHG emissions scenarios (SSP1-1.9 and SSP1-2.6) have CO_2 emissions declining to net zero around 2050 and 2070, respectively, followed by varying levels of net negative CO_2 emissions. In addition, Representative Concentration Pathways (RCPs)[23] were used by WGI and WGII to assess regional climate changes, impacts and risks. In WGIII, a large number of global modelled emissions pathways were assessed, of which 1202 pathways were categorised based on their assessed global warming over the 21st century; categories range from pathways that limit warming to 1.5°C with more than 50% likelihood (noted >50% in this report) with no or limited overshoot (C1) to pathways that exceed 4°C (C8). (Box SPM.1, Table 1). {Cross-Section Box.2}

[19] In the literature, the terms pathways and scenarios are used interchangeably, with the former more frequently used in relation to climate goals. WGI primarily used the term scenarios and WGIII mostly used the term modelled emission and mitigation pathways. The SYR primarily uses scenarios when referring to WGI and modelled emission and mitigation pathways when referring to WGIII.

[20] Around half of all modelled global emission pathways assume cost-effective approaches that rely on least-cost mitigation/abatement options globally. The other half looks at existing policies and regionally and sectorally differentiated actions.

[21] SSP-based scenarios are referred to as SSPx-y, where 'SSPx' refers to the Shared Socioeconomic Pathway describing the socioeconomic trends underlying the scenarios, and 'y' refers to the level of radiative forcing (in watts per square metre, or Wm^{-2}) resulting from the scenario in the year 2100. {Cross-Section Box.2}

[22] Very high emissions scenarios have become less likely but cannot be ruled out. Warming levels >4°C may result from very high emissions scenarios, but can also occur from lower emission scenarios if climate sensitivity or carbon cycle feedbacks are higher than the best estimate. {3.1.1}

[23] RCP-based scenarios are referred to as RCPy, where 'y' refers to the level of radiative forcing (in watts per square metre, or Wm^{-2}) resulting from the scenario in the year 2100. The SSP scenarios cover a broader range of greenhouse gas and air pollutant futures than the RCPs. They are similar but not identical, with differences in concentration trajectories. The overall effective radiative forcing tends to be higher for the SSPs compared to the RCPs with the same label (*medium confidence*). {Cross-Section Box.2}

Global warming levels (GWLs) relative to 1850–1900 are used to integrate the assessment of climate change and related impacts and risks since patterns of changes for many variables at a given GWL are common to all scenarios considered and independent of timing when that level is reached. {Cross-Section Box.2}

[START BOX SPM.1, TABLE 1 HERE]

Box SPM.1, Table 1: Description and relationship of scenarios and modelled pathways considered across AR6 Working Group reports. {Cross-Section Box.2, Figure 1}

Category in WGIII	Category description	GHG emissions scenarios (SSPx-y*) in WGI & WGII	RCPy** in WGI & WGII
C1	limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot***	Very low (SSP1-1.9)	
C2	return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot***		
C3	limit warming to 2°C (>67%)	Low (SSP1-2.6)	RCP2.6
C4	limit warming to 2°C (>50%)		
C5	limit warming to 2.5°C (>50%)		
C6	limit warming to 3°C (>50%)	Intermediate (SSP2-4.5)	RCP 4.5
C7	limit warming to 4°C (>50%)	High (SSP3-7.0)	
C8	exceed warming of 4°C (>50%)	Very high (SSP5-8.5)	RCP 8.5

* See footnote 27 for the SSPx-y terminology.
** See footnote 28 for the RCPy terminology.
*** Limited overshoot refers to exceeding 1.5°C global warming by up to about 0.1°C, high overshoot by 0.1°C-0.3°C, in both cases for up to several decades.

[END BOX SPM.1, TABLE 1 HERE]

[END BOX SPM.1 HERE]

Current Mitigation Progress, Gaps and Challenges

A.4 Policies and laws addressing mitigation have consistently expanded since AR5. Global GHG emissions in 2030 implied by nationally determined contributions (NDCs) announced by October 2021 make it *likely* that warming will exceed 1.5°C during the 21st century and make it harder to limit warming below 2°C. There are gaps between projected emissions from implemented policies and those from NDCs and finance flows fall short of the levels needed to meet climate goals across all sectors and regions. (*high confidence*) {2.2, 2.3, Figure 2.5, Table 2.2}

A.4.1 The UNFCCC, Kyoto Protocol, and the Paris Agreement are supporting rising levels of national ambition. The Paris Agreement, adopted under the UNFCCC, with near universal participation, has led to policy development and target-setting at national and sub-national levels, in particular in relation to mitigation, as well as enhanced transparency of climate action and support (*medium confidence*). Many regulatory and economic instruments have already been deployed successfully (*high confidence*). In many countries, policies have enhanced energy efficiency, reduced rates of deforestation and accelerated technology deployment, leading to avoided and in some cases reduced or removed emissions (*high confidence*). Multiple lines of evidence suggest that mitigation policies have led to several[24] Gt CO_2-eq yr^{-1} of avoided global emissions *(medium confidence)*. At least 18 countries have sustained absolute production-based GHG and consumption-based CO_2 reductions[25] for longer than 10 years. These reductions have only partly offset global emissions growth (*high confidence*). {2.2.1, 2.2.2}

[24] At least 1.8 $GtCO_2$-eq yr^{-1} can be accounted for by aggregating separate estimates for the effects of economic and regulatory instruments. Growing numbers of laws and executive orders have impacted global emissions and were estimated to result in 5.9 $GtCO_2$-eq yr^{-1} less emissions in 2016 than they otherwise would have been. (*medium confidence*) {2.2.2}

[25] Reductions were linked to energy supply decarbonisation, energy efficiency gains, and energy demand reduction, which resulted from both policies and changes in economic structure (*high confidence*). {2.2.2}

A.4.2 Several mitigation options, notably solar energy, wind energy, electrification of urban systems, urban green infrastructure, energy efficiency, demand-side management, improved forest- and crop/grassland management, and reduced food waste and loss, are technically viable, are becoming increasingly cost effective and are generally supported by the public. From 2010– 2019 there have been sustained decreases in the unit costs of solar energy (85%), wind energy (55%), and lithium ion batteries (85%), and large increases in their deployment, e.g., >10x for solar and >100x for electric vehicles (EVs), varying widely across regions. The mix of policy instruments that reduced costs and stimulated adoption includes public R&D, funding for demonstration and pilot projects, and demand pull instruments such as deployment subsidies to attain scale. Maintaining emission-intensive systems may, in some regions and sectors, be more expensive than transitioning to low emission systems. (*high confidence*) {2.2.2, Figure 2.4}

A.4.3 A substantial 'emissions gap' exists between global GHG emissions in 2030 associated with the implementation of NDCs announced prior to COP26[26] and those associated with modelled mitigation pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot or limit warming to 2°C (>67%) assuming immediate action (*high confidence*). This would make it *likely* that warming will exceed 1.5°C during the 21st century (*high confidence*). Global modelled mitigation pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot or limit warming to 2°C (>67%) assuming immediate action imply deep global GHG emissions reductions this decade (*high confidence*) (see SPM Box 1, Table 1, B.6)[27]. Modelled pathways that are consistent with NDCs announced prior to COP26 until 2030 and assume no increase in ambition thereafter have higher emissions, leading to a median global warming of 2.8 [2.1–3.4]°C by 2100 (*medium confidence*). Many countries have signalled an intention to achieve net-zero GHG or net-zero CO_2 by around mid-century but pledges differ across countries in terms of scope and specificity, and limited policies are to date in place to deliver on them. {2.3.1, Table 2.2, Figure 2.5; Table 3.1; 4.1}

A.4.4 Policy coverage is uneven across sectors (*high confidence*). Policies implemented by the end of 2020 are projected to result in higher global GHG emissions in 2030 than emissions implied by NDCs, indicating an 'implementation gap' (*high confidence*). Without a strengthening of policies, global warming of 3.2 [2.2–3.5]°C is projected by 2100 (*medium confidence*). {2.2.2, 2.3.1, 3.1.1, Figure 2.5} (Box SPM.1, Figure SPM.5)

A.4.5 The adoption of low-emission technologies lags in most developing countries, particularly least developed ones, due in part to limited finance, technology development and transfer, and capacity (*medium confidenc*e). The magnitude of climate finance flows has increased over the last decade and financing channels have broadened but growth has slowed since 2018 *(high confidence).* Financial flows have developed heterogeneously across regions and sectors (*high confidence*). Public and private finance flows for fossil fuels are still greater than those for climate adaptation and mitigation (*high confidence*). The overwhelming majority of tracked climate finance is directed towards mitigation, but nevertheless falls short of the levels needed to limit warming to below 2°C or to 1.5°C across all sectors and regions (see C7.2) (*very high confidence*). In 2018, public and publicly mobilised private climate finance flows from developed to developing countries were below the collective goal under the UNFCCC and Paris Agreement to mobilise USD100 billion per year by 2020 in the context of meaningful mitigation action and transparency on implementation (*medium confidence*). {2.2.2, 2.3.1, 2.3.3}

[26] Due to the literature cutoff date of WGIII, the additional NDCs submitted after 11 October 2021 are not assessed here. {Footnote 32 in Longer Report}

[27] Projected 2030 GHG emissions are 50 (47–55) $GtCO_2$-eq if all conditional NDC elements are taken into account. Without conditional elements, the global emissions are projected to be approximately similar to modelled 2019 levels at 53 (50–57) $GtCO_2$-eq. {2.3.1, Table 2.2}

B. Future Climate Change, Risks, and Long-Term Responses

Future Climate Change

B.1 Continued greenhouse gas emissions will lead to increasing global warming, with the best estimate of reaching 1.5°C in the near term in considered scenarios and modelled pathways. Every increment of global warming will intensify multiple and concurrent hazards (*high confidence*). Deep, rapid, and sustained reductions in greenhouse gas emissions would lead to a discernible slowdown in global warming within around two decades, and also to discernible changes in atmospheric composition within a few years (*high confidence*). {Cross-Section Boxes 1 and 2, 3.1, 3.3, Table 3.1, Figure 3.1, 4.3} (Figure SPM.2, Box SPM.1)

B.1.1 Global warming[28] will continue to increase in the near term (2021-2040) mainly due to increased cumulative CO_2 emissions in nearly all considered scenarios and modelled pathways. In the near term, global warming is *more likely than not* to reach 1.5°C even under the very low GHG emission scenario (SSP1-1.9) and *likely* or *very likely* to exceed 1.5°C under higher emissions scenarios. In the considered scenarios and modelled pathways, the best estimates of the time when the level of global warming of 1.5°C is reached lie in the near term[29]. Global warming declines back to below 1.5°C by the end of the 21st century in some scenarios and modelled pathways (see B.7). The assessed climate response to GHG emissions scenarios results in a best estimate of warming for 2081–2100 that spans a range from 1.4°C for a very low GHG emissions scenario (SSP1-1.9) to 2.7°C for an intermediate GHG emissions scenario (SSP2-4.5) and 4.4°C for a very high GHG emissions scenario (SSP5-8.5)[30], with narrower uncertainty ranges[31] than for corresponding scenarios in AR5. {Cross-Section Boxes 1 and 2, 3.1.1, 3.3.4, Table 3.1, 4.3} (Box SPM.1)

B.1.2 Discernible differences in trends of global surface temperature between contrasting GHG emissions scenarios (SSP1-1.9 and SSP1-2.6 vs. SSP3-7.0 and SSP5-8.5) would begin to emerge from natural variability[32] within around 20 years. Under these contrasting scenarios, discernible effects would emerge within years for GHG concentrations, and sooner for air quality improvements, due to the combined targeted air pollution controls and strong and sustained methane emissions reductions. Targeted reductions of air pollutant emissions lead to more rapid improvements in air quality within years compared to reductions in GHG emissions only, but in the long term, further improvements are projected in scenarios that combine efforts to reduce air pollutants as well as GHG emissions[33]. (*high confidence*) {3.1.1} (Box SPM.1)

B.1.3 Continued emissions will further affect all major climate system components. With every additional increment of global warming, changes in extremes continue to become larger. Continued global warming is projected to further intensify the global water cycle, including its variability, global monsoon precipitation, and very wet and very dry weather and climate events and seasons (*high confidence*). In scenarios with increasing CO_2 emissions, natural land and ocean carbon sinks are projected to take up a decreasing proportion of these emissions (*high confidence*). Other projected changes include further reduced extents and/or volumes of almost

[28] Global warming (see Annex I: Glossary) is here reported as running 20-year averages, unless stated otherwise, relative to 1850–1900. Global surface temperature in any single year can vary above or below the long-term human-caused trend, due to natural variability. The internal variability of global surface temperature in a single year is estimated to be about ±0.25°C (5–95% range, *high confidence*). The occurrence of individual years with global surface temperature change above a certain level does not imply that this global warming level has been reached. {4.3, Cross-Section Box.2}

[29] Median five-year interval at which a 1.5°C global warming level is reached (50% probability) in categories of modelled pathways considered in WGIII is 2030-2035. By 2030, global surface temperature in any individual year could exceed 1.5°C relative to 1850-1900 with a probability between 40% and 60%, across the five scenarios assessed in WGI (*medium confidence*). In all scenarios considered in WGI except the very high emissions scenario (SSP5-8.5), the midpoint of the first 20-year running average period during which the assessed average global surface temperature change reaches 1.5°C lies in the first half of the 2030s. In the very high GHG emissions scenario, the midpoint is in the late 2020s. {3.1.1, 3.3.1, 4.3} (Box SPM.1)

[30] The best estimates [and *very likely* ranges] for the different scenarios are: 1.4°C [1.0°C–1.8°C] (SSP1-1.9); 1.8°C [1.3°C–2.4°C] (SSP1-2.6); 2.7°C [2.1°C–3.5°C] (SSP2-4.5)); 3.6°C [2.8°C–4.6°C] (SSP3-7.0); and 4.4°C [3.3°C–5.7°C] (SSP5-8.5). {3.1.1} (Box SPM.1)

[31] Assessed future changes in global surface temperature have been constructed, for the first time, by combining multi-model projections with observational constraints and the assessed equilibrium climate sensitivity and transient climate response. The uncertainty range is narrower than in the AR5 thanks to improved knowledge of climate processes, paleoclimate evidence and model-based emergent constraints. {3.1.1}

[32] See Annex I: Glossary. Natural variability includes natural drivers and internal variability. The main internal variability phenomena include El Niño-Southern Oscillation, Pacific Decadal Variability and Atlantic Multi-decadal Variability. {4.3}

[33] Based on additional scenarios.

all cryospheric elements[34] (*high confidence*), further global mean sea level rise (*virtually certain*), and increased ocean acidification (*virtually certain*) and deoxygenation (*high confidence*). {3.1.1, 3.3.1, Figure 3.4} (Figure SPM.2)

B.1.4 With further warming, every region is projected to increasingly experience concurrent and multiple changes in climatic impact-drivers. Compound heatwaves and droughts are projected to become more frequent, including concurrent events across multiple locations (*high confidence*). Due to relative sea level rise, current 1-in-100 year extreme sea level events are projected to occur at least annually in more than half of all tide gauge locations by 2100 under all considered scenarios (*high confidence*). Other projected regional changes include intensification of tropical cyclones and/or extratropical storms (*medium confidence*), and increases in aridity and fire weather (*medium* to *high confidence*) {3.1.1, 3.1.3}

B.1.5 Natural variability will continue to modulate human-caused climate changes, either attenuating or amplifying projected changes, with little effect on centennial-scale global warming (*high confidence*). These modulations are important to consider in adaptation planning, especially at the regional scale and in the near term. If a large explosive volcanic eruption were to occur[35], it would temporarily and partially mask human-caused climate change by reducing global surface temperature and precipitation for one to three years (*medium confidence*). {4.3}

[START FIGURE SPM.2 HERE]

[34] Permafrost, seasonal snow cover, glaciers, the Greenland and Antarctic Ice Sheets, and Arctic Sea ice.

[35] Based on 2500-year reconstructions, eruptions with a radiative forcing more negative than -1 Wm-2, related to the radiative effect of volcanic stratospheric aerosols in the literature assessed in this report, occur on average twice per century. {4.3}

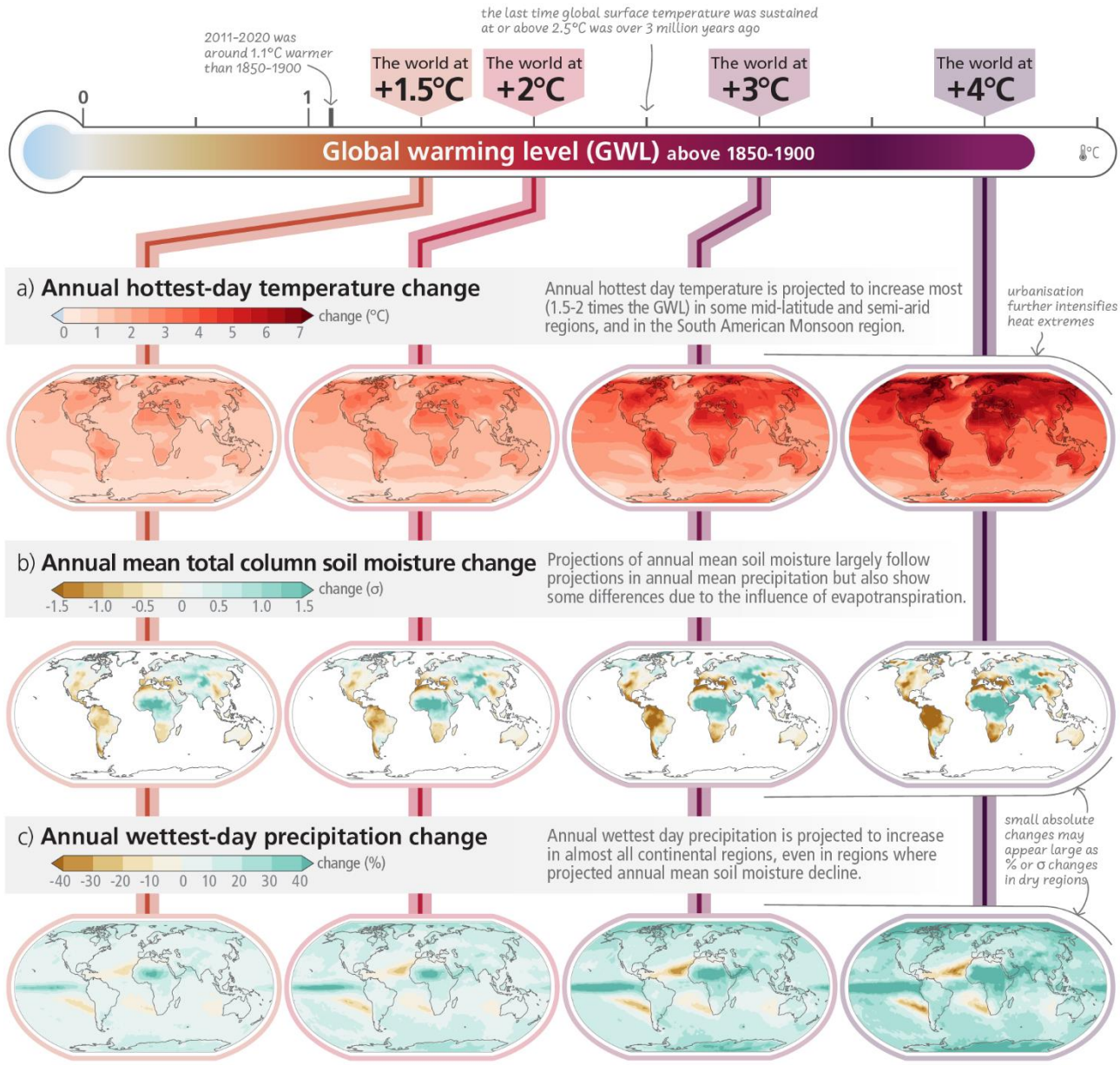


Figure SPM.2: Projected changes of annual maximum daily maximum temperature, annual mean total column soil moisture and annual maximum 1-day precipitation at global warming levels of 1.5°C, 2°C, 3°C, and 4°C relative to 1850–1900. Projected **(a)** annual maximum daily temperature change (°C), **(b)** annual mean total column soil moisture (standard deviation), **(c)** annual maximum 1-day precipitation change (%). The panels show CMIP6 multi-model median changes. In panels (b) and (c), large positive relative changes in dry regions may correspond to small absolute changes. In panel (b), the unit is the standard deviation of interannual variability in soil moisture during 1850–1900. Standard deviation is a widely used metric in characterising drought severity. A projected reduction in mean soil moisture by one standard deviation corresponds to soil moisture conditions typical of droughts that occurred about once every six years during 1850–1900. The WGI Interactive Atlas (https://interactive-atlas.ipcc.ch/) can be used to explore additional changes in the climate system across the range of global warming levels presented in this figure. {Figure 3.1, Cross-Section Box.2}

[END FIGURE SPM.2 HERE]

Climate Change Impacts and Climate-Related Risks

B.2 For any given future warming level, many climate-related risks are higher than assessed in AR5, and projected long-term impacts are up to multiple times higher than currently observed (*high confidence*). Risks and projected adverse impacts and related losses and damages from climate change escalate with every increment of global warming (*very high confidence*). Climatic and non-climatic risks will increasingly interact, creating compound and cascading risks that are more complex and difficult to manage (*high confidence*). {Cross-Section Box.2, 3.1, 4.3, Figure 3.3, Figure 4.3} (Figure SPM.3, Figure SPM.4)

B.2.1 In the near term, every region in the world is projected to face further increases in climate hazards (*medium to high confidence*, depending on region and hazard), increasing multiple risks to ecosystems and humans (*very high confidence*). Hazards and associated risks expected in the near-term include an increase in heat-related human mortality and morbidity (*high confidence*), food-borne, water-borne, and vector-borne diseases (*high confidence*), and mental health challenges[36] (*very high confidence*), flooding in coastal and other low-lying cities and regions (*high confidence*), biodiversity loss in land, freshwater and ocean ecosystems (*medium to very high confidence*, depending on ecosystem), and a decrease in food production in some regions (*high confidence*). Cryosphere-related changes in floods, landslides, and water availability have the potential to lead to severe consequences for people, infrastructure and the economy in most mountain regions (*high confidence*). The projected increase in frequency and intensity of heavy precipitation (*high confidence*) will increase rain-generated local flooding (*medium confidence*). {Figure 3.2, Figure 3.3, 4.3, Figure 4.3} (Figure SPM.3, Figure SPM.4)

B.2.2 Risks and projected adverse impacts and related losses and damages from climate change will escalate with every increment of global warming (*very high confidence*). They are higher for global warming of 1.5°C than at present, and even higher at 2°C (*high confidence*). Compared to the AR5, global aggregated risk levels[37] (Reasons for Concern[38]) are assessed to become high to very high at lower levels of global warming due to recent evidence of observed impacts, improved process understanding, and new knowledge on exposure and vulnerability of human and natural systems, including limits to adaptation (*high confidence*). Due to unavoidable sea level rise (see also B.3), risks for coastal ecosystems, people and infrastructure will continue to increase beyond 2100 (*high confidence*). {3.1.2, 3.1.3, Figure 3.4, Figure 4.3} (Figures SPM.3, Figure SPM.4)

B.2.3 With further warming, climate change risks will become increasingly complex and more difficult to manage. Multiple climatic and non-climatic risk drivers will interact, resulting in compounding overall risk and risks cascading across sectors and regions. Climate-driven food insecurity and supply instability, for example, are projected to increase with increasing global warming, interacting with non-climatic risk drivers such as competition for land between urban expansion and food production, pandemics and conflict. (*high confidence*) {3.1.2, 4.3, Figure 4.3}

B.2.4 For any given warming level, the level of risk will also depend on trends in vulnerability and exposure of humans and ecosystems. Future exposure to climatic hazards is increasing globally due to socio-economic development trends including migration, growing inequality and urbanisation. Human vulnerability will concentrate in informal settlements and rapidly growing smaller settlements. In rural areas vulnerability will be heightened by high reliance on climate-sensitive livelihoods. Vulnerability of ecosystems will be strongly influenced by past, present, and future patterns of unsustainable consumption and production, increasing

[36] In all assessed regions.

[37] Undetectable risk level indicates no associated impacts are detectable and attributable to climate change; moderate risk indicates associated impacts are both detectable and attributable to climate change with at least *medium confidence*, also accounting for the other specific criteria for key risks; high risk indicates severe and widespread impacts that are judged to be high on one or more criteria for assessing key risks; and very high risk level indicates very high risk of severe impacts and the presence of significant irreversibility or the persistence of climate-related hazards, combined with limited ability to adapt due to the nature of the hazard or impacts/risks. {3.1.2}

[38] The Reasons for Concern (RFC) framework communicates scientific understanding about accrual of risk for five broad categories. RFC1: Unique and threatened systems: ecological and human systems that have restricted geographic ranges constrained by climate-related conditions and have high endemism or other distinctive properties. RFC2: Extreme weather events: risks/impacts to human health, livelihoods, assets and ecosystems from extreme weather events. RFC3: Distribution of impacts: risks/impacts that disproportionately affect particular groups due to uneven distribution of physical climate change hazards, exposure or vulnerability. RFC4: Global aggregate impacts: impacts to socio-ecological systems that can be aggregated globally into a single metric. RFC5: Large-scale singular events: relatively large, abrupt and sometimes irreversible changes in systems caused by global warming. See also Annex I: Glossary. {3.1.2, Cross-Section Box.2}

demographic pressures, and persistent unsustainable use and management of land, ocean, and water. Loss of ecosystems and their services has cascading and long-term impacts on people globally, especially for Indigenous Peoples and local communities who are directly dependent on ecosystems, to meet basic needs. (*high confidence*) {Cross-Section Box.2, Figure 1c, 3.1.2, 4.3}

[START FIGURE SPM.3 HERE]

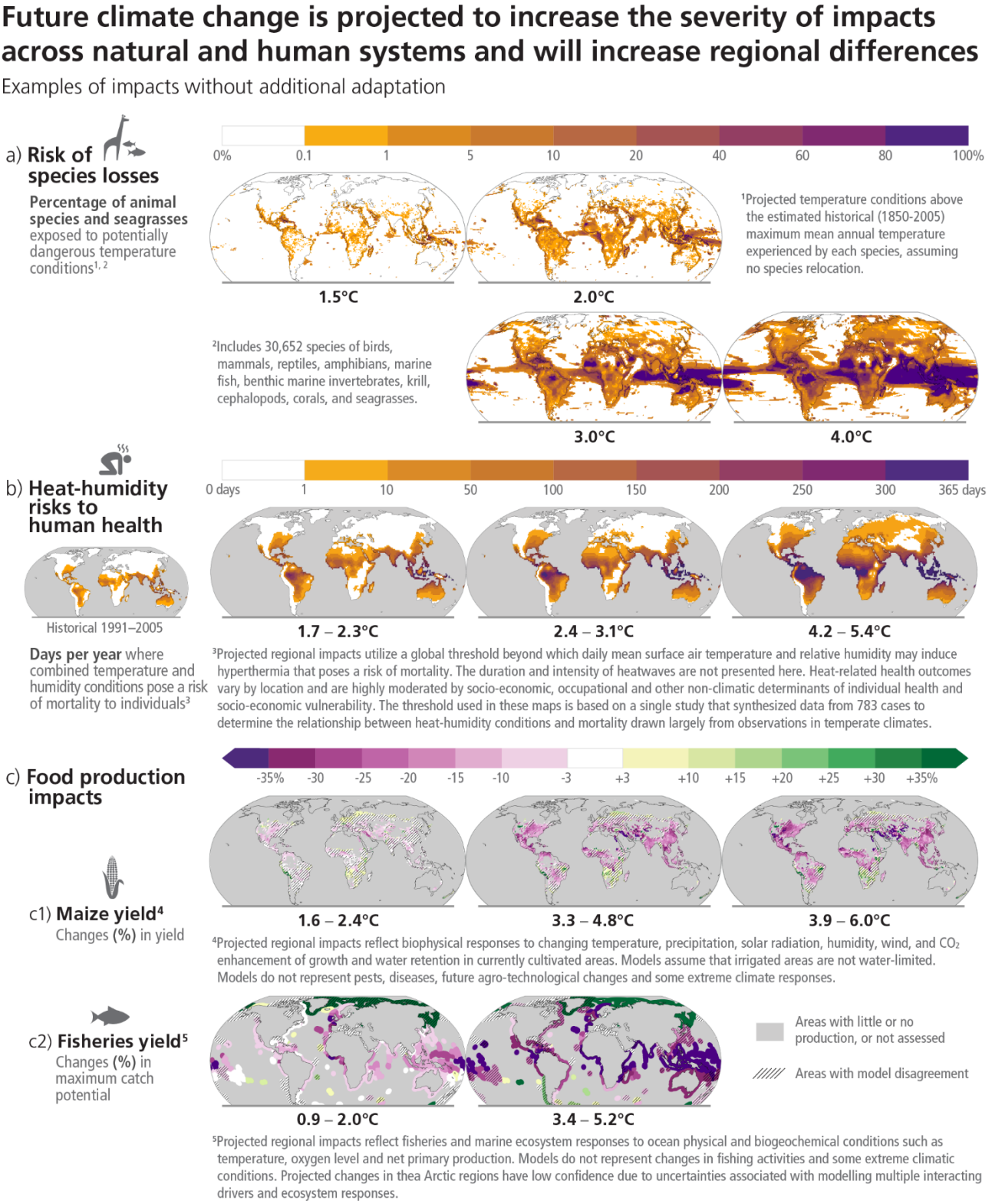


Figure SPM.3: Projected risks and impacts of climate change on natural and human systems at different global warming levels (GWLs) relative to 1850-1900 levels. Projected risks and impacts shown on the maps are based on outputs from different subsets of Earth system and impact models that were used to project each impact indicator without additional adaptation. WGII provides further assessment of the impacts on human and natural systems using these projections and

additional lines of evidence. **(a)** Risks of species losses as indicated by the percentage of assessed species exposed to potentially dangerous temperature conditions, as defined by conditions beyond the estimated historical (1850-2005) maximum mean annual temperature experienced by each species, at GWLs of 1.5ºC, 2ºC,3ºC and 4ºC. Underpinning projections of temperature are from 21 Earth system models and do not consider extreme events impacting ecosystems such as the Arctic. **(b)** Risks to human health as indicated by the days per year of population exposure to hyperthermic conditions that pose a risk of mortality from surface air temperature and humidity conditions for historical period (1991-2005) and at GWLs of 1.7°C–2.3°C (mean = 1.9°C; 13 climate models), 2.4°C–3.1°C (2.7°C; 16 climate models) and 4.2°C–5.4°C (4.7°C; 15 climate models). Interquartile ranges of GWLs by 2081–2100 under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. The presented index is consistent with common features found in many indices included within WGI and WGII assessments **(c)** Impacts on food production: (c1) Changes in maize yield by 2080–2099 relative to 1986–2005 at projected GWLs of 1.6°C–2.4ºC (2.0°C), 3.3°C–4.8ºC (4.1°C) and 3.9°C–6.0ºC (4.9°C). Median yield changes from an ensemble of 12 crop models, each driven by bias-adjusted outputs from 5 Earth system models, from the Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) and the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP). Maps depict 2080–2099 compared to 1986–2005 for current growing regions (>10 ha), with the corresponding range of future global warming levels shown under SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5, respectively. Hatching indicates areas where <70% of the climate-crop model combinations agree on the sign of impact. (c2) Change in maximum fisheries catch potential by 2081–2099 relative to 1986–2005 at projected GWLs of 0.9°C–2.0°C (1.5°C) and 3.4°C–5.2°C (4.3°C). GWLs by 2081–2100 under RCP2.6 and RCP8.5. Hatching indicates where the two climate-fisheries models disagree in the direction of change. Large relative changes in low yielding regions may correspond to small absolute changes. Biodiversity and fisheries in Antarctica were not analysed due to data limitations. Food security is also affected by crop and fishery failures not presented here.{3.1.2, Figure 3.2, Cross-Section Box.2} (Box SPM.1)

[END FIGURE SPM.3 HERE]

[START FIGURE SPM.4 HERE]

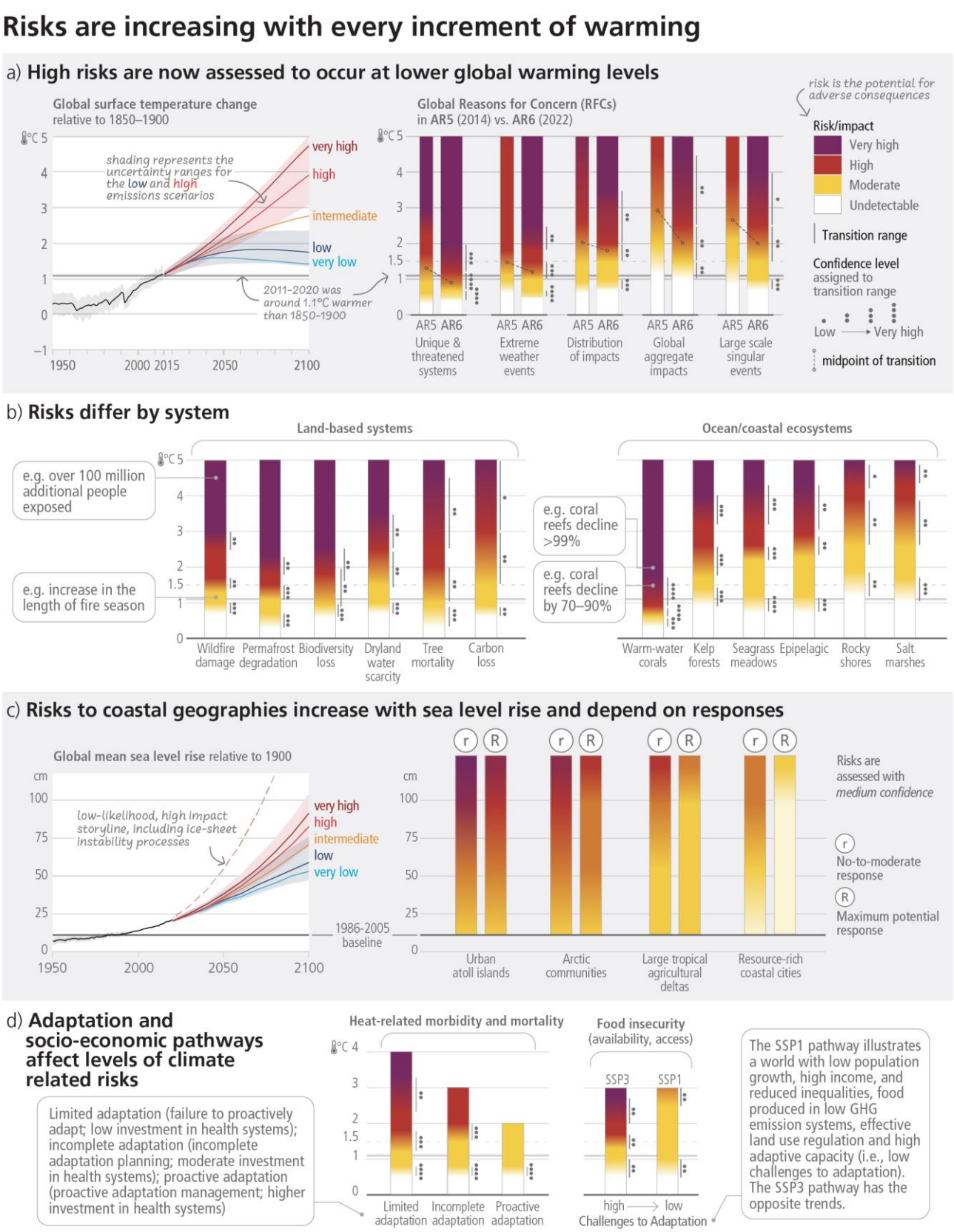


Figure SPM.4: Subset of assessed climate outcomes and associated global and regional climate risks. The burning embers result from a literature based expert elicitation. **Panel (a): Left** – Global surface temperature changes in °C relative to 1850–1900. These changes were obtained by combining CMIP6 model simulations with observational constraints based on past simulated warming, as well as an updated assessment of equilibrium climate sensitivity. *Very likely* ranges are shown for the low and high GHG emissions scenarios (SSP1-2.6 and SSP3-7.0) (Cross-Section Box 2); **Right** – Global Reasons for Concern (RFC), comparing AR6 (thick embers) and AR5 (thin embers) assessments. Risk transitions have generally shifted towards lower temperatures with updated scientific understanding. Diagrams are shown for each RFC, assuming low to no adaptation. Lines connect the midpoints of the transitions from moderate to high risk across AR5 and AR6. **Panel (b)**: Selected global risks for land and ocean ecosystems, illustrating general increase of risk with global warming levels with low to no adaptation. **Panel (c)**: **Left -** Global mean sea level change in centimetres, relative to 1900.

The historical changes (black) are observed by tide gauges before 1992 and altimeters afterwards. The future changes to 2100 (coloured lines and shading) are assessed consistently with observational constraints based on emulation of CMIP, ice-sheet, and glacier models, and *likely* ranges are shown for SSP1-2.6 and SSP3-7.0. **Right** - Assessment of the combined risk of coastal flooding, erosion and salinization for four illustrative coastal geographies in 2100, due to changing mean and extreme sea levels, under two response scenarios, with respect to the SROCC baseline period (1986-2005). The assessment does not account for changes in extreme sea level beyond those directly induced by mean sea level rise; risk levels could increase if other changes in extreme sea levels were considered (e.g., due to changes in cyclone intensity). "No-to-moderate response" describes efforts as of today (i.e. no further significant action or new types of actions). "Maximum potential response" represent a combination of responses implemented to their full extent and thus significant additional efforts compared to today, assuming minimal financial, social and political barriers. (In this context, 'today' refers to 2019.) The assessment criteria include exposure and vulnerability, coastal hazards, in-situ responses and planned relocation. Planned relocation refers to managed retreat or resettlements. The term response is used here instead of adaptation because some responses, such as retreat, may or may not be considered to be adaptation. **Panel (d):** Selected risks under different socio-economic pathways, illustrating how development strategies and challenges to adaptation influence risk. **Left** - Heat-sensitive human health outcomes under three scenarios of adaptation effectiveness. The diagrams are truncated at the nearest whole ºC within the range of temperature change in 2100 under three SSP scenarios. **Right** - Risks associated with food security due to climate change and patterns of socio-economic development. Risks to food security include availability and access to food, including population at risk of hunger, food price increases and increases in disability adjusted life years attributable to childhood underweight. Risks are assessed for two contrasted socio-economic pathways (SSP1 and SSP3) excluding the effects of targeted mitigation and adaptation policies. {Figure 3.3} (Box SPM.1)

[END FIGURE SPM.4 HERE]

Likelihood and Risks of Unavoidable, Irreversible or Abrupt Changes

B.3 Some future changes are unavoidable and/or irreversible but can be limited by deep, rapid and sustained global greenhouse gas emissions reduction. The likelihood of abrupt and/or irreversible changes increases with higher global warming levels. Similarly, the probability of low-likelihood outcomes associated with potentially very large adverse impacts increases with higher global warming levels. (*high confidence*) {3.1}

B.3.1 Limiting global surface temperature does not prevent continued changes in climate system components that have multi-decadal or longer timescales of response (*high confidence*). Sea level rise is unavoidable for centuries to millennia due to continuing deep ocean warming and ice sheet melt, and sea levels will remain elevated for thousands of years (*high confidence*). However, deep, rapid and sustained GHG emissions reductions would limit further sea level rise acceleration and projected long-term sea level rise commitment. Relative to 1995–2014, the *likely* global mean sea level rise under the SSP1-1.9 GHG emissions scenario is 0.15–0.23 m by 2050 and 0.28–0.55 m by 2100; while for the SSP5-8.5 GHG emissions scenario it is 0.20–0.29 m by 2050 and 0.63–1.01 m by 2100 (*medium confidence*). Over the next 2000 years, global mean sea level will rise by about 2–3 m if warming is limited to 1.5°C and 2–6 m if limited to 2°C (*low confidence*). {3.1.3, Figure 3.4} (Box SPM.1)

B.3.2 The likelihood and impacts of abrupt and/or irreversible changes in the climate system, including changes triggered when tipping points are reached, increase with further global warming (*high confidence*). As warming levels increase, so do the risks of species extinction or irreversible loss of biodiversity in ecosystems including forests (*medium confidence*), coral reefs (*very high confidence*) and in Arctic regions (*high confidence*). At sustained warming levels between 2°C and 3°C, the Greenland and West Antarctic ice sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia, causing several metres of sea level rise (*limited evidence*). The probability and rate of ice mass loss increase with higher global surface temperatures (*high confidence*). {3.1.2, 3.1.3}

B.3.3 The probability of low-likelihood outcomes associated with potentially very large impacts increases with higher global warming levels (*high confidence*). Due to deep uncertainty linked to ice-sheet processes, global mean sea level rise above the *likely* range – approaching 2 m by 2100 and in excess of 15 m by 2300 under the very high GHG emissions scenario (SSP5-8.5) (*low confidence*) – cannot be excluded. There is *medium confidence* that the Atlantic Meridional Overturning Circulation will not collapse abruptly before 2100, but if it

were to occur, it would *very likely* cause abrupt shifts in regional weather patterns, and large impacts on ecosystems and human activities. {3.1.3} (Box SPM.1)

Adaptation Options and their Limits in a Warmer World

B.4 Adaptation options that are feasible and effective today will become constrained and less effective with increasing global warming. With increasing global warming, losses and damages will increase and additional human and natural systems will reach adaptation limits. Maladaptation can be avoided by flexible, multi-sectoral, inclusive, long-term planning and implementation of adaptation actions, with co-benefits to many sectors and systems. (*high confidence*) {3.2, 4.1, 4.2, 4.3}

B.4.1 The effectiveness of adaptation, including ecosystem-based and most water-related options, will decrease with increasing warming. The feasibility and effectiveness of options increase with integrated, multi-sectoral solutions that differentiate responses based on climate risk, cut across systems and address social inequities. As adaptation options often have long implementation times, long-term planning increases their efficiency. (*high confidence*) {3.2, Figure 3.4, 4.1, 4.2}

B.4.2 With additional global warming, limits to adaptation and losses and damages, strongly concentrated among vulnerable populations, will become increasingly difficult to avoid (*high confidence*). Above 1.5°C of global warming, limited freshwater resources pose potential hard adaptation limits for small islands and for regions dependent on glacier and snow melt (*medium confidence*). Above that level, ecosystems such as some warm-water coral reefs, coastal wetlands, rainforests, and polar and mountain ecosystems will have reached or surpassed hard adaptation limits and as a consequence, some Ecosystem-based Adaptation measures will also lose their effectiveness (*high confidence*). {2.3.2, 3.2, 4.3}

B.4.3 Actions that focus on sectors and risks in isolation and on short-term gains often lead to maladaptation over the long-term, creating lock-ins of vulnerability, exposure and risks that are difficult to change. For example, seawalls effectively reduce impacts to people and assets in the short-term but can also result in lock-ins and increase exposure to climate risks in the long-term unless they are integrated into a long-term adaptive plan. Maladaptive responses can worsen existing inequities especially for Indigenous Peoples and marginalised groups and decrease ecosystem and biodiversity resilience. Maladaptation can be avoided by flexible, multi-sectoral, inclusive, long-term planning and implementation of adaptation actions, with co-benefits to many sectors and systems. (*high confidence*) {2.3.2, 3.2}

Carbon Budgets and Net Zero Emissions

B.5 Limiting human-caused global warming requires net zero CO_2 emissions. Cumulative carbon emissions until the time of reaching net-zero CO_2 emissions and the level of greenhouse gas emission reductions this decade largely determine whether warming can be limited to 1.5°C or 2°C (*high confidence*). Projected CO_2 emissions from existing fossil fuel infrastructure without additional abatement would exceed the remaining carbon budget for 1.5°C (50%) (*high confidence*). {2.3, 3.1, 3.3, Table 3.1}

B.5.1 From a physical science perspective, limiting human-caused global warming to a specific level requires limiting cumulative CO_2 emissions, reaching at least net zero CO_2 emissions, along with strong reductions in other greenhouse gas emissions. Reaching net zero GHG emissions primarily requires deep reductions in CO_2, methane, and other GHG emissions, and implies net-negative CO_2 emissions[39]. Carbon dioxide removal (CDR) will be necessary to achieve net-negative CO2 emissions (see B.6). Net zero GHG emissions, if sustained, are projected to result in a gradual decline in global surface temperatures after an earlier peak. (*high confidence*) {3.1.1, 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, Table 3.1, Cross-Section Box 1}

B.5.2 For every 1000 $GtCO_2$ emitted by human activity, global surface temperature rises by 0.45°C (best estimate, with a *likely* range from 0.27 to 0.63°C). The best estimates of the remaining carbon budgetsfrom the

[39] Net zero GHG emissions defined by the 100-year global warming potential. See footnote 9.

beginning of 2020 are 500 $GtCO_2$ for a 50% likelihood of limiting global warming to 1.5°C and 1150 $GtCO_2$ for a 67% likelihood of limiting warming to 2°C[40]. The stronger the reductions in non-CO_2 emissions the lower the resulting temperatures are for a given remaining carbon budget or the larger remaining carbon budget for the same level of temperature change[41]. {3.3.1}

B.5.3 If the annual CO_2 emissions between 2020–2030 stayed, on average, at the same level as 2019, the resulting cumulative emissions would almost exhaust the remaining carbon budget for 1.5°C (50%), and deplete more than a third of the remaining carbon budget for 2°C (67%). Estimates of future CO_2 emissions from existing fossil fuel infrastructures without additional abatement[42] already exceed the remaining carbon budget for limiting warming to 1.5°C (50%) (*high confidence*). Projected cumulative future CO_2 emissions over the lifetime of existing and planned fossil fuel infrastructure, if historical operating patterns are maintained and without additional abatement[43], are approximately equal to the remaining carbon budget for limiting warming to 2°C with a likelihood of 83%[44] (*high confidence*). {2.3.1, 3.3.1, Figure 3.5}

B.5.4 Based on central estimates only, historical cumulative net CO_2 emissions between 1850 and 2019 amount to about four-fifths[45] of the total carbon budget for a 50% probability of limiting global warming to 1.5°C (central estimate about 2900 $GtCO_2$), and to about two thirds[46] of the total carbon budget for a 67% probability to limit global warming to 2°C (central estimate about 3550 $GtCO_2$). {3.3.1, Figure 3.5}

Mitigation Pathways

B.6 All global modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, and those that limit warming to 2°C (>67%), involve rapid and deep and, in most cases, immediate greenhouse gas emissions reductions in all sectors this decade. Global net zero CO_2 emissions are reached for these pathway categories, in the early 2050s and around the early 2070s, respectively. (*high confidence*) {3.3, 3.4, 4.1, 4.5, Table 3.1} (Figure SPM.5, Box SPM.1)

B.6.1 Global modelled pathways provide information on limiting warming to different levels; these pathways, particularly their sectoral and regional aspects, depend on the assumptions described in Box SPM.1. Global modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot or limit warming to 2°C (>67%) are characterized by deep, rapid and, in most cases, immediate GHG emissions reductions. Pathways that limit warming to 1.5C (>50%) with no or limited overshoot reach net zero CO_2 in the early 2050s, followed by net negative CO_2 emissions. Those pathways that reach net zero GHG emissions do so around the 2070s. Pathways that limit warming to 2C (>67%) reach net zero CO2 emissions in the early 2070s. Global GHG emissions are projected to peak between 2020 and at the latest before 2025 in global modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot and in those that limit warming to 2°C (>67%) and assume immediate action. (*high confidence*) {3.3.2, 3.3.4, 4.1, Table 3.1, Figure 3.6} (Table XX)

[START TABLE XX]

[40] Global databases make different choices about which emissions and removals occurring on land are considered anthropogenic. Most countries report their anthropogenic land CO_2 fluxes including fluxes due to human-caused environmental change (e.g., CO_2 fertilisation) on 'managed' land in their national GHG inventories. Using emissions estimates based on these inventories, the remaining carbon budgets must be correspondingly reduced. {3.3.1}

[41] For example, remaining carbon budgets could be 300 or 600 $GtCO_2$ for 1.5°C (50%), respectively for high and low non-CO_2 emissions, compared to 500 $GtCO_2$ in the central case. {3.3.1}

[42] Abatement here refers to human interventions that reduce the amount of greenhouse gases that are released from fossil fuel infrastructure to the atmosphere.

[43] Ibid.

[44] WGI provides carbon budgets that are in line with limiting global warming to temperature limits with different likelihoods, such as 50%, 67% or 83%. {3.3.1}

[45] Uncertainties for total carbon budgets have not been assessed and could affect the specific calculated fractions.

[46] Ibid.

Table XX: Greenhouse gas and CO_2 emission reductions from 2019, median and 5-95 percentiles {3.3.1; 4.1; Table 3.1; Figure 2.5; Box SPM1}

		Reductions from 2019 emission levels (%)			
		2030	2035	2040	2050
Limit warming to1.5°C (>50%) with no or limited overshoot	GHG	43 [34-60]	60 [49-77]	69 [58-90]	84 [73-98]
	CO_2	48 [36-69]	65 [50-96]	80 [61-109]	99 [79-119]
Limit warming to 2°C (>67%)	GHG	21 [1-42]	35 [22-55]	46 [34-63]	64 [53-77]
	CO_2	22 [1-44]	37 [21-59]	51 [36-70]	73 [55-90]

[END TABLE XX]

B.6.2 Reaching net zero CO_2 or GHG emissions primarily requires deep and rapid reductions in gross emissions of CO_2, as well as substantial reductions of non-CO_2 GHG emissions (*high confidence*). For example, in modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, global methane emissions are reduced by 34 [21–57]% by 2030 relative to 2019. However, some hard-to-abate residual GHG emissions (e.g., some emissions from agriculture, aviation, shipping, and industrial processes) remain and would need to be counterbalanced by deployment of carbon dioxide removal (CDR) methods to achieve net zero CO_2 or GHG emissions (*high confidence*). As a result, net zero CO_2 is reached earlier than net zero GHGs (*high confidence*). {3.3.2, 3.3.3, Table 3.1, Figure 3.5} (Figure SPM.5)

B.6.3 Global modelled mitigation pathways reaching net zero CO_2 and GHG emissions include transitioning from fossil fuels without carbon capture and storage (CCS) to very low- or zero-carbon energy sources, such as renewables or fossil fuels with CCS, demand-side measures and improving efficiency, reducing non-CO_2 GHG emissions, and CDR[47]. In most global modelled pathways, land-use change and forestry (via reforestation and reduced deforestation) and the energy supply sector reach net zero CO_2 emissions earlier than the buildings, industry and transport sectors. (*high confidence*) {3.3.3, 4.1, 4.5, Figure 4.1} (Figure SPM.5, Box SPM.1)

B.6.4 Mitigation options often have synergies with other aspects of sustainable development, but some options can also have trade-offs. There are potential synergies between sustainable development and, for instance, energy efficiency and renewable energy. Similarly, depending on the context[48], biological CDR methods like reforestation, improved forest management, soil carbon sequestration, peatland restoration and coastal blue carbon management can enhance biodiversity and ecosystem functions, employment and local livelihoods. However, afforestation or production of biomass crops can have adverse socio-economic and environmental impacts, including on biodiversity, food and water security, local livelihoods and the rights of Indigenous Peoples, especially if implemented at large scales and where land tenure is insecure. Modelled pathways that assume using resources more efficiently or that shift global development towards sustainability include fewer challenges, such as less dependence on CDR and pressure on land and biodiversity. (*high confidence*) {3.4.1}

[START FIGURE SPM.5 HERE]

[47] CCS is an option to reduce emissions from large-scale fossil-based energy and industry sources provided geological storage is available. When CO_2 is captured directly from the atmosphere (DACCS), or from biomass (BECCS), CCS provides the storage component of these CDR methods. CO_2 capture and subsurface injection is a mature technology for gas processing and enhanced oil recovery. In contrast to the oil and gas sector, CCS is less mature in the power sector, as well as in cement and chemicals production, where it is a critical mitigation option. The technical geological storage capacity is estimated to be on the order of 1000 $GtCO_2$, which is more than the CO_2 storage requirements through 2100 to limit global warming to 1.5°C, although the regional availability of geological storage could be a limiting factor. If the geological storage site is appropriately selected and managed, it is estimated that the CO_2 can be permanently isolated from the atmosphere. Implementation of CCS currently faces technological, economic, institutional, ecological-environmental and socio-cultural barriers. Currently, global rates of CCS deployment are far below those in modelled pathways limiting global warming to 1.5°C to 2°C. Enabling conditions such as policy instruments, greater public support and technological innovation could reduce these barriers. (*high confidence*) {3.3.3}

[48] The impacts, risks, and co-benefits of CDR deployment for ecosystems, biodiversity and people will be highly variable depending on the method, site-specific context, implementation and scale (*high confidence*).

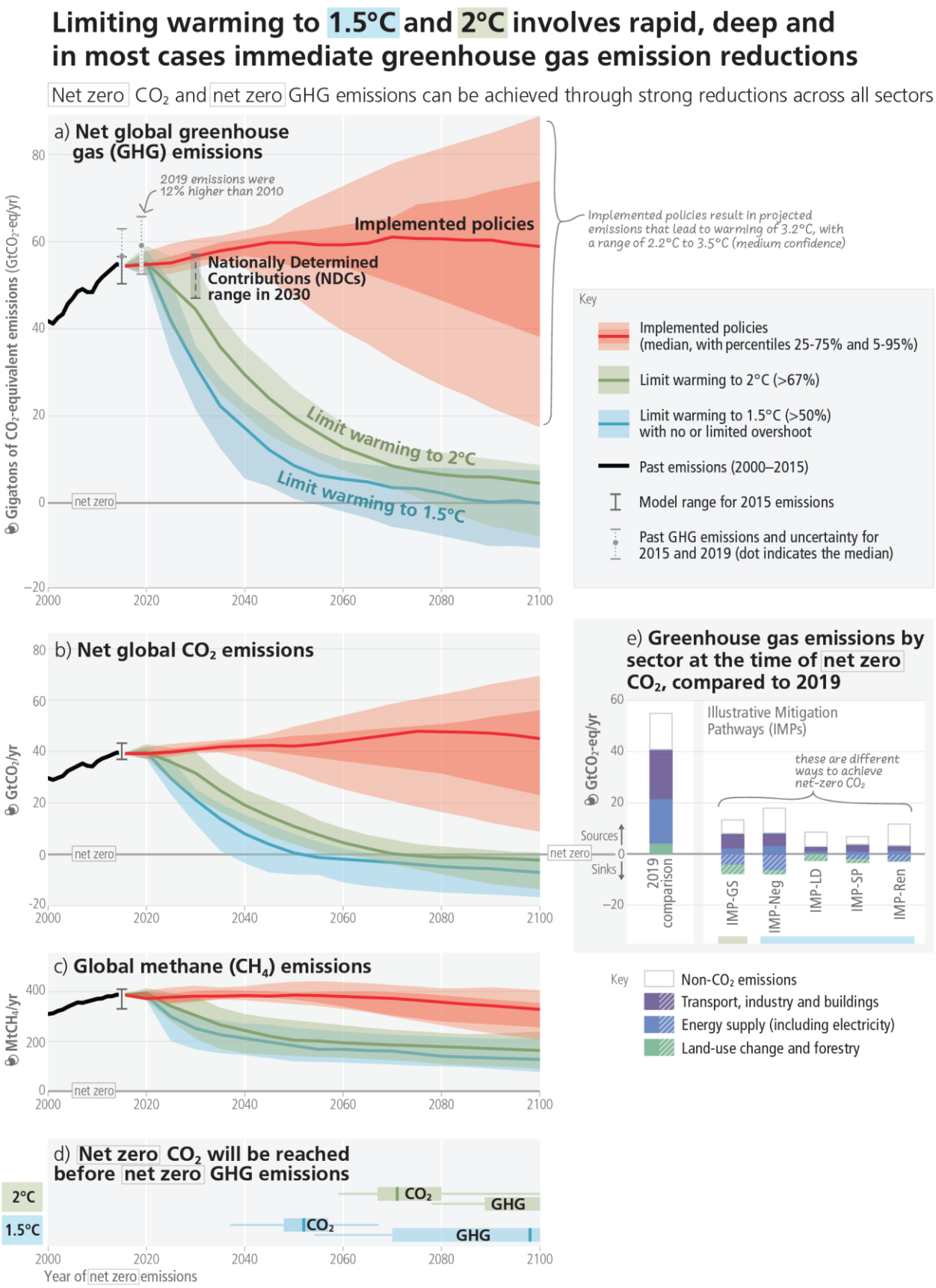


Figure SPM.5: Global emissions pathways consistent with implemented policies and mitigation strategies. Panel (a), (b) and **(c)** show the development of global GHG, CO_2 and methane emissions in modelled pathways, while **panel (d)** shows the associated timing of when GHG and CO_2 emissions reach net zero. Coloured ranges denote the 5th to 95th percentile across the global modelled pathways falling within a given category as described in Box SPM.1. The red ranges depict emissions pathways assuming policies that were implemented by the end of 2020. Ranges of modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot are shown in light blue (category C1) and pathways that

limit warming to 2°C (>67%) are shown in green (category C3). Global emission pathways that would limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot and also reach net zero GHG in the second half of the century do so between 2070-2075. **Panel (e)** shows the sectoral contributions of CO_2 and non-CO_2 emissions sources and sinks at the time when net zero CO_2 emissions are reached in illustrative mitigation pathways (IMPs) consistent with limiting warming to 1.5°C with a high reliance on net negative emissions (IMP-Neg) ("high overshoot"), high resource efficiency (IMP-LD), a focus on sustainable development (IMP-SP), renewables (IMP-Ren) and limiting warming to 2°C with less rapid mitigation initially followed by a gradual strengthening (IMP-GS). Positive and negative emissions for different IMPs are compared to GHG emissions from the year 2019. Energy supply (including electricity) includes bioenergy with carbon dioxide capture and storage and direct air carbon dioxide capture and storage. CO_2 emissions from land-use change and forestry can only be shown as a net number as many models do not report emissions and sinks of this category separately. {Figure 3.6, 4.1} (Box SPM.1)

[END FIGURE SPM.5 HERE]

Overshoot: Exceeding a Warming Level and Returning

B.7 If warming exceeds a specified level such as 1.5°C, it could gradually be reduced again by achieving and sustaining net negative global CO_2 emissions. This would require additional deployment of carbon dioxide removal, compared to pathways without overshoot, leading to greater feasibility and sustainability concerns. Overshoot entails adverse impacts, some irreversible, and additional risks for human and natural systems, all growing with the magnitude and duration of overshoot. (*high confidence*) {3.1, 3.3, 3.4, Table 3.1, Figure 3.6}

B.7.1 Only a small number of the most ambitious global modelled pathways limit global warming to 1.5°C (>50%) by 2100 without exceeding this level temporarily. Achieving and sustaining net negative global CO_2 emissions, with annual rates of CDR greater than residual CO_2 emissions, would gradually reduce the warming level again (*high confidence*). Adverse impacts that occur during this period of overshoot and cause additional warming via feedback mechanisms, such as increased wildfires, mass mortality of trees, drying of peatlands, and permafrost thawing, weakening natural land carbon sinks and increasing releases of GHGs would make the return more challenging (*medium confidence*). {3.3.2, 3.3.4, Table 3.1, Figure 3.6} (Box SPM.1)

B.7.2 The higher the magnitude and the longer the duration of overshoot, the more ecosystems and societies are exposed to greater and more widespread changes in climatic impact-drivers, increasing risks for many natural and human systems. Compared to pathways without overshoot, societies would face higher risks to infrastructure, low-lying coastal settlements, and associated livelihoods. Overshooting 1.5°C will result in irreversible adverse impacts on certain ecosystems with low resilience, such as polar, mountain, and coastal ecosystems, impacted by ice-sheet, glacier melt, or by accelerating and higher committed sea level rise. (*high confidence*) {3.1.2, 3.3.4}

B.7.3 The larger the overshoot, the more net negative CO_2 emissions would be needed to return to 1.5°C by 2100. Transitioning towards net zero CO_2 emissions faster and reducing non-CO_2 emissions such as methane more rapidly would limit peak warming levels and reduce the requirement for net negative CO_2 emissions, thereby reducing feasibility and sustainability concerns, and social and environmental risks associated with CDR deployment at large scales. (*high confidence*) {3.3.3, 3.3.4, 3.4.1, Table 3.1}

C. Responses in the Near Term

Urgency of Near-Term Integrated Climate Action

C.1 Climate change is a threat to human well-being and planetary health (*very high confidence*). There is a rapidly closing window of opportunity to secure a liveable and sustainable future for all (*very high confidence*). Climate resilient development integrates adaptation and mitigation to advance sustainable development for all, and is enabled by increased international cooperation including improved access to adequate financial resources, particularly for vulnerable regions, sectors and groups, and inclusive governance and coordinated policies (*high confidence*). The choices and actions implemented in this decade will have impacts now and for thousands of years (*high confidence*). {3.1, 3.3, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.7, 4.8, 4.9, Figure 3.1, Figure 3.3, Figure 4.2} (Figure SPM.1; Figure SPM.6)

C.1.1 Evidence of observed adverse impacts and related losses and damages, projected risks, levels and trends in vulnerability and adaptation limits, demonstrate that worldwide climate resilient development action is more urgent than previously assessed in AR5. Climate resilient development integrates adaptation and GHG mitigation to advance sustainable development for all. Climate resilient development pathways have been constrained by past development, emissions and climate change and are progressively constrained by every increment of warming, in particular beyond 1.5°C. (*very high confidence*) {3.4; 3.4.2; 4.1}

C.1.2 Government actions at sub-national, national and international levels**,** with civil society and the private sector, play a crucial role in enabling and accelerating shifts in development pathways towards sustainability and climate resilient development (*very high confidence*). Climate resilient development is enabled when governments, civil society and the private sector make inclusive development choices that prioritize risk reduction, equity and justice, and when decision-making processes, finance and actions are integrated across governance levels, sectors, and timeframes (*very high confidence*). Enabling conditions are differentiated by national, regional and local circumstances and geographies, according to capabilities, and include: political commitment and follow-through, coordinated policies, social and international cooperation, ecosystem stewardship, inclusive governance, knowledge diversity, technological innovation, monitoring and evaluation, and improved access to adequate financial resources, especially for vulnerable regions, sectors and communities (*high confidence*). {3.4; 4.2, 4.4, 4.5, 4.7, 4.8} (Figure SPM.6)

C.1.3 Continued emissions will further affect all major climate system components, and many changes will be irreversible on centennial to millennial time scales and become larger with increasing global warming. Without urgent, effective, and equitable mitigation and adaptation actions, climate change increasingly threatens ecosystems, biodiversity, and the livelihoods, health and wellbeing of current and future generations. (*high confidence*) {3.1.3; 3.3.3; 3.4.1, Figure 3.4; 4.1, 4.2, 4.3, 4.4} (Figure SPM.1, Figure SPM.6).

[START FIGURE SPM.6 HERE]

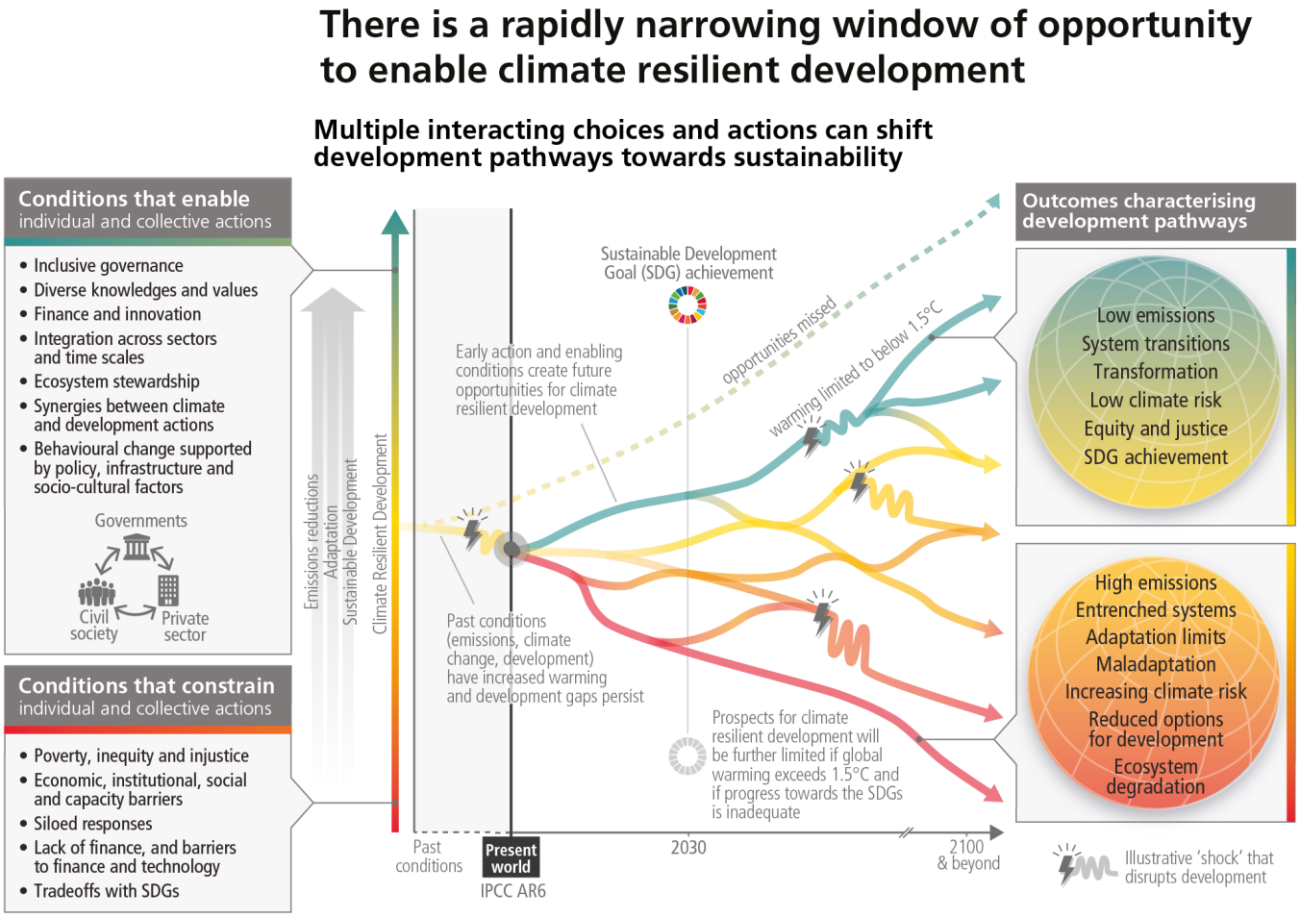


Figure SPM.6: The illustrative development pathways (red to green) and associated outcomes (right panel) show that there is a rapidly narrowing window of opportunity to secure a liveable and sustainable future for all. Climate resilient development is the process of implementing greenhouse gas mitigation and adaptation measures to support sustainable development. Diverging pathways illustrate that interacting choices and actions made by diverse government, private sector and civil society actors can advance climate resilient development, shift pathways towards sustainability, and enable lower emissions and adaptation. Diverse knowledge and values include cultural values, Indigenous Knowledge, local knowledge, and scientific knowledge. Climatic and non-climatic events, such as droughts, floods or pandemics, pose more severe shocks to pathways with lower climate resilient development (red to yellow) than to pathways with higher climate resilient development (green). There are limits to adaptation and adaptive capacity for some human and natural systems at global warming of 1.5°C, and with every increment of warming, losses and damages will increase. The development pathways taken by countries at all stages of economic development impact GHG emissions and mitigation challenges and opportunities, which vary across countries and regions. Pathways and opportunities for action are shaped by previous actions (or inactions and opportunities missed; dashed pathway) and enabling and constraining conditions (left panel), and take place in the context of climate risks, adaptation limits and development gaps. The longer emissions reductions are delayed, the fewer effective adaptation options. {Figure 4.2; 3.1; 3.2; 3.4; 4.2; 4.4; 4.5; 4.6; 4.9}

[END FIGURE SPM.6 HERE]

The Benefits of Near-Term Action

C.2 Deep, rapid and sustained mitigation and accelerated implementation of adaptation actions in this decade would reduce projected losses and damages for humans and ecosystems (*very high confidence*), and deliver many co-benefits, especially for air quality and health (*high confidence*). Delayed mitigation and adaptation action would lock-in high-emissions infrastructure, raise risks of stranded assets and cost-escalation, reduce feasibility, and increase losses and damages (*high confidence*). Near-term actions involve high up-front investments and potentially disruptive changes that can be lessened by a range of enabling policies (*high confidence*). {2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8}

C.2.1 Deep, rapid, and sustained mitigation and accelerated implementation of adaptation actions in this decade would reduce future losses and damages related to climate change for humans and ecosystems (*very high confidence*). As adaptation options often have long implementation times, accelerated implementation of adaptation in this decade is important to close adaptation gaps (*high confidence*). Comprehensive, effective, and innovative responses integrating adaptation and mitigation can harness synergies and reduce trade-offs between adaptation and mitigation (*high confidence*). {4.1, 4.2, 4.3}.

C.2.2 Delayed mitigation action will further increase global warming and losses and damages will rise and additional human and natural systems will reach adaptation limits (*high confidence*). Challenges from delayed adaptation and mitigation actions include the risk of cost escalation, lock-in of infrastructure, stranded assets, and reduced feasibility and effectiveness of adaptation and mitigation options (*high confidence*). Without rapid, deep and sustained mitigation and accelerated adaptation actions, losses and damages will continue to increase, including projected adverse impacts in Africa, LDCs, SIDS, Central and South America[49], Asia and the Arctic, and will disproportionately affect the most vulnerable populations (*high confidence*). {2.1.2; 3.1.2, 3.2, 3.3.1, 3.3.3; 4.1, 4.2, 4.3} (Figure SPM.3, Figure SPM.4)

C.2.3 Accelerated climate action can also provide co-benefits (see also C.4). Many mitigation actions would have benefits for health through lower air pollution, active mobility (e.g., walking, cycling), and shifts to sustainable healthy diets. Strong, rapid and sustained reductions in methane emissions can limit near-term warming and improve air quality by reducing global surface ozone. (*high confidence*) Adaptation can generate multiple additional benefits such as improving agricultural productivity, innovation, health and wellbeing, food security, livelihood, and biodiversity conservation (*very high confidence*). {4.2, 4.5.4, 4.5.5, 4.6}

C.2.4 Cost-benefit analysis remains limited in its ability to represent all avoided damages from climate change (*high confidence*). The economic benefits for human health from air quality improvement arising from mitigation action can be of the same order of magnitude as mitigation costs, and potentially even larger (*medium confidence*). Even without accounting for all the benefits of avoiding potential damages the global economic and social benefit of limiting global warming to 2°C exceeds the cost of mitigation in most of the assessed literature (*medium confidence*).[50] More rapid climate change mitigation, with emissions peaking earlier, increases co-benefits and reduces feasibility risks and costs in the long-term, but requires higher up-front investments (*high confidence*). {3.4.1, 4.2}

C.2.5 Ambitious mitigation pathways imply large and sometimes disruptive changes in existing economic structures, with significant distributional consequences within and between countries. To accelerate climate action, the adverse consequences of these changes can be moderated by fiscal, financial, institutional and regulatory reforms and by integrating climate actions with macroeconomic policies through (i) economy-wide packages, consistent with national circumstances, supporting sustainable low-emission growth paths; (ii) climate resilient safety nets and social protection; and (iii) improved access to finance for low-emissions infrastructure and technologies, especially in developing countries. (*high confidence*) {4.2, 4.4, 4.7, 4.8.1}

[49] The southern part of Mexico is included in the climactic subregion South Central America (SCA) for WGI. Mexico is assessed as part of North America for WGII. The climate change literature for the SCA region occasionally includes Mexico, and in those cases WGII assessment makes reference to Latin America. Mexico is considered part of Latin America and the Caribbean for WGIII.

[50] The evidence is too limited to make a similar robust conclusion for limiting warming to 1.5°C. Limiting global warming to 1.5°C instead of 2°C would increase the costs of mitigation, but also increase the benefits in terms of reduced impacts and related risks, and reduced adaptation needs (*high confidence*).

[START FIGURE SPM.7 HERE]

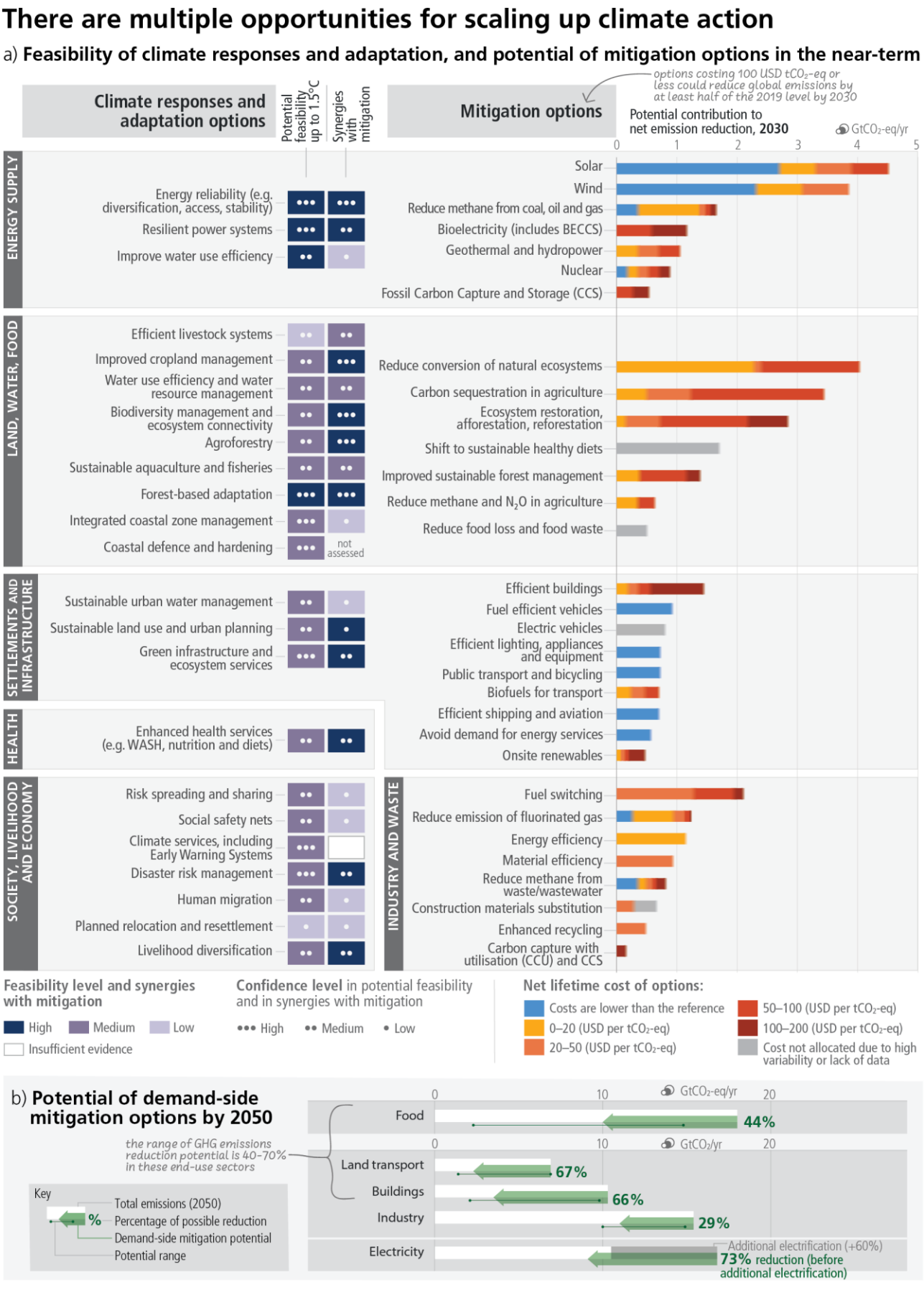


Figure SPM.7: Multiple Opportunities for scaling up climate action. **Panel (a)** presents selected mitigation and adaptation options across different systems. The left hand side of panel a shows climate responses and adaptation options assessed for their multidimensional feasibility at global scale, in the near term and up to 1.5°C global warming. As literature above 1.5°C is limited, feasibility at higher levels of warming may change, which is currently not possible to assess robustly. The term response is used here in addition to adaptation because some responses, such as migration, relocation and resettlement may or may not be considered to be adaptation. Forest based adaptation includes sustainable forest management, forest conservation and restoration, reforestation and afforestation. WASH refers to water, sanitation and hygiene. Six feasibility dimensions (economic, technological, institutional, social, environmental and geophysical) were used to calculate the potential feasibility of climate responses and adaptation options, along with their synergies with mitigation. For potential feasibility and feasibility dimensions, the figure shows high, medium, or low feasibility. Synergies with mitigation are identified as high, medium, and low.

The right hand side of Panel a provides an overview of selected mitigation options and their estimated costs and potentials in 2030. Costs are net lifetime discounted monetary costs of avoided GHG emissions calculated relative to a reference technology. Relative potentials and costs will vary by place, context and time and in the longer term compared to 2030. The potential (horizontal axis) is the net GHG emission reduction (sum of reduced emissions and/or enhanced sinks) broken down into cost categories (coloured bar segments) relative to an emission baseline consisting of current policy (around 2019) reference scenarios from the AR6 scenarios database. The potentials are assessed independently for each option and are not additive. Health system mitigation options are included mostly in settlement and infrastructure (e.g., efficient healthcare buildings) and cannot be identified separately. Fuel switching in industry refers to switching to electricity, hydrogen, bioenergy and natural gas. Gradual colour transitions indicate uncertain breakdown into cost categories due to uncertainty or heavy context dependency. The uncertainty in the total potential is typically 25–50%.

Panel (b) displays the indicative potential of demand-side mitigation options for 2050. Potentials are estimated based on approximately 500 bottom-up studies representing all global regions. The baseline (white bar) is provided by the sectoral mean GHG emissions in 2050 of the two scenarios (IEA-STEPS and IP_ModAct) consistent with policies announced by national governments until 2020. The green arrow represents the demand-side emissions reductions potentials. The range in potential is shown by a line connecting dots displaying the highest and the lowest potentials reported in the literature. Food shows demand-side potential of socio-cultural factors and infrastructure use, and changes in land-use patterns enabled by change in food demand. Demand-side measures and new ways of end-use service provision can reduce global GHG emissions in end-use sectors (buildings, land transport, food) by 40–70% by 2050 compared to baseline scenarios, while some regions and socioeconomic groups require additional energy and resources. The last row shows how demand-side mitigation options in other sectors can influence overall electricity demand. The dark grey bar shows the projected increase in electricity demand above the 2050 baseline due to increasing electrification in the other sectors. Based on a bottom-up assessment, this projected increase in electricity demand can be avoided through demand-side mitigation options in the domains of infrastructure use and socio-cultural factors that influence electricity usage in industry, land transport, and buildings (green arrow). {Figure 4.4}

[END FIGURE SPM.7 HERE]

Mitigation and Adaptation Options across Systems

C.3 Rapid and far-reaching transitions across all sectors and systems are necessary to achieve deep and sustained emissions reductions and secure a liveable and sustainable future for all. These system transitions involve a significant upscaling of a wide portfolio of mitigation and adaptation options. Feasible, effective, and low-cost options for mitigation and adaptation are already available, with differences across systems and regions. (*high confidence*) {4.1, 4.5, 4.6} (Figure SPM.7)

C.3.1 The systemic change required to achieve rapid and deep emissions reductions and transformative adaptation to climate change is unprecedented in terms of scale, but not necessarily in terms of speed (*medium confidence*). Systems transitions include: deployment of low- or zero-emission technologies; reducing and changing demand through infrastructure design and access, socio-cultural and behavioural changes, and increased technological efficiency and adoption; social protection, climate services or other services; and protecting and restoring ecosystems (*high confidence*). Feasible, effective, and low-cost options for mitigation and adaptation are already available (*high confidence*). The availability, feasibility and potential of mitigation and adaptation options in the near-term differs across systems and regions (*very high confidence*). {4.1, 4.5.1–4.5.6}(Figure SPM.7)

Energy Systems

C.3.2 Net zero CO_2 energy systems entail: a substantial reduction in overall fossil fuel use, minimal use of unabated fossil fuels[51], and use of carbon capture and storage in the remaining fossil fuel systems; electricity systems that emit no net CO_2; widespread electrification; alternative energy carriers in applications less amenable to electrification; energy conservation and efficiency; and greater integration across the energy system (*high confidence*). Large contributions to emissions reductions with costs less than USD 20 $tCO_2\text{-}eq^{-1}$ come from solar and wind energy, energy efficiency improvements, and methane emissions reductions (coal mining, oil and gas, waste) (*medium confidence*). There are feasible adaptation options that support infrastructure resilience, reliable power systems and efficient water use for existing and new energy generation systems (*very high confidence*). Energy generation diversification (e.g., via wind, solar, small scale hydropower) and demand side management (e.g., storage and energy efficiency improvements) can increase energy reliability and reduce vulnerabilities to climate change (*high confidence*). Climate responsive energy markets, updated design standards on energy assets according to current and projected climate change, smart-grid technologies, robust transmission systems and improved capacity to respond to supply deficits have high feasibility in the medium- to long-term, with mitigation co-benefits (*very high confidence*). {4.5.1} (Figure SPM.7)

Industry and Transport

C.3.3 Reducing industry GHG emissions entails coordinated action throughout value chains to promote all mitigation options, including demand management, energy and materials efficiency, circular material flows, as well as abatement technologies and transformational changes in production processes (*high confidence*). In transport, sustainable biofuels, low-emissions hydrogen, and derivatives (including ammonia and synthetic fuels) can support mitigation of CO_2 emissions from shipping, aviation, and heavy-duty land transport but require production process improvements and cost reductions (*medium confidence*). Sustainable biofuels can offer additional mitigation benefits in land-based transport in the short and medium term (*medium confidence*). Electric vehicles powered by low-GHG emissions electricity have large potential to reduce land-based transport GHG emissions, on a life cycle basis (*high confidence*). Advances in battery technologies could facilitate the electrification of heavy-duty trucks and compliment conventional electric rail systems (*medium confidence*). The environmental footprint of battery production and growing concerns about critical minerals can be addressed by material and supply diversification strategies, energy and material efficiency improvements, and circular material flows (*medium confidence*). 4.5.2, 4.5.3} (Figure SPM.7)

[51] In this context, 'unabated fossil fuels' refers to fossil fuels produced and used without interventions that substantially reduce the amount of GHG emitted throughout the life cycle; for example, capturing 90% or more CO2 from power plants, or 50–80% of fugitive methane emissions from energy supply.

Cities, Settlements and Infrastructure

C.3.4 Urban systems are critical for achieving deep emissions reductions and advancing climate resilient development (*high confidence*). Key adaptation and mitigation elements in cities include considering climate change impacts and risks (e.g. through climate services) in the design and planning of settlements and infrastructure; land use planning to achieve compact urban form, co-location of jobs and housing; supporting public transport and active mobility (e.g., walking and cycling); the efficient design, construction, retrofit, and use of buildings; reducing and changing energy and material consumption; sufficiency[52]; material substitution; and electrification in combination with low emissions sources (*high confidence*). Urban transitions that offer benefits for mitigation, adaptation, human health and well-being, ecosystem services, and vulnerability reduction for low-income communities are fostered by inclusive long-term planning that takes an integrated approach to physical, natural and social infrastructure (*high confidence*). Green/natural and blue infrastructure supports carbon uptake and storage and either singly or when combined with grey infrastructure can reduce energy use and risk from extreme events such as heatwaves, flooding, heavy precipitation and droughts, while generating co-benefits for health, well-being and livelihoods (*medium confidence*). {4.5.3}

Land, Ocean, Food, and Water

C.3.5 Many agriculture, forestry, and other land use (AFOLU) options provide adaptation and mitigation benefits that could be upscaled in the near-term across most regions. Conservation, improved management, and restoration of forests and other ecosystems offer the largest share of economic mitigation potential, with reduced deforestation in tropical regions having the highest total mitigation potential. Ecosystem restoration, reforestation, and afforestation can lead to trade-offs due to competing demands on land. Minimizing trade-offs requires integrated approaches to meet multiple objectives including food security. Demand-side measures (shifting to sustainable healthy diets[53] and reducing food loss/waste) and sustainable agricultural intensification can reduce ecosystem conversion, and methane and nitrous oxide emissions, and free up land for reforestation and ecosystem restoration. Sustainably sourced agricultural and forest products, including long-lived wood products, can be used instead of more GHG-intensive products in other sectors. Effective adaptation options include cultivar improvements, agroforestry, community-based adaptation, farm and landscape diversification, and urban agriculture. These AFOLU response options require integration of biophysical, socioeconomic and other enabling factors. Some options, such as conservation of high-carbon ecosystems (e.g., peatlands, wetlands, rangelands, mangroves and forests), deliver immediate benefits, while others, such as restoration of high-carbon ecosystems, take decades to deliver measurable results. {4.5.4} (Figure SPM.7)

C.3.6 Maintaining the resilience of biodiversity and ecosystem services at a global scale depends on effective and equitable conservation of approximately 30% to 50% of Earth's land, freshwater and ocean areas, including currently near-natural ecosystems (*high confidence*). Conservation, protection and restoration of terrestrial, freshwater, coastal and ocean ecosystems, together with targeted management to adapt to unavoidable impacts of climate change reduces the vulnerability of biodiversity and ecosystem services to climate change (*high confidence*), reduces coastal erosion and flooding (*high confidence*), and could increase carbon uptake and storage if global warming is limited (*medium confidence*). Rebuilding overexploited or depleted fisheries reduces negative climate change impacts on fisheries (*medium confidence*) and supports food security, biodiversity, human health and well-being (*high confidence*). Land restoration contributes to climate change mitigation and adaptation with synergies via enhanced ecosystem services and with economically positive returns and co-benefits for poverty reduction and improved livelihoods (*high confidence*). Cooperation, and inclusive decision making, with Indigenous Peoples and local communities, as well as recognition of inherent rights of Indigenous Peoples, is integral to successful adaptation and mitigation across forests and other ecosystems (*high confidence*). {4.5.4, 4.6} (Figure SPM.7)

[52] A set of measures and daily practices that avoid demand for energy, materials, land, and water while delivering human well-being for all within planetary boundaries {4.5.3}

[53] 'Sustainable healthy diets' promote all dimensions of individuals' health and well-being; have low environmental pressure and impact; are accessible, affordable, safe and equitable; and are culturally acceptable, as described in FAO and WHO. The related concept of 'balanced diets' refers to diets that feature plant-based foods, such as those based on coarse grains, legumes, fruits and vegetables, nuts and seeds, and animal-sourced food produced in resilient, sustainable and low-GHG emission systems, as described in SRCCL.

Health and Nutrition

C.3.7 Human health will benefit from integrated mitigation and adaptation options that mainstream health into food, infrastructure, social protection, and water policies (*very high confidence*). Effective adaptation options exist to help protect human health and wellbeing, including: strengthening public health programs related to climate-sensitive diseases, increasing health systems resilience, improving ecosystem health, improving access to potable water, reducing exposure of water and sanitation systems to flooding, improving surveillance and early warning systems, vaccine development (*very high confidence*), improving access to mental healthcare, and Heat Health Action Plans that include early warning and response systems (*high confidence*). Adaptation strategies which reduce food loss and waste or support balanced, sustainable healthy diets contribute to nutrition, health, biodiversity and other environmental benefits (*high confidence*). {4.5.5} (Figure SPM.7)

Society, Livelihoods, and Economies

C.3.8 Policy mixes that include weather and health insurance, social protection and adaptive social safety nets, contingent finance and reserve funds, and universal access to early warning systems combined with effective contingency plans, can reduce vulnerability and exposure of human systems. Disaster risk management, early warning systems, climate services and risk spreading and sharing approaches have broad applicability across sectors. Increasing education including capacity building, climate literacy, and information provided through climate services and community approaches can facilitate heightened risk perception and accelerate behavioural changes and planning. (*high confidence*) {4.5.6}

Synergies and Trade-Offs with Sustainable Development

C.4 Accelerated and equitable action in mitigating and adapting to climate change impacts is critical to sustainable development. Mitigation and adaptation actions have more synergies than trade-offs with Sustainable Development Goals. Synergies and trade-offs depend on context and scale of implementation. (*high confidence*) {3.4, 4.2, 4.4, 4.5, 4.6, 4.9, Figure 4.5}

C.4.1 Mitigation efforts embedded within the wider development context can increase the pace, depth and breadth of emission reductions (*medium confidence*). Countries at all stages of economic development seek to improve the well-being of people, and their development priorities reflect different starting points and contexts. Different contexts include but are not limited to social, economic, environmental, cultural, political circumstances, resource endowment, capabilities, international environment, and prior development (*high confidence*). In regions with high dependency on fossil fuels for, among other things, revenue and employment generation, mitigating risk for sustainable development requires policies that promote economic and energy sector diversification and considerations of just transitions principles, processes and practices (*high confidence*). Eradicating extreme poverty, energy poverty, and providing decent living standards in low-emitting countries / regions in the context of achieving sustainable development objectives, in the near term, can be achieved without significant global emissions growth (*high confidence*). {4.4, 4.6, Annex I: Glossary}

C.4.2 Many mitigation and adaptation actions have multiple synergies with Sustainable Development Goals (SDGs) and sustainable development generally, but some actions can also have trade-offs. Potential synergies with SDGs exceed potential trade-offs; synergies and trade-offs depend on the pace and magnitude of change and the development context including inequalities with consideration of climate justice. Trade-offs can be evaluated and minimised by giving emphasis to capacity building, finance, governance, technology transfer, investments, development, context specific gender-based and other social equity considerations with meaningful participation of Indigenous Peoples, local communities and vulnerable populations. (*high confidence*) {3.4.1, 4.6, Figure 4.5, 4.9}

C.4.3 Implementing both mitigation and adaptation actions together and taking trade-offs into account supports co-benefits and synergies for human health and well-being. For example, improved access to clean energy sources and technologies generate health benefits especially for women and children; electrification combined with low-GHG energy, and shifts to active mobility and public transport can enhance air quality, health, employment, and can elicit energy security and deliver equity. (*high confidence*) {4.2, 4.5.3, 4.5.5, 4.6, 4.9}

Equity and Inclusion

C.5 Prioritising equity, climate justice, social justice, inclusion and just transition processes can enable adaptation and ambitious mitigation actions and climate resilient development. Adaptation outcomes are enhanced by increased support to regions and people with the highest vulnerability to climatic hazards. Integrating climate adaptation into social protection programs improves resilience. Many options are available for reducing emission-intensive consumption, including through behavioural and lifestyle changes, with co-benefits for societal well-being. (*high confidence*) {4.4, 4.5}

C.5.1 Equity remains a central element in the UN climate regime, notwithstanding shifts in differentiation between states over time and challenges in assessing fair shares. Ambitious mitigation pathways imply large and sometimes disruptive changes in economic structure, with significant distributional consequences, within and between countries. Distributional consequences within and between countries include shifting of income and employment during the transition from high- to low-emissions activities. (*high confidence*) {4.4}

C.5.2 Adaptation and mitigation actions, that prioritise equity, social justice, climate justice, rights-based approaches, and inclusivity, lead to more sustainable outcomes, reduce trade-offs, support transformative change and advance climate resilient development. Redistributive policies across sectors and regions that shield the poor and vulnerable, social safety nets, equity, inclusion and just transitions, at all scales can enable deeper societal ambitions and resolve trade-offs with sustainable development goals. Attention to equity and broad and meaningful participation of all relevant actors in decision making at all scales can build social trust which builds on equitable sharing of benefits and burdens of mitigation that deepen and widen support for transformative changes. (*high confidence*) {4.4}

C.5.3 Regions and people (3.3 to 3.6 billion in number) with considerable development constraints have high vulnerability to climatic hazards (see A.2.2). Adaptation outcomes for the most vulnerable within and across countries and regions are enhanced through approaches focusing on equity, inclusivity and rights-based approaches. Vulnerability is exacerbated by inequity and marginalisation linked to e.g., gender, ethnicity, low incomes, informal settlements, disability, age, and historical and ongoing patterns of inequity such as colonialism, especially for many Indigenous Peoples and local communities. Integrating climate adaptation into social protection programs, including cash transfers and public works programs, is highly feasible and increases resilience to climate change, especially when supported by basic services and infrastructure. The greatest gains in well-being in urban areas can be achieved by prioritising access to finance to reduce climate risk for low-income and marginalised communities including people living in informal settlements. (*high confidence*). {4.4, 4.5.3, 4.5.5, 4.5.6}

C.5.4 The design of regulatory instruments and economic instruments and consumption-based approaches, can advance equity. Individuals with high socio-economic status contribute disproportionately to emissions, and have the highest potential for emissions reductions. Many options are available for reducing emission-intensive consumption while improving societal well-being. Socio-cultural options, behaviour and lifestyle changes supported by policies, infrastructure, and technology can help end-users shift to low-emissions-intensive consumption, with multiple co-benefits. A substantial share of the population in low-emitting countries lack access to modern energy services. Technology development, transfer, capacity building and financing can support developing countries/ regions leapfrogging or transitioning to low-emissions transport systems thereby providing multiple co-benefits. Climate resilient development is advanced when actors work in equitable, just and inclusive ways to reconcile divergent interests, values and worldviews, toward equitable and just outcomes. (*high confidence*) {2.1, 4.4}

Governance and Policies

C.6 Effective climate action is enabled by political commitment, well-aligned multilevel governance, institutional frameworks, laws, policies and strategies and enhanced access to finance and technology. Clear goals, coordination across multiple policy domains, and inclusive governance processes facilitate effective climate action. Regulatory and economic instruments can support deep emissions reductions and climate resilience if scaled up and applied widely. Climate resilient development benefits from drawing on diverse knowledge. (*high confidence*) {2.2, 4.4, 4.5, 4.7}

C.6.1 Effective climate governance enables mitigation and adaptation. Effective governance provides overall direction on setting targets and priorities and mainstreaming climate action across policy domains and levels, based on national circumstances and in the context of international cooperation. It enhances monitoring and evaluation and regulatory certainty, prioritising inclusive, transparent and equitable decision-making, and improves access to finance and technology (see C.7). (*high confidence)* {2.2.2, 4.7}

C.6.2 Effective local, municipal, national and subnational institutions build consensus for climate action among diverse interests, enable coordination and inform strategy setting but require adequate institutional capacity. Policy support is influenced by actors in civil society, including businesses, youth, women, labour, media, Indigenous Peoples, and local communities. Effectiveness is enhanced by political commitment and partnerships between different groups in society. (*high confidence*) {2.2; 4.7}

C.6.3 Effective multilevel governance for mitigation, adaptation, risk management, and climate resilient development is enabled by inclusive decision processes that prioritise equity and justice in planning and implementation, allocation of appropriate resources, institutional review, and monitoring and evaluation. Vulnerabilities and climate risks are often reduced through carefully designed and implemented laws, policies, participatory processes, and interventions that address context specific inequities such as those based on gender, ethnicity, disability, age, location and income. (*high confidence*) {4.4, 4.7}

C.6.4 Regulatory and economic instruments could support deep emissions reductions if scaled up and applied more widely (*high confidence*). Scaling up and enhancing the use of regulatory instruments can improve mitigation outcomes in sectoral applications, consistent with national circumstances (*high confidence*). Where implemented, carbon pricing instruments have incentivized low-cost emissions reduction measures but have been less effective, on their own and at prevailing prices during the assessment period, to promote higher-cost measures necessary for further reductions (*medium confidence*). Equity and distributional impacts of such carbon pricing instruments, e.g., carbon taxes and emissions trading, can be addressed by using revenue to support low-income households, among other approaches. Removing fossil fuel subsidies would reduce emissions[54] and yield benefits such as improved public revenue, macroeconomic and sustainability performance; subsidy removal can have adverse distributional impacts, especially on the most economically vulnerable groups which, in some cases can be mitigated by measures such as redistributing revenue saved, all of which depend on national circumstances (*high confidence*). Economy-wide policy packages, such as public spending commitments, pricing reforms, can meet short-term economic goals while reducing emissions and shifting development pathways towards sustainability (*medium confidence*). Effective policy packages would be comprehensive, consistent, balanced across objectives, and tailored to national circumstances *(high confidence).* {2.2.2, 4.7}

C.6.5 Drawing on diverse knowledges and cultural values, meaningful participation and inclusive engagement processes—including Indigenous Knowledge, local knowledge, and scientific knowledge—facilitates climate resilient development, builds capacity and allows locally appropriate and socially acceptable solutions. (*high confidence*) {4.4, 4.5.6, 4.7}

[54] Fossil fuel subsidy removal is projected by various studies to reduce global CO_2 emission by 1-4%, and GHG emissions by up to 10% by 2030, varying across regions (*medium confidence*).

Finance, Technology and International Cooperation

C.7 Finance, technology and international cooperation are critical enablers for accelerated climate action. If climate goals are to be achieved, both adaptation and mitigation financing would need to increase many-fold. There is sufficient global capital to close the global investment gaps but there are barriers to redirect capital to climate action. Enhancing technology innovation systems is key to accelerate the widespread adoption of technologies and practices. Enhancing international cooperation is possible through multiple channels. *(high confidence*) {2.3, 4.8}

C.7.1 Improved availability of and access to finance[55] would enable accelerated climate action (*very high confidence*). Addressing needs and gaps and broadening equitable access to domestic and international finance, when combined with other supportive actions, can act as a catalyst for accelerating adaptation and mitigation, and enabling climate resilient development *(high confidence).* If climate goals are to be achieved, and to address rising risks and accelerate investments in emissions reductions, both adaptation and mitigation finance would need to increase many-fold (*high confidence).* {4.8.1}

C.7.2 Increased access to finance can build capacity and address soft limits to adaptation and avert rising risks, especially for developing countries, vulnerable groups, regions and sectors (*high confidence*). Public finance is an important enabler of adaptation and mitigation, and can also leverage private finance *(high confidence)*. Average annual modelled mitigation investment requirements for 2020 to 2030 in scenarios that limit warming to 2°C or 1.5°C are a factor of three to six greater than current levels[56], and total mitigation investments (public, private, domestic and international) would need to increase across all sectors and regions (*medium confidence*). Even if extensive global mitigation efforts are implemented, there will be a need for financial, technical, and human resources for adaptation *(high confidence*). {4.3, 4.8.1}

C.7.3 There is sufficient global capital and liquidity to close global investment gaps, given the size of the global financial system, but there are barriers to redirect capital to climate action both within and outside the global financial sector and in the context of economic vulnerabilities and indebtedness facing developing countries. Reducing financing barriers for scaling up financial flows would require clear signalling and support by governments, including a stronger alignment of public finances in order to lower real and perceived regulatory, cost and market barriers and risks and improving the risk-return profile of investments. At the same time, depending on national contexts, financial actors, including investors, financial intermediaries, central banks and financial regulators can shift the systemic underpricing of climate-related risks, and reduce sectoral and regional mismatches between available capital and investment needs. (*high confidence*) {4.8.1}

C.7.4 Tracked financial flows fall short of the levels needed for adaptation and to achieve mitigation goals across all sectors and regions. These gaps create many opportunities and the challenge of closing gaps is largest in developing countries. Accelerated financial support for developing countries from developed countries and other sources is a critical enabler to enhance adaptation and mitigation actions and address inequities in access to finance, including its costs, terms and conditions, and economic vulnerability to climate change for developing countries. Scaled-up public grants for mitigation and adaptation funding for vulnerable regions, especially in Sub-Saharan Africa, would be cost-effective and have high social returns in terms of access to basic energy. Options for scaling up mitigation in developing countries include: increased levels of public finance and publicly mobilised private finance flows from developed to developing countries in the context of the USD 100 billion-a-year goal; increased use of public guarantees to reduce risks and leverage private flows at lower cost; local capital markets development; and building greater trust in international cooperation processes. A coordinated effort to make the post-pandemic recovery sustainable over the longer-term can accelerate climate action, including in developing regions and countries facing high debt costs, debt distress and macroeconomic uncertainty. (*high confidence*) {4.8.1}

[55] Finance originates from diverse sources: public or private, local, national or international, bilateral or multilateral, and alternative sources. It can take the form of grants, technical assistance, loans (concessional and non-concessional), bonds, equity, risk insurance and financial guarantees (of different types).
[56] These estimates rely on scenario assumptions.

C.7.5 Enhancing technology innovation systems can provide opportunities to lower emissions growth, create social and environmental co-benefits, and achieve other SDGs. Policy packages tailored to national contexts and technological characteristics have been effective in supporting low-emission innovation and technology diffusion. Public policies can support training and R&D, complemented by both regulatory and market-based instruments that create incentives and market opportunities. Technological innovation can have trade-offs such as new and greater environmental impacts, social inequalities, overdependence on foreign knowledge and providers, distributional impacts and rebound effects[57], requiring appropriate governance and policies to enhance potential and reduce trade-offs. Innovation and adoption of low-emission technologies lags in most developing countries, particularly least developed ones, due in part to weaker enabling conditions, including limited finance, technology development and transfer, and capacity building. (*high confidence*) {4.8.3}

C.7.6 International cooperation is a critical enabler for achieving ambitious climate change mitigation, adaptation, and climate resilient development (*high confidence*). Climate resilient development is enabled by increased international cooperation including mobilising and enhancing access to finance, particularly for developing countries, vulnerable regions, sectors and groups and aligning finance flows for climate action to be consistent with ambition levels and funding needs (*high confidence*). Enhancing international cooperation on finance, technology and capacity building can enable greater ambition and can act as a catalyst for accelerating mitigation and adaptation, and shifting development pathways towards sustainability (*high confidence*). This includes support to NDCs and accelerating technology development and deployment (*high confidence*). Transnational partnerships can stimulate policy development, technology diffusion, adaptation and mitigation, though uncertainties remain over their costs, feasibility and effectiveness (*medium confidence*). International environmental and sectoral agreements, institutions and initiatives are helping, and in some cases may help, to stimulate low GHG emissions investments and reduce emissions (*medium confidence*). {2.2.2, 4.8.2}

[57] Leading to lower net emission reductions or even emission increases.