

Note: Cette traduction a été établie par le Greffe à des fins internes et n'a aucun caractère officiel

COUR INTERNATIONALE DE JUSTICE

**DIFFÉREND CONCERNANT LE STATUT ET L'UTILISATION DES EAUX DU SILALA
(CHILI c. BOLIVIE)**

**EXPOSÉ ÉCRIT
DES EXPERTS DE LA RÉPUBLIQUE DU CHILI**

Howard Wheeler et Denis Peach

14 janvier 2022

[Traduction du Greffe]

A PROPOS DES AUTEURS

Howard Wheeler

Howard Wheeler est titulaire d'une chaire d'excellence en recherche du Canada sur la sécurité de l'eau à l'Université de la Saskatchewan (Canada), où il a fondé et dirigé le Global Institute for Water Security, et il est professeur émérite d'hydrologie à l'Imperial College London, où il a occupé un poste universitaire à temps plein pendant 32 ans. Eminent spécialiste des sciences et de la modélisation hydrologiques, il a publié plus de 240 articles revus par un comité de lecture et 6 livres. Il est membre de la Royal Society of Canada, de la Royal Academy of Engineering du Royaume-Uni et de l'American Geophysical Union. Il a reçu la médaille Dooge du prix international d'hydrologie 2018 décerné par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), l'organisation météorologique mondiale et l'association internationale des sciences hydrologiques, et il a remporté en 2006 le prix international du prince Sultan bin Abdulaziz pour l'eau. Il a lancé et dirigé des programmes de recherche nationaux et internationaux au Royaume-Uni et au Canada, et a conseillé des Etats, provinces et gouvernements nationaux sur des questions liées aux crues, aux ressources hydriques et à la qualité de l'eau. Il a siégé au tribunal international d'arbitrage établi conformément au traité sur les eaux de l'Indus et est intervenu au nom de la Hongrie et de l'Argentine devant la Cour internationale de Justice. Il était jusqu'en 2014 vice-président du projet intitulé «Expérience mondiale sur les cycles de l'énergie et de l'eau» (GEWEX) du programme mondial de recherche sur le climat et il dirige le réseau d'information de l'UNESCO sur l'eau et le développement dans les zones arides (GWADI). Au Canada, il a été à la tête du réseau Changing Cold Regions Network, axé sur l'analyse et la prédiction des changements hydrologiques dans l'ouest du Canada, et du Global Water Futures Program, consacré à la gestion de l'avenir de l'eau au Canada et dans d'autres régions froides, où le réchauffement planétaire modifie les paysages, les écosystèmes et le milieu aquatique. En 2018, il était le seul membre non américain du groupe d'experts des académies nationales des Etats-Unis chargé d'établir un rapport sur l'avenir de l'eau et ses priorités dans le pays.

Denis Peach

Denis Peach a dirigé pendant neuf ans le programme du British Geological Survey (institut britannique d'études géologiques (BGS)) portant sur les eaux souterraines puis a travaillé six ans comme scientifique en chef pour cet institut. Cet hydrogéologue aux nombreux centres d'intérêt scientifiques est fort de 49 années d'expérience professionnelle qu'il a notamment consacrées à travailler pour une administration des eaux au Royaume-Uni, à effectuer des missions à l'étranger pour étudier les milieux hydrogéologiques tropicaux et l'hydrogéologie des petites îles et à collaborer avec des consultants internationaux dans le domaine de l'hydrogéologie des zones arides. Il s'intéresse particulièrement à la modélisation des eaux souterraines, sur laquelle il a travaillé au sein du BGS, ainsi qu'à l'hydrogéologie des zones arides et à l'hydrogéologie karstique. Il a été vice-président de la société géologique de Londres (GSL) et professeur invité à l'Imperial College London et à l'Université de Birmingham ; il a également eu l'honneur de présenter la conférence Ineson à la GSL en 2009. Il a dirigé de nombreux programmes nationaux de recherche géologique et hydrogéologique au Royaume-Uni et a siégé au sein de nombre de comités de programmes de recherche nationaux et de comités stratégiques nationaux sur les ressources en eau. Il mène actuellement des travaux de recherche avec le BGS et l'Imperial College London et a récemment conseillé l'Université de la Saskatchewan ainsi que des consultants en ingénierie britanniques.

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
LISTE DES FIGURES	iii
1. INTRODUCTION.....	1
1.1. Contexte	1
1.2. Résumé des principaux points d'accord et de désaccord	1
1.3. Les cinq rapports que nous avons soumis à la Cour — contexte et résumé.....	1
2. LE SILALA	2
2.1. Introduction.....	2
2.2. Définition du bassin versant et fonctionnement hydrologique.....	3
2.3. Géologie et hydrogéologie	7
2.4. La chenalisation historique du Silala en Bolivie	10
3. PRINCIPAUX POINTS D'ACCORD	13
4. PRINCIPAUX POINTS DE DÉSACCORD	14
4.1. Introduction.....	14
4.2. Bilan hydrique et modèles en champ proche du DHI	15
4.3. Principaux points de désaccord.....	17
4.3.1. Conditions limites du modèle en champ proche.....	17
4.3.2. Incohérences, inexactitudes et instabilités du modèle	18
4.3.3. Erreurs relatives à l'interprétation de la géologie et de l'hydrogéologie.....	19
4.3.4. Dégradation des zones humides.....	21
4.3.5. Dans les sources Cajones et Orientales, l'écoulement des sources à apports souterrains aurait-il pu être considérablement amélioré par le recours à des explosifs ?	22
4.4. Résumé.....	22
5. CONCLUSIONS	23
6. RÉFÉRENCES.....	25

LISTE DES FIGURES

	<i>Page</i>
Figure 1. Image 3D de la topographie incluant les courbes de niveau délimitant le bassin de drainage des eaux de surface du bassin hydrographique du Silala. La frontière internationale (ligne rouge) et la ligne de partage des eaux (ligne noire) sont représentées comme sur la figure 2 (Muñoz <i>et al.</i> , 2017, partie supérieure de la figure 3-3, MC, vol. 5, p. 182)	4
Figure 2. Coupe longitudinale du Silala et de ses principaux affluents (Wheater et Peach (2017), figure 4, MC, vol. 1, p. 143).....	5
Figure 3. Bassin versant topographique du Silala et bassin versant souterrain (Wheater et Peach (2019a), figure 1, RC, vol. 1, p. 105)	6
Figure 4. Ancienne prise d'eau de la FCAB en Bolivie, prise d'eau de la FCAB au Chili et conduites construites et utilisées par la FCAB. L'ancienne prise d'eau en Bolivie et la conduite n° 1 (ligne orange) acheminaient l'eau du territoire bolivien aux réservoirs de la FCAB situés à la gare de San Pedro (et jusqu'à Antofagasta). La prise d'eau et la conduite n° 2 (ligne verte) acheminaient l'eau du territoire chilien, également vers les réservoirs de San Pedro (Muñoz <i>et al.</i> , 2017 ; Wheater et Peach (2017), figure 6, MC, vol. 1, p. 146).....	11
Figure 5. Domaines couverts par les trois modèles distincts du DHI (Muñoz <i>et al.</i> , 2019 ; Wheater et Peach (2019a), figure 2, PAC, vol. 1, p. 91)	16

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

Nous, Howard Wheeler et Denis Peach, avons préparé le présent exposé écrit à la demande de la Cour internationale de Justice, formulée par lettre du 15 octobre 2021 adressée à l'agente de la République du Chili, Mme Ximena Fuentes Torrijo, par le greffier, M. Philippe Gautier. Ce dernier nous a priés de résumer les cinq rapports préalablement soumis à la Cour dans le mémoire (MC), la réplique (RC) et la pièce additionnelle du Chili (PAC).

Dans la présente introduction, nous résumerons nos principaux points d'accord et de désaccord sur les questions techniques examinées en l'affaire et nous rappellerons le contexte des précédentes conclusions soumises à la Cour. A la section 2, nous donnerons une description du Silala et de ses caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques ; aux sections 3 et 4, nous présenterons plus en détail les principaux points d'accord et de désaccord entre les experts. Enfin, la section 5 sera consacrée à nos conclusions.

1.2. Résumé des principaux points d'accord et de désaccord

Les deux équipes d'experts, c'est-à-dire nous-mêmes et les consultants du Danish Hydraulic Institute (DHI, institut danois d'hydraulique) mandatés par la Bolivie, s'accordent sur le fait que le Silala présente les propriétés d'un cours d'eau international. Que ce soit sous forme d'eaux de surface ou d'eaux souterraines, ses eaux s'écoulent naturellement vers l'aval, à travers la frontière internationale, jusqu'au Chili.

Les travaux de chenalisation effectués du côté bolivien en 1928 ont pu avoir un certain effet, limité, sur l'écoulement du Silala. Les avis divergent cependant quant à l'ampleur de cet effet : nous considérons que celui-ci est très faible, tandis que les experts du DHI estiment qu'il représente une augmentation de 11 à 33 % de l'écoulement de surface transfrontière. Cela étant, nous sommes tous d'accord pour dire que la chenalisation n'a pas eu d'incidence sur la direction de l'écoulement du Silala et que, mis à part un effet très mineur subie par l'évaporation, toute augmentation de l'écoulement de surface s'accompagnera d'une diminution de l'écoulement souterrain traversant la frontière, et inversement.

Autrement dit, bien qu'il y ait désaccord quant aux effets précis de la chenalisation sur l'écoulement de surface, il est convenu qu'indépendamment de celle-ci (et sous réserve de ses effets mineurs sur l'évaporation), toutes les eaux du Silala continuent de s'écouler vers l'aval à travers la frontière internationale jusqu'au Chili. Par conséquent, la chenalisation n'a pas eu, et n'aurait pu avoir, d'incidence concrète sur le volume d'eau qui entre au Chili.

1.3. Les cinq rapports que nous avons soumis à la Cour — contexte et résumé

Dans une série de rapports établis conjointement qui accompagnent les écritures du Chili, nous avons présenté des preuves scientifiques de plus en plus nombreuses sur le fonctionnement hydrologique du Silala, ainsi que notre opinion d'experts indépendants sur les diverses conclusions que la Bolivie a soumises à la Cour¹. Dans ces rapports, chacun de nous répond à plusieurs questions que lui a posées le Chili. Ainsi, M. Wheeler a rédigé en tant qu'auteur principal les réponses aux

¹ Sous la direction conjointe des auteurs du présent exposé écrit, une équipe d'experts chiliens conduite par M. José Muñoz, expert en hydrogéologie, a entrepris une série d'études intensives accompagnées d'un suivi approfondi, qui sont toujours en cours.

questions qui lui étaient adressées, et M. Peach en a fait de même. Toutefois, ces rapports étant le fruit d'une collaboration, ils reflètent notre opinion conjointe.

Nous avons joint deux rapports au mémoire du Chili (juillet 2017), l'un intitulé *Le Silala dans sa forme actuelle — fonctionnement du système fluvial* («Wheater et Peach (2017)»), qui traite surtout du fonctionnement hydrologique de la rivière, et l'autre intitulé *L'évolution du Silala, de son bassin versant et de sa gorge* («Peach et Wheeler (2017)»), consacré à l'histoire géologique et géomorphologique du bassin. Ces deux rapports sont axés sur la question centrale de savoir si le Silala remplit les critères requis pour être qualifié de cours d'eau international, ce à quoi nous avons tous deux répondu par l'affirmative, du point de vue hydrologique et du point de vue hydrogéologique respectivement. En outre, nous y donnons une première opinion quant à l'incidence de la chenalisation effectuée par le passé (la chenalisation historique), à savoir que les effets sur les écoulements de surface à la frontière seraient minimes, ne dépassant pas 2 %.

Dans la réplique du Chili (février 2019) qui répond au contre-mémoire de la Bolivie (CMB), nous avons actualisé nos preuves scientifiques et donné notre opinion d'experts indépendants sur celles produites par la Bolivie, en particulier en ce qui concerne la modélisation effectuée par ses experts internationaux du DHI pour déterminer les effets de la chenalisation des zones humides boliviennes sur l'écoulement de surface («DHI (2018a)»). Dans le rapport intitulé *Incidences de la chenalisation du Silala en Bolivie sur l'hydrologie de son bassin hydrographique* («Wheater et Peach (2019a)»), nous avons résumé les points d'entente existant entre les Parties sur le plan technique et expliqué nos doutes au sujet de la modélisation du DHI. Outre les problèmes techniques que pose selon nous cette modélisation, nous avons constaté que la Bolivie donnait une interprétation erronée de la géologie et de l'hydrogéologie du bassin hydrographique du Silala — examinées dans notre deuxième rapport, intitulé *La géologie, l'hydrogéologie et l'hydrochimie du bassin hydrographique du Silala* («Peach et Wheeler (2019)»).

3 Enfin, dans la pièce additionnelle du Chili (septembre 2019), après avoir reçu des données numériques de la Bolivie et pour répondre à la duplique soumise par cette dernière (DB), nous avons procédé à une analyse plus approfondie de la modélisation bolivienne des effets de la chenalisation, dans notre rapport intitulé *Incidences de la chenalisation du Silala en Bolivie sur l'hydrologie de son bassin hydrographique — une analyse actualisée* («Wheater et Peach (2019b)»). Cette analyse actualisée, qui repose sur un examen des données utilisées par la Bolivie pour ses modèles, a mis en lumière d'autres erreurs graves dans la modélisation. Nous avons également réexaminé l'interprétation de la géologie et de l'hydrogéologie des bassins versants, de surface et souterrain, du Silala sur laquelle la Bolivie fonde sa modélisation. Notre conclusion est que les résultats de cette modélisation ne sont nullement fiables et que la Cour ne devrait pas en tenir compte.

2. LE SILALA

2.1. Introduction

Après une première reconnaissance du terrain et une analyse des études scientifiques disponibles, le Chili a mis en place, sur nos recommandations, un important programme d'études hydrologiques et hydrogéologiques afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique du Silala — notamment les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines — et l'évolution de celui-ci sur les plans géologique et géomorphologique. Le régime d'écoulement souterrain a été étudié à l'aide de forages et de pompages d'essai ; des levés cartographiques géologiques détaillés et des relevés hydrochimiques ont été effectués. La majorité des informations obtenues figurent dans nos deux rapports de 2017 (Wheater et Peach (2017) ; Peach et Wheeler (2017)). Cependant, un certain nombre d'affirmations erronées ont été formulées dans le contre-mémoire de la Bolivie au sujet de la géologie et de l'hydrogéologie du bassin hydrographique du Silala et des incidences de la chenalisation dans les zones humides boliviennes (Cajones et

Orientales)² où les écoulements du Silala prennent leur source. N'étant pas en mesure d'observer directement ces zones humides, nous avons entrepris d'étudier en détail une zone humide similaire dans le bassin hydrographique du Silala au Chili, celle appelée Quebrada Negra, ce qui nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement des zones humides dans le bassin et de faire une analyse comparative de celles de la Bolivie situées en amont, sur la base de données de télédétection. Nous avons rendu compte de ces travaux dans la réplique du Chili, en joignant également un examen détaillé des interprétations que fait la Bolivie de la géologie et de l'hydrogéologie. Si quelques incertitudes demeurent, nous avons toutefois acquis une bien meilleure compréhension du bassin hydrographique, que nous résumons ci-dessous.

2.2. Définition du bassin versant et fonctionnement hydrologique

4 Le Silala présente les caractéristiques typiques d'une rivière à apports souterrains³. Si ses écoulements pérennes prennent naissance dans des sources souterraines en Bolivie, liées aux zones humides Cajones et Orientales, à plus de 4323 mètres au-dessus du niveau de la mer, la rivière interagit néanmoins avec les eaux souterraines tout au long de son parcours. Elle reçoit d'importants apports de sources souterraines émergeant de la paroi de la gorge du Silala qui traverse la frontière internationale (à environ 4277 mètres au-dessus du niveau de la mer) et perd de l'eau au profit d'un aquifère sous-fluvial au niveau de son chenal d'écoulement (MC, vol. 1, p. 135, 168-169). Un système hydrogéologique plus profond a également été repéré, lequel contribue actuellement au débit de la rivière au Chili via un écoulement provenant d'un puits artésien⁴ (MC, vol. 1, p. 135, 171-173).

La topographie du bassin hydrographique est telle que les eaux d'écoulement drainées naturellement coulent de la Bolivie au Chili en provenance d'un bassin versant topographique, représenté à la figure 1. La figure 2 montre la coupe longitudinale de la rivière. Le dénivelé entre les sources en Bolivie et le lit du Silala à la frontière est de plus de 45 mètres et la pente du lit naturel de la rivière est relativement abrupte (environ 4 à 5 %). Aux abords de la frontière, le lit traverse une gorge qui a été creusée par les processus fluviaux. Ainsi qu'il a été signalé dans notre rapport Peach et Wheeler (2017), les marques relevées dans la gorge montrent qu'une rivière coule et traverse depuis plus de 8400 ans un point qui est aujourd'hui la frontière internationale (MC, vol. 1, p. 218-223).

² Appelées respectivement «zone humide nord» et «zone humide sud» par la Bolivie.

³ De nombreuses grandes rivières prennent naissance dans des sources souterraines pérennes ou non. La Tamise (au Royaume-Uni) en est un exemple notoire (British Geological Survey, 1996).

⁴ Un puits artésien se caractérise par le fait que la pression de l'eau dans l'aquifère est telle qu'elle génère des écoulements de surface.

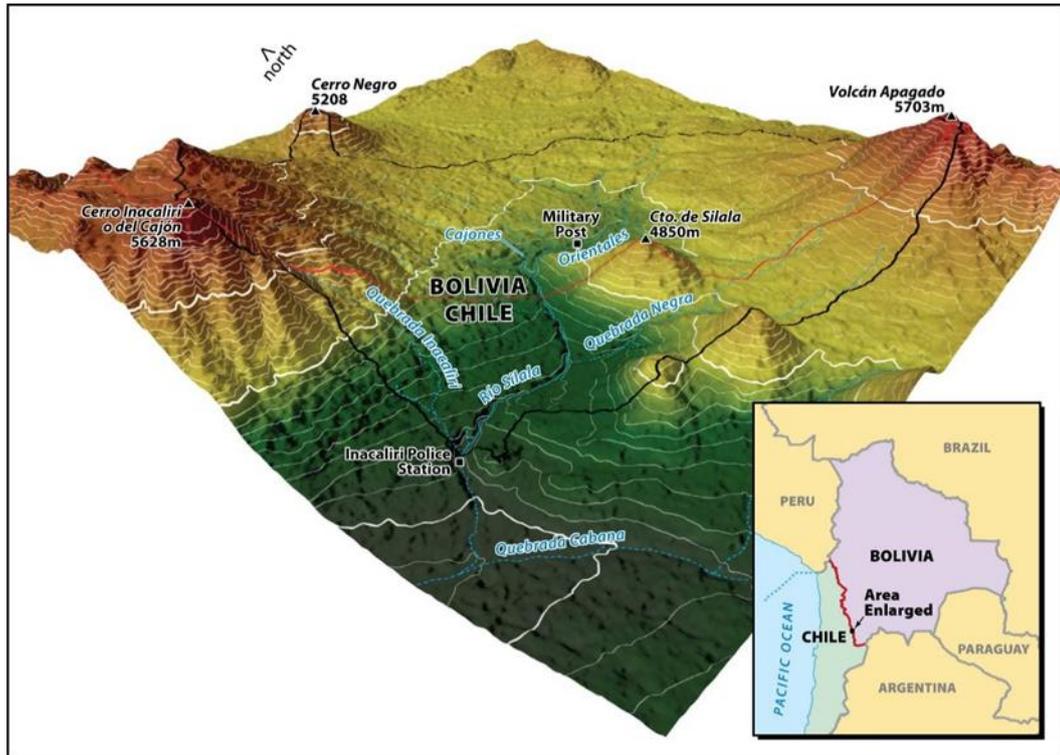


Figure 1

Image 3D de la topographie incluant les courbes de niveau délimitant le bassin de drainage des eaux de surface du bassin hydrographique du Silala. La frontière internationale (ligne rouge) et la ligne de partage des eaux (ligne noire) sont représentées comme sur la figure 2 (Muñoz *et al.*, 2017, partie supérieure de la figure 3-3, MC, vol. 5, p. 182).

Légende :

- | | | |
|--------------------------|---|---------------------------------|
| Military post | = | Poste militaire |
| Inacaliri police station | = | Poste de police d’Inacaliri |
| Enlarged area | = | Emplacement de la zone agrandie |

5

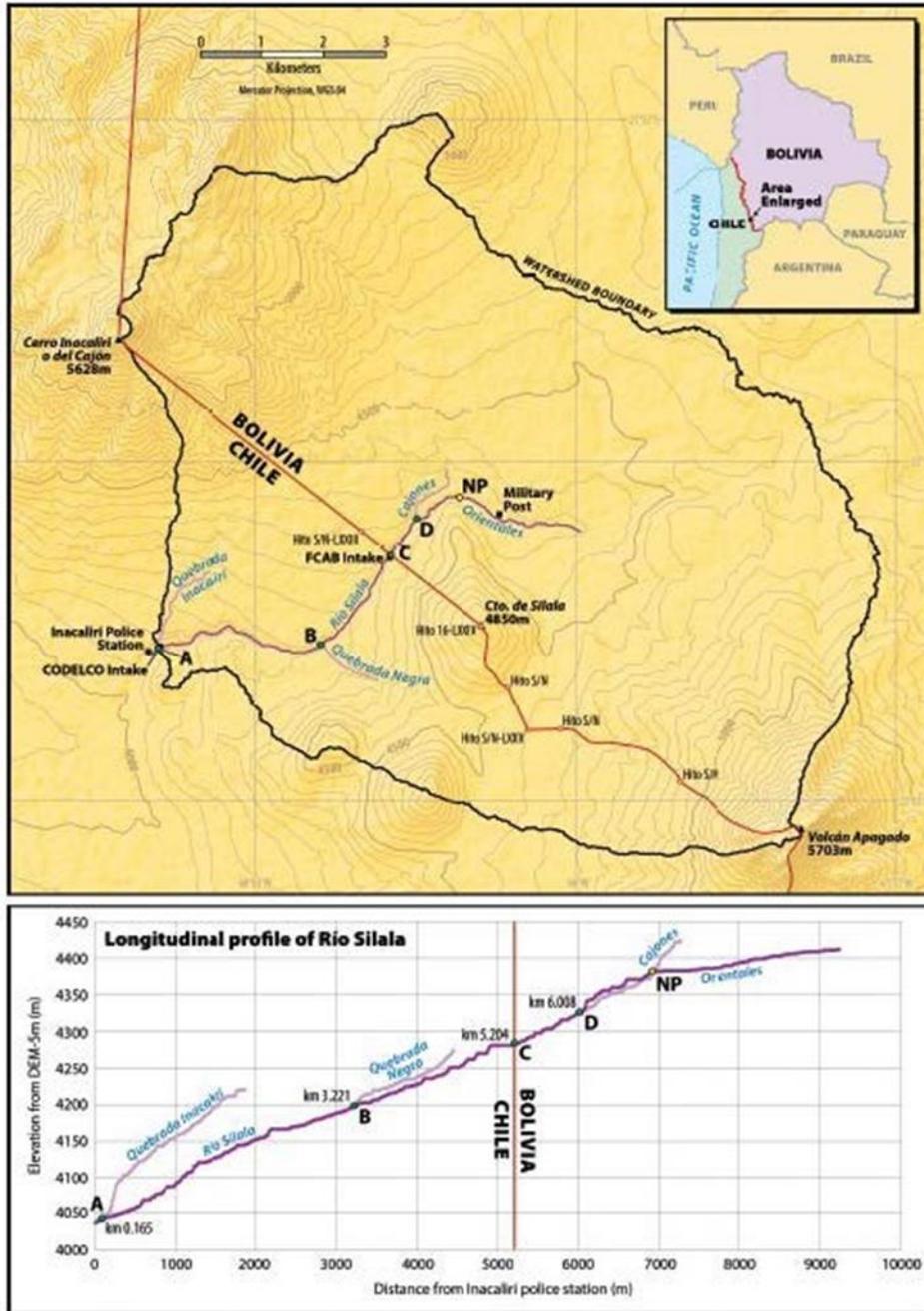


Figure 2
Coupe longitudinale du Silala et de ses principaux affluents
 (Wheater et Peach (2017), figure 4, MC, vol. 1, p. 143).

Légende :

- | | | |
|--|---|---|
| Elevation from DEM-5m (m) | = | Altitudes relevées sur la carte MNT 5m (m) |
| Distance from Inacaliri police station (m) | = | Distance par rapport au poste de police d’Inacaliri (m) |
| Enlarged area | = | Emplacement de la zone agrandie |

6

Le climat du bassin est décrit dans notre rapport Wheater et Peach (2017) (MC, vol. 1, p. 154-161). Nous estimons que la moyenne annuelle des précipitations sur le bassin topographique est de 165 mm. Dans un climat aussi sec, l'évaporation (issue principalement de surfaces d'eau libre et de la transpiration végétale) est limitée, sur la majeure partie de la région, par les précipitations qui se produisent. Toutefois, dans les zones humides, les sources fournissent des apports en eau pouvant alimenter des taux d'évaporation élevés. Selon nos estimations, 78 mm des précipitations reçues annuellement sont déchargés dans l'écoulement de la rivière, et 87 mm sont perdus par

évaporation pour l'ensemble du bassin hydrographique. A l'aide de méthodes de télédétection, nous avons estimé que l'évaporation dans les zones humides boliviennes équivalait à 0,7 % de l'écoulement de la rivière, mais, conscients de la forte incertitude entourant ce chiffre, nous avons proposé une estimation haute établie à 2 % de l'écoulement moyen.

L'analyse du bilan hydrique⁵ a montré que les écoulements de surface du Silala ne pouvaient pas être alimentés par les seules précipitations enregistrées dans le bassin versant topographique. Dans le contre-mémoire de la Bolivie, le DHI fait état d'un bassin versant souterrain plus vaste (CMB, vol. 2, p. 275, figure 5), et nous sommes entièrement d'accord. Notre meilleure estimation de la superficie de ce bassin est représentée à la figure 3.

Les eaux souterraines qui fournissent des apports aux sources alimentant les zones humides boliviennes Orientales et Cajones émergent de dépôts volcaniques et d'alluvions sur lesquelles s'étendent ces zones humides. La plupart de ces dépôts sont des aquifères alimentés par des eaux de recharge issues des précipitations, moins l'évaporation, tombant sur le bassin versant souterrain plus vaste (figure 3). Ces aquifères s'étendent sur l'ensemble du bassin versant en Bolivie et au Chili. Par conséquent, les eaux souterraines s'écouleront vers l'aval de la Bolivie au Chili, en franchissant la frontière internationale, que ce soit en tant qu'eaux de surface à partir des sources ou en tant qu'eaux souterraines dans les aquifères (MC, vol. 1, p. 167 et 168, figures 20 et 21).

7

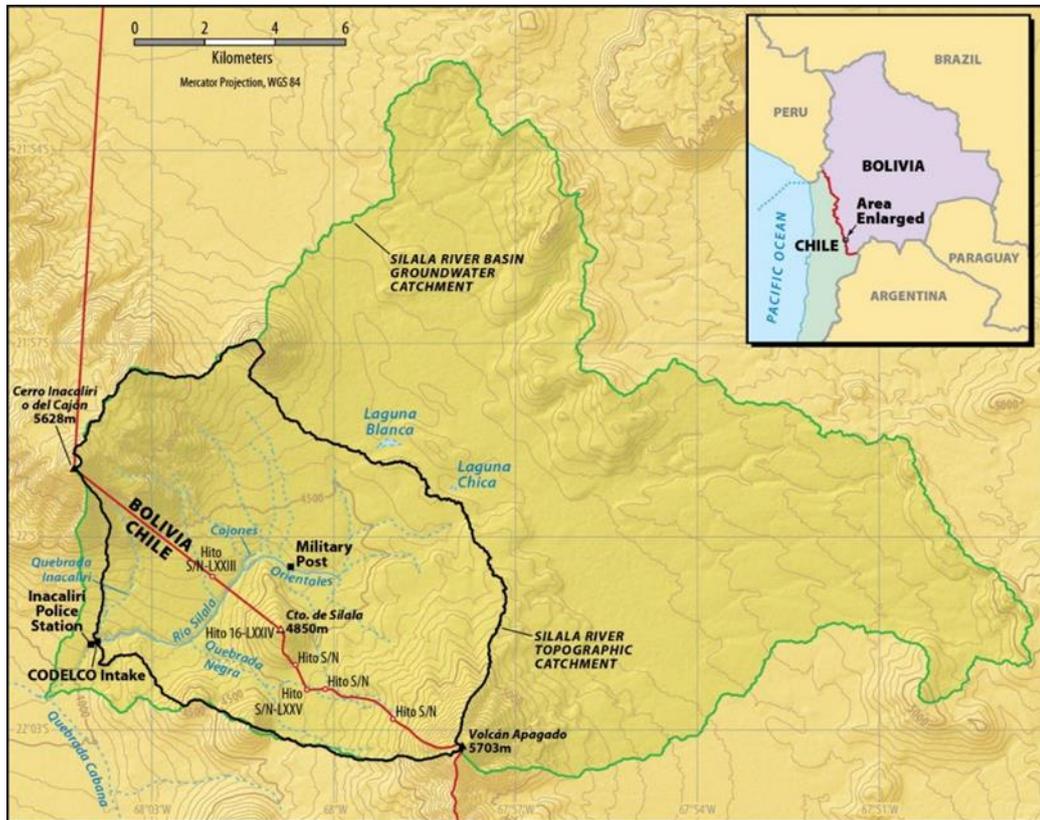


Figure 3
Bassin versant topographique du Silala et bassin versant souterrain
(Wheatler et Peach (2019a), figure 1, RC, vol. 1, p. 105).

⁵ Pour le dire simplement, en calculant la différence entre les précipitations et l'évaporation, on obtient le volume d'eau disponible pour les écoulements de surface et souterrain qui circulent dans le bassin et qui en sortent (y compris les éventuels prélèvements pour des utilisations publiques ou industrielles), sans tenir compte des variations saisonnières et interannuelles dans le stockage.

Légende :

Silala river basin groundwater catchment	=	Bassin versant souterrain du bassin hydrographique du Silala
Silala river topographic catchment	=	Bassin versant topographique du Silala
Inacaliri Police Station	=	Poste de police d’Inacaliri
CODELCO Intake	=	Prise d’eau de la CODELCO
Military post	=	Poste militaire
Enlarged area	=	Emplacement de la zone agrandie

Ainsi qu’il a été dit plus haut, l’une des principales demandes du Chili, exposée dans sa requête datée de juin 2016, était que la Cour reconnaisse que le Silala est un cours d’eau international. Nous avons conclu dans notre rapport Wheeler et Peach (2017) (MC, vol. 1, p. 135-137) que, de notre point de vue d’experts, le Silala était incontestablement un «système d’eaux de surface et d’eaux souterraines constituant, du fait de leurs relations physiques, un ensemble unitaire aboutissant à un point d’arrivée commun», et qu’il était «un cours d’eau dont les parties se trouvent dans des Etats différents» (ce qui est la définition de la convention de 1997 des Nations Unies sur le droit relatif aux utilisations des cours d’eau internationaux à des fins autres que la navigation). La direction naturelle de l’écoulement amène celui-ci à franchir la frontière internationale, de la Bolivie au Chili, et le critère du «point d’arrivée commun» est rempli par le fait que les eaux du Silala se jettent dans le San Pedro et enfin dans l’océan Pacifique après avoir alimenté le fleuve Loa.

8

Nous avons constaté que les experts du DHI, dans le contre-mémoire de la Bolivie, acceptent cette interprétation (Wheeler et Peach (2019a), RC, vol. 1, p. 103-106). Ils confirment que le Silala était «un système couplé d’eaux souterraines et d’eaux de surface ... s’étendant au-delà de la frontière» (CMB, vol. 2, p. 266). Ils signalent également l’existence de nombreuses sources supplémentaires en aval des zones humides Orientales qui contribuent à l’écoulement (CMB, vol. 2, p. 368-369), et notent que «les gradients des eaux souterraines et les propriétés hydrogéologiques indiquent clairement qu’il y a un écoulement souterrain de la Bolivie au Chili» (CMB, vol. 5, p. 84). Si l’ampleur de l’écoulement souterrain transfrontière reste incertaine, les experts du DHI estiment néanmoins que celui-ci «est au moins du même ordre de grandeur que l’écoulement de surface à la frontière» (CMB, vol. 5, p. 84).

2.3. Géologie et hydrogéologie

Afin de comprendre le fonctionnement d’un bassin versant principalement alimenté par des eaux souterraines, il est nécessaire de comprendre la géologie sous-jacente, qui détermine les caractéristiques hydrogéologiques telles que l’étendue et les propriétés des systèmes aquifères ainsi que leur interdépendance. Des experts du service chilien de géologie, le SERNAGEOMIN, en collaboration avec M. Peach, ont mené des études approfondies dont il a été rendu compte dans le mémoire (SERNAGEOMIN, 2017), la réplique (SERNAGEOMIN, 2019a) et la pièce additionnelle du Chili (SERNAGEOMIN, 2019b). En outre, plusieurs observations formulées par la Bolivie ont fait naître un doute quant à la nature et à la formation de la gorge dans laquelle le Silala s’écoule de la Bolivie au Chili (par exemple, MC, vol. 3, p. 375 ; CMB, vol. 5, p. 119). L’équipe d’experts chiliens a donc étudié la géomorphologie de la rivière (Mao, 2017 ; Latorre et Frugone, 2017).

La géologie actuelle est le fruit de plusieurs événements géologiques passés, résumés ci-dessous :

- i) Pendant la période remontant à entre 6 millions et 1,5 million d’années (Ma), la surface aujourd’hui occupée par le bassin versant du Silala a été le théâtre d’épisodes volcaniques associés à la collision entre la plaque tectonique océanique à l’ouest (sous l’océan Pacifique) et la plaque continentale sud-américaine. L’activité volcanique qui en a résulté a façonné le paysage, notamment la formation du Cerro Inacaliri, du Cerrito de Silala et du volcan

Apagado (MC, vol. 1, p. 199-200), qui sont tous des éléments dominants de la morphologie du bassin versant (figure 1).

- 9
- ii) Ces formations reposent majoritairement sur des dômes volcaniques et des laves datant d'il y a environ 6,6 à 5,8 Ma. Au-dessus de ces roches basales anciennes, observées sous la gorge du Silala, on trouve des dépôts appelés ignimbrites. Celles-ci ont été mises en place par des éruptions volcaniques explosives émettant des coulées de fragments de roche, de gouttelettes de roches fondues et de gaz chauds, qui ont emprunté la pente topographique actuelle à grande vitesse (MC, vol. 1, p. 199-200). La première de ces formations (ignimbrite Cabana, datant d'environ 4,12 Ma) est née d'un événement de très grande ampleur qui a touché une grande partie de l'Altiplano chilien et auquel a succédé une première période d'activité fluviale, qui a érodé une vallée dans l'ignimbrite et laissé des dépôts sédimentaires fluviaux (RC, vol. 3, p. 208-209). Au-dessus de ces premiers dépôts fluviaux, une seconde ignimbrite (ignimbrite Silala, datant d'environ 1,61 Ma) s'est déposée, remplissant probablement la vallée. L'activité volcanique ultérieure a donné naissance à une coulée de lave massive émise par le volcan Inacaliri (il y a 1,48 Ma), qui s'est épanchée dans la zone occupée par le cours supérieur du Silala. Cette coulée de lave a tronqué ce qui était alors le réseau de drainage du Silala (MC, vol. 1, p. 208-215 ; RC, vol. 1, p. 179-183 ; SERNAGEOMIN, 2017 ; SERNAGEOMIN, 2019a).
 - iii) L'activité volcanique dans le bassin versant semble s'être interrompue après 1,48 Ma, et les événements ultérieurs qui ont eu une incidence sur la morphologie du bassin versant sont associés à l'englaciation des sommets, au-dessus de 4400 mètres au-dessus du niveau de la mer. Il n'existe aucune marque d'érosion glaciaire ou de dépôts glaciaires au niveau ou au sein de la gorge actuelle du Silala. Le creusement de la gorge, telle qu'elle existe aujourd'hui, est le résultat de processus fluviaux. Il a commencé il y a 8400 à 12 000 ans et se poursuit à ce jour. La datation par radiocarbone a montré l'existence de sédiments qui ont été déposés dans la gorge par le système hydrographique actuel du Silala et qui sont vieux de plus de 8400 ans. La rivière a commencé à creuser la gorge avant cette période, probablement en conséquence de la fonte des glaciers qui, il y a environ 12 000 ans, a provoqué d'importants ruissellements et une augmentation du débit de la rivière, laquelle poursuit son œuvre selon un cycle d'érosion et de sédimentation répondant aux variations des régimes climatiques (MC, vol. 1, p. 218-223 ; Latorre et Frugone, 2017).

Il y a de nombreuses marques de l'érosion fluviale sur les parois de la gorge. On trouve quatre terrasses incisées par l'eau et quatre séquences de dépôts sédimentaires de plusieurs mètres d'épaisseur (MC, vol. 1, p. 218-223 ; Arcadis, 2017). Ces dépôts comprennent du sable, des graviers, des limons et des vestiges organiques des zones humides. Les versants de la gorge présentent quelques marques d'érosion éolienne et l'on trouve quelques dépôts sableux éoliens, mais ces éléments restent mineurs et ne sauraient avoir eu d'incidence notable sur la formation de la gorge (MC, vol. 1, p. 227-233 ; SERNAGEOMIN, 2017). Les études archéologiques ont permis de mettre au jour des artefacts et des abris ou des habitats temporaires le long du cours de la rivière, principalement sur les trois terrasses hautes (MC, vol. 1, p. 224-225 ; McRostie, 2017). Ces vestiges sont la preuve que l'homme utilise la rivière et son cours depuis au moins 1500 ans. Il ne fait aucun doute que les témoins géologiques, géomorphologiques et autres confirment clairement l'existence historique d'un système fluvial dans le bassin versant du Silala. La gorge moderne, créée par l'action fluviale, existe depuis plus de huit millénaires (MC, vol. 1, p. 218-225 ; Latorre et Frugone, 2017).

Ces processus et événements géologiques ont façonné le paysage du bassin versant et de la gorge du Silala tels que nous les connaissons aujourd'hui (voir le profil schématique de la gorge du Silala, montrant le Cerro Inacaliri et le volcan Apagado, RC, vol. 1, p. 190, figure 3-6). Nous avons constaté que le régime hydrologique reflète non seulement le climat et la météorologie, mais aussi la nature et la topographie de la surface terrestre et des roches se trouvant dans le sous-sol. La topographie actuelle (figure 1) et le profil de la rivière (figure 2) sont le résultat direct de l'interaction des processus atmosphériques, terrestres et biologiques et de leur variabilité au cours des six derniers

millions d'années. Les pentes naturelles de la topographie et du lit de la rivière sont telles que celle-ci ne peut que s'écouler naturellement de la Bolivie au Chili. De même, les gradients hydrauliques actuels des eaux souterraines traduisent un écoulement naturel de la Bolivie au Chili (MC, vol. 1, p. 167, figure 20), comme les experts du DHI en conviennent (CMB, vol. 2, p. 266).

Nous relevons également que, d'après des études de la géomorphologie fluviale (Mao, 2017), le réseau fluvial actuel demeure actif sur le plan géomorphologique ; nous avons observé le transport différencié de particules fines et grossières, caractérisé par un phénomène de tri granulométrique et de pavage⁶, et la morphologie actuelle du lit en marche d'escalier est conforme à celle requise pour transporter le flux d'eau actuel et les charges sédimentaires. La rivière abrite également des populations florissantes de poissons et d'invertébrés, indicateur de la santé de l'écosystème aquatique (Mao, 2017).

Il ressort clairement de nos investigations, dont les conclusions ont été exposées dans le mémoire et la réplique du Chili, que l'hydrogéologie du bassin versant souterrain est extrêmement complexe ; nous avons cependant pu déterminer qu'il existait trois systèmes aquifères distincts qui sont actifs au Chili (Arcadis, 2017) :

- i) un aquifère fluvial situé sous le lit du Silala et dans la gorge (MC, vol. 1, p. 166-169). Il se compose de sédiments déposés par la rivière et les zones humides riveraines connexes. Il fournit des apports mineurs aux écoulements souterrains, mais présente un niveau piézométrique particulier différent de l'aquifère perché et de l'aquifère régional décrits ci-dessous aux points ii) et iii).
- ii) un système aquifère perché, qui est situé dans les dépôts alluviaux reposant sur les formations volcaniques de socle que l'on trouve dans le bassin hydrographique du Silala, comme l'ont montré les investigations géophysiques, qui se vidange par des sources dans le Silala, en particulier à partir du versant nord de la gorge du Silala (MC, vol. 1, p. 168-169), et dont l'eau a une nature nettement différente de celle des eaux souterraines plus profondes, comme l'ont confirmé les analyses hydrochimiques (Herrera et Aravena, 2017 ; Herrera and Aravena 2019).
- iii) un système aquifère régional formé par une succession de dépôts ignimbritiques à perméabilité variable interstratifiés dans des sédiments fluviaux (offrant une forte perméabilité). Les eaux souterraines de cet aquifère présentent une signature hydrochimique différente de celles de l'aquifère perché (MC, vol. 1, p. 171-172). Cet aquifère se recharge dans le bassin versant souterrain plus vaste (Arcadis, 2017 ; CMB, vol. 2, p. 275, figure 5) (voir ci-dessus, figure 3).

Il est également clair que les eaux de recharge de ces aquifères dans le bassin versant souterrain, qui se trouve principalement en Bolivie, soit émergent dans les sources des zones humides boliviennes ou dans les sources chiliennes en aval de la frontière internationale, soit s'écoulent dans l'aquifère ignimbritique régional en descendant la pente jusqu'au Chili en direction du sud-ouest. La variabilité verticale de la perméabilité dans les ignimbrites est mise en évidence par le puits artésien jaillissant SPW-DQN, et suppose l'existence d'une couche encaissante à faible perméabilité (RC, vol. 1, p. 216).

Les eaux des sources des zones humides Cajones et Orientales présentent des différences marquées pour ce qui est de l'hydrochimie et de la teneur isotopique du carbone, ce qui indique que leurs eaux souterraines ont des origines distinctes. Celles de la zone humide Cajones proviennent probablement d'une recharge plus localisée et ont des similitudes avec les eaux souterraines provenant des sources de l'aquifère perché qui émergent de la paroi de la gorge au Chili. En revanche,

⁶ Les rivières à lit de graviers présentent une couche «dure» de grains anguleux à la surface, qui protège de l'érosion les particules plus fines situées en dessous.

les eaux souterraines des sources de la zone humide Orientales présentent de fortes similitudes avec les écoulements souterrains profonds tels que ceux qui rejoignent le Silala par le forage artésien SPW-DQN (RC, vol. 1, p. 201-213 ; Herrera et Aravena, 2017 ; Herrera et Aravena, 2019).

La cartographie géologique établie par le SERNAGEOMIN, au Chili, n'a mis au jour aucune preuve de l'existence de la «faille de Silala» que la Bolivie situe dans la gorge du Silala (CMB, vol. 4, p. 69-81, et p. 75, figure 27); cependant, plusieurs failles situées en aval au Chili indiquent que l'aquifère régional se trouve uniquement en profondeur, sous les laves à faible perméabilité du Pliocène (PAC, vol. 2, p. 214-217). Il est donc probable que l'écoulement souterrain plus en aval soit limité.

2.4. La chenalisation historique du Silala en Bolivie

Même si, comme indiqué plus haut et dans la troisième partie ci-dessous, les experts de la Bolivie et nous-mêmes convenons que le Silala présente les caractéristiques d'un cours d'eau international et sommes globalement d'accord sur la nature et le fonctionnement du bassin versant hydrologique, y compris en ce qui concerne les écoulements transfrontières en surface et en sous-sol, nous demeurons néanmoins en désaccord sur certains points scientifiques. Outre l'interprétation de la géologie et de l'hydrogéologie, dont il a été question plus haut, nous avons des avis divergents sur les effets de la chenalisation historique du réseau hydrographique en Bolivie, entreprise pour des raisons sanitaires dans le cadre de l'approvisionnement en eau (MC, vol. 1, p. 98).

Dans le contexte l'essor social et économique d'une région extrêmement aride, le Silala a en tout temps été une importante source d'eau régionale pour le Chili. En 1906, celui-ci a accordé une concession à la compagnie britannique Antofagasta (Chile) and Bolivia Railway Company Ltd. (ci-après la «FCAB») pour approvisionner en eau potable la ville portuaire d'Antofagasta (MC, vol. 1, p. 40). Deux ans plus tard, en 1908, la FCAB a obtenu de la Bolivie le droit d'utiliser l'eau du Silala. Nous comprenons que des travaux d'ingénierie ont été entrepris entre 1909 et 1910 pour dériver l'écoulement du Silala par une conduite située en Bolivie. La concession est restée en vigueur jusqu'à ce que la Bolivie y mette fin en 1997 (MC, vol. 1, p. 42). Un deuxième ouvrage de prise d'eau et une deuxième conduite ont été construits par la FCAB en 1942 en territoire chilien. Ces points d'adduction se trouvaient juste en aval et en amont de la frontière internationale, comme il est illustré sur la figure 4. Celle-ci montre également l'emplacement d'un autre point d'adduction, situé à une certaine distance en aval des conduites et prises d'eau de la FCAB, qui a été mis en place en 1956 par la compagnie minière publique chilienne CODELCO pour approvisionner en eau domestique l'une de ses mines de cuivre. Notre rapport Wheeler et Peach (2017) contient de plus amples informations sur le sujet (MC, vol. 1, p. 145-147).

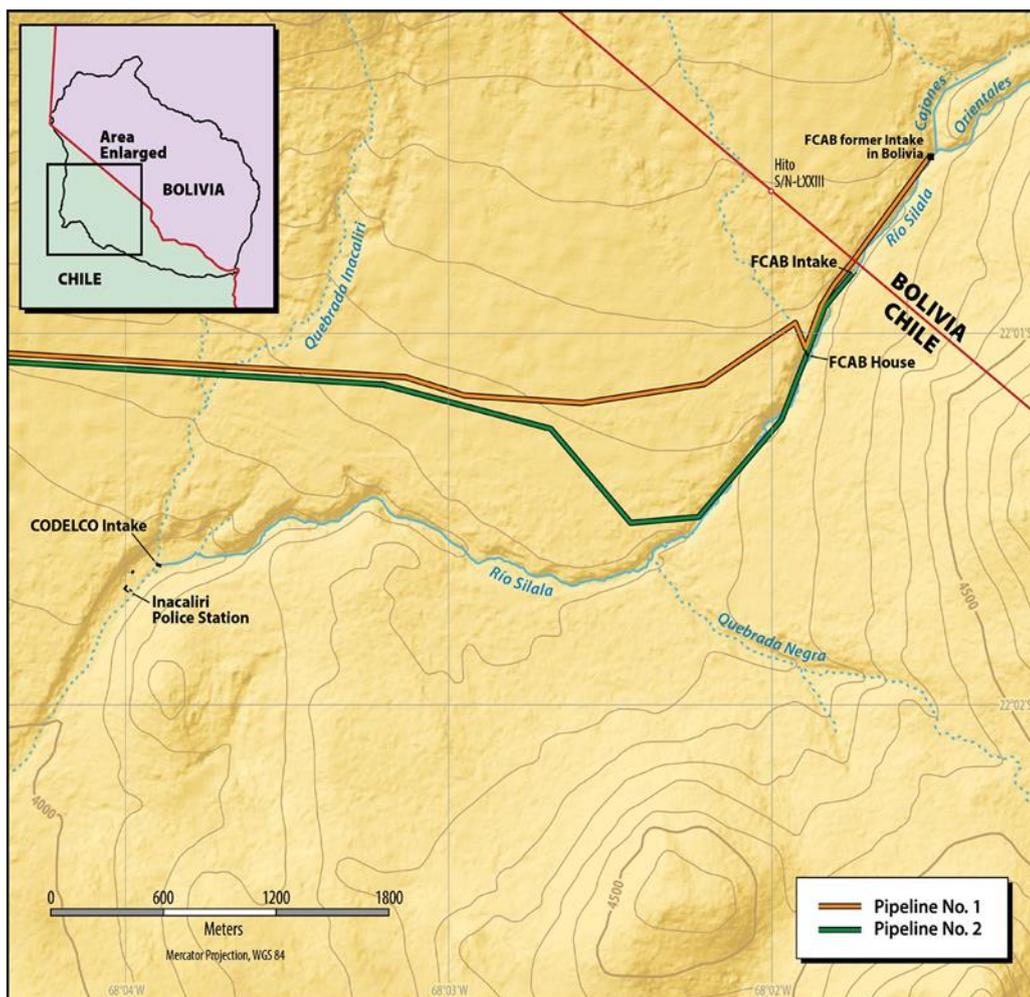


Figure 4

Ancienne prise d'eau de la FCAB en Bolivie, prise d'eau de la FCAB au Chili et conduites construites et utilisées par la FCAB. L'ancienne prise d'eau en Bolivie et la conduite n° 1 (ligne orange) acheminaient l'eau du territoire bolivien aux réservoirs de la FCAB situés à la gare de San Pedro (et jusqu'à Antofagasta). La prise d'eau et la conduite n° 2 (ligne verte) acheminaient l'eau du territoire chilien, également vers les réservoirs de San Pedro (Muñoz *et al.*, 2017 ; Wheeler et Peach (2017), figure 6, MC, vol. 1, p. 146).

Légende :

FCAB Intake	=	Prise d'eau de la FCAB
Inacaliri Police Station	=	Poste de police d'Inacaliri
CODELCO Intake	=	Prise d'eau de la CODELCO
FCAB former Intake in Bolivia	=	Ancien ouvrage de prise d'eau de la FCAB en Bolivie
FCAB House	=	Bâtiment de la FCAB
Pipeline No. 1	=	Conduite n° 1
Enlarged area	=	Zone agrandie

13

En 1928, la FCAB a construit un réseau de petits chenaux (0,6 m de large x 0,6 m de profondeur) dans les zones humides boliviennes Orientales et Cajones, et a effectué certains travaux de chenalisation de la rivière principale en Bolivie (MC, vol. 1, p. 42). Ces chenaux, construits en terre et revêtus de pierres, devaient faire office de drains, permettant l'infiltration de l'eau des zones humides et la perte d'eau au profit des sols adjacents. L'objectif était d'éviter que les eaux ne soient contaminées par les œufs de mouches vertes se reproduisant dans la végétation présente sur le parcours de la rivière (MC, vol. 1, p. 98). L'historique de l'entretien de ces chenaux reste flou, même

si les experts du DHI signalent (CMB, vol. 2, p. 281-282) que ces dernières années, dans certaines parties de la zone humide sud (Orientales), le canal et les ouvrages de drainage ont été retirés, remblayés ou bouchés, en vue de restaurer partiellement la zone humide.

Les experts de la Bolivie sont d'accord avec nous sur le fait que la chenalisation en territoire bolivien n'a pas eu d'influence sur la direction de l'écoulement, qui épouse les pentes topographiques naturelles (CMB, vol. 2, p. 267). L'écoulement transfrontière dans la gorge telle qu'elle se présente aujourd'hui dure depuis au moins 8400 ans et est très antérieur aux concessions accordées à la FCAB et à la construction ultérieure d'un réseau de petits chenaux. Cependant, on peut raisonnablement s'attendre à ce que la chenalisation ait eu un effet limité sur la production d'écoulements de surface dans les zones humides boliviennes, ce qui a pu avoir une incidence sur la superficie et la santé de la végétation hygrophile et sur la transmission en aval des écoulements de surface dans les sections chenalisées de la rivière. Il convient de noter toutefois que tout effet sur l'écoulement de surface, hors augmentation ou diminution de l'évaporation, sera compensé par un effet inverse sur les écoulements souterrains qui suivent la pente descendante jusqu'au Chili. Autrement dit, que ce soit sous forme d'écoulement de surface ou d'écoulement souterrain, toutes les eaux du Silala coulent inévitablement de la Bolivie au Chili en suivant la pente. Aucune augmentation de l'écoulement de surface, qu'elle soit faible (selon nous) ou forte (selon les experts du DHI), ne pourrait entraîner un accroissement notable du volume d'eau global qui pénètre en territoire chilien.

Le principal effet hydrologique qu'ont les chenaux de drainage est d'abaisser le niveau de la nappe libre située juste en dessous. L'eau souterraine, au lieu d'émerger à la surface de la zone humide, s'écoulera dans le drain. Ainsi, à l'emplacement du drain, le niveau de la nappe libre baissera jusqu'à arriver juste au-dessus de la base des chenaux de drainage (0,6 m), au lieu d'atteindre la surface du sol. Bien entendu, plus la nappe sera éloignée latéralement du chenal, plus son niveau augmentera⁷. La quantité d'eau s'évaporant d'une surface d'eau libre sera généralement plus élevée que celle émise par la transpiration végétale. Or, dans les zones humides, la nappe libre étant relativement proche de la surface, même à une profondeur de 0,6 m, les taux d'évapotranspiration devraient être proches de ceux d'une surface d'eau libre ; toute différence dans l'évaporation sera donc faible.

14

D'après nos calculs préliminaires (Wheater et Peach (2017), MC, vol. 1, p. 161-164) et même en partant des hypothèses les plus prudentes, l'évaporation dans les zones humides représente une faible fraction du bilan hydrique du Silala⁸. A l'aide de données de télédétection, nous avons estimé qu'elle équivalait à 0,7 % (1,3 l/s) de l'écoulement à la frontière, mais, conscients de l'incertitude entourant cette estimation, nous avons proposé une valeur haute établie à 2 % (3,4 l/s). De toute évidence, même si l'évaporation avait diminué du fait de la chenalisation (rappelons que nous avons démontré par la suite que tel n'était pas le cas), des variations mineures sur ce terme secondaire du bilan hydrique du bassin versant n'auraient pas eu d'effet notable sur les écoulements à la frontière. De plus, à notre connaissance, jusqu'à une date très récente, les chenaux n'avaient pas été entretenus depuis 1997 (MC, vol. 1, p. 42), et rien n'atteste une modification du régime d'écoulement à la frontière. En fait, les données satellites montrent que l'étendue des zones humides est essentiellement fonction de la forte variabilité saisonnière et interannuelle naturelle (PAC, vol. 1, p. 137-140).

Dans le contre-mémoire de la Bolivie, les experts du DHI ont mis en avant d'autres effets possibles de la chenalisation. Ils partagent notre avis que des variations dans l'évaporation étaient à prévoir en raison du drainage des zones humides, mais estiment (CBM, vol. 2, p. 276) que la présence des chenaux augmente le débit des eaux de surface «en raison de la diminution de la perte de charge hydraulique provoquée par l'élimination de la tourbe ou de la couverture rocheuse encaissante». Ils indiquent que, aux points d'émergence des sources, «la terre et les éventuelles couches sous-jacentes

⁷ Les données pédologiques de la Bolivie montrent que les niveaux piézométriques oscillent entre 0,1 et 0,4 m de profondeur dans la zone humide nord et entre 0,15 et 0,45 m dans la zone humide sud (CMB, vol. 3, p. 12-13).

⁸ Bien que les taux d'évaporation dans les zones humides soient élevés, ils ne se rapportent qu'à des surfaces relativement petites.

de matériaux ou roches plus grossiers ont été intégralement enlevées» (CMB, vol. 2, p. 276). Ces effets ont été conceptualisés aux fins de la modélisation de deux scénarios : le premier avec retrait des chenaux (le scénario «sans canal») et le second (le scénario «avec zones humides restaurées») simulant une accumulation durable de la tourbe. Les experts de la Bolivie ont également avancé que la chenalisation influençait les interactions entre les écoulements de surface et les écoulements souterrains, réduisant les pertes par infiltration au profit de l'eau souterraine sous-jacente.

Nous avons admis (Wheater et Peach (2019a), RC, vol. 1, p.106-109) que l'abaissement du niveau de la nappe libre due au drainage augmentait le gradient de l'écoulement souterrain alimentant le cours d'eau, et donc l'apport en eaux souterraines, et qu'une accumulation de la tourbe, dont la conductivité hydraulique est relativement faible, pouvait à long terme produire une résistance supplémentaire à l'écoulement souterrain en raison de ce couvert tourbeux, ce qui réduirait l'écoulement de surface. Nous avons également convenu que les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines pouvaient avoir changé. Toutefois, comme nous l'avons indiqué dans notre rapport Wheeler et Peach (2019a), nous estimons que toute modification dans l'écoulement de surface résultant de ces effets est mineure. Nous reviendrons sur ces points à la section 4.

15

3. PRINCIPAUX POINTS D'ACCORD

Les experts de la Bolivie et nous-mêmes sommes d'accord sur plusieurs points essentiels concernant la nature et le fonctionnement du Silala, notamment sur ce qui suit :

- i) Le Silala s'écoule naturellement de la Bolivie au Chili. Il émerge de deux ensembles de sources boliviennes, qui alimentent les zones humides Cajones et Orientales (CMB, vol. 2, p. 266 ; MC, vol. 1, p. 177).
- ii) La rivière est essentiellement alimentée par des apports souterrains et interagit avec les eaux souterraines présentes le long de son parcours jusqu'à la frontière et au-delà (CMB, vol. 2, p. 368-369 ; MC, vol. 1, p. 177).
- iii) En outre, d'importants flux souterrains, dont l'ampleur est probablement équivalente à celle des flux de surface, s'écoulent de la Bolivie au Chili (CMB, vol. 2, p. 266 ; RC, vol. 1, p. 104).
- iv) En résumé, le Silala est un système couplé d'eaux souterraines et d'eaux de surface qui s'étend au-delà de la frontière (CMB, vol. 2, p. 266 ; MC, vol. 1, p. 177) ; il semble donc admis qu'il s'agit d'un cours d'eau international.
- v) La construction des chenaux dans les années 1920 en territoire bolivien n'a pas eu d'influence sur la direction de l'écoulement, qui suit les pentes topographiques naturelles (CMB, vol. 2, p. 267 ; MC, vol. 1, p. 178).
- vi) Cette chenalisation a sans doute eu un certain effet sur l'écoulement de surface du Silala. On peut s'attendre à ce qu'elle en ait augmenté le débit (CMB, vol. 2, p. 266 ; MC, vol. 1, p. 178). (Comme nous le verrons plus en détail à la section 4, cet effet est à notre avis très limité).
- vii) Les chenaux de drainage ont pu avoir une certaine incidence sur l'évaporation dans les zones humides, mais cette incidence serait de faible ampleur (CMB, vol. 2, p. 303 ; MC, vol. 1, p. 178). (Comme nous le verrons plus en détail à la section 4, elle est à notre avis très faible.)
- viii) Hormis les effets de la chenalisation sur l'évaporation, toute augmentation de l'écoulement de surface de la rivière s'accompagnera d'une diminution des écoulements souterrains traversant la frontière, et inversement (DB, vol. 5, p. 30 ; RC, vol. 1, p. 108).

4. PRINCIPAUX POINTS DE DÉSACCORD

4.1. Introduction

Il existe un point majeur sur lequel les experts du DHI et nous-mêmes sommes en désaccord, et qui est au cœur de la thèse défendue par la Bolivie devant la Cour : l'ampleur des incidences de la chenalisation sur les écoulements de surface.

16

Nous avons indiqué (Wheater et Peach (2017), MC, vol. 1, p. 134) que la chenalisation en Bolivie pouvait avoir eu pour effet de réduire l'évaporation, et donc d'augmenter les écoulements de surface traversant la frontière, mais nous avons calculé que cet effet serait très limité. Les experts du DHI ont convenu qu'il n'était que probable, et faible⁹.

Nous sommes d'accord (Wheater et Peach (2019a), RC, vol. 1, p. 106-109) sur le fait que le drainage augmente le gradient de l'écoulement souterrain alimentant le cours d'eau, et donc l'apport en eaux souterraines, et qu'une accumulation de la tourbe, dont la conductivité hydraulique est relativement faible, peut à long terme produire une résistance supplémentaire à l'écoulement souterrain, ce qui réduirait l'écoulement de surface. Nous avons également convenu que les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines pouvaient avoir changé. Toutefois, comme nous l'avons indiqué dans Wheeler et Peach (2019a), nous estimons que toute modification dans l'écoulement de surface résultant de ces effets est mineure.

Les experts du DHI sont parvenus à la conclusion surprenante que la chenalisation avait eu globalement des effets importants sur l'écoulement de surface. Ils ont indiqué, dans le contre-mémoire de la Bolivie (CMB, vol. 2, p. 266-267) que, «[e]n l'absence de canaux, ... [l]a réduction de l'écoulement de surface par rapport aux conditions actuelles serait de 30 à 40 %»¹⁰. Après que nous avons critiqué leur modélisation dans notre rapport Wheeler et Peach (2019a), les experts du DHI ont revu leurs estimations dans la duplique de la Bolivie, mais ont continué de parler d'effets très importants : «la simulation a abouti à une réduction de 11 à 33 % du débit des eaux de surface transfrontière en cas de suppression des canaux» (DB, vol. 5, p. 56)¹¹. Nous avons constamment dit que ces estimations étaient tout à fait improbables et que, compte tenu de la réduction relativement faible des niveaux des nappes due à la chenalisation des zones humides et de la rivière principale, tout effet serait très limité.

Plus important, les experts du DHI et nous-mêmes sommes d'accord sur le fait que toute augmentation de l'écoulement de surface par suite de la chenalisation s'accompagnerait d'une diminution de l'écoulement souterrain de la Bolivie au Chili, et inversement (RC, vol. 1, p. 107-108). Dans ses pièces ultérieures, la Bolivie a convenu que «sans canal, il y a moins d'eau qui pénètre dans le système hydrique de surface et plus dans le système souterrain» (DB, vol. 5, p. 30). La recharge du système d'eaux souterraines se fait dans l'ensemble du bassin versant plus vaste représenté à la figure 3 et n'est pas influencée par des variations dans les écoulements de surface ou souterrains en aval. Etant donné que les eaux souterraines s'écoulent de la Bolivie au Chili, toute différence dans les écoulements combinés d'eaux de surface et d'eaux souterraines qui vont d'un pays à l'autre sera

⁹ Notre estimation initiale, dans le meilleur des cas, était une augmentation d'un maximum de 1,3 l/s de l'écoulement de surface (MC, vol. 1, p. 161), avec une estimation haute de 3,4 l/s (MC, vol. 1, p. 164). Les experts du DHI ont estimé que cet effet équivalait à 2 à 3 l/s de l'écoulement (CMB, vol. 2, p. 303).

¹⁰ 30 % correspond à l'effet selon le scénario sans canaux, et 40 % à celui selon le scénario sans canaux avec une croissance présumée de la tourbe.

¹¹ 33 % et 11 % sont les estimations hautes et basses des experts du DHI pour le scénario sans canaux uniquement, avec absence de croissance présumée de la tourbe.

principalement due à la différence dans les pertes par évaporation dans les zones humides¹², dont les deux Parties ont reconnu qu'elle est faible, comme nous l'avons vu plus haut.

17

Les estimations de la Bolivie reposent sur des simulations exécutées par les experts du DHI à l'aide d'une série de modèles largement utilisés et réputés. Nous nous sommes donc demandé comment ces modèles avaient pu aboutir à des résultats aussi peu réalistes. Dans notre rapport Wheeler et Peach (2019a), sur la base des informations limitées fournies dans le contre-mémoire de la Bolivie, nous avons signalé des erreurs dans la modélisation, dont certaines étaient liées à des questions techniques, en particulier la taille réduite de l'échelle utilisée dans les simulations et les conditions aux limites du modèle, et d'autres à la géologie sous-jacente sur laquelle le modèle s'appuie. Par la suite, ayant reçu les données numériques utilisées par les experts du DHI pour exécuter leurs modèles, nous avons relevé de multiples erreurs et hypothèses inexplicables.

Dans les sections qui suivent, nous commencerons par présenter les modèles des experts du DHI, puis nous expliquerons pourquoi les simulations sont incorrectes. Nous résumerons les très graves erreurs découvertes dans la modélisation, notamment celles liées à la géologie, et nous répondrons au sujet des constats erronés que fait la Bolivie en ce qui concerne le recul et la dégradation des zones humides. Nous commenterons également brièvement la thèse infondée de la Bolivie relative à l'utilisation d'explosifs pour accroître le débit des sources boliviennes.

4.2. Bilan hydrique et modèles en champ proche du DHI

Les experts de la Bolivie ont établi une série de modèles pour simuler le système hydrographique du Silala (PAC, vol. 1, p. 89-91) (figure 5). Un modèle de bilan hydrique, basé sur le logiciel de modélisation hydrologique MIKE-SHE, a été utilisé pour simuler le bilan hydrique du bassin versant topographique et d'un bassin versant souterrain plus vaste, dont la superficie a été évaluée à 234,2 km². Cependant, les résultats de la modélisation qui ont servi à estimer les effets de la chenalisation et de la croissance de la tourbe étaient fondés sur la simulation d'une très petite zone (2,56 km²) située autour de la rivière et des sources des zones humides en Bolivie, appelée par le DHI le «champ proche». Ce modèle en champ proche a été exécuté au moyen d'une combinaison de deux modèles : i) le modèle hydrologique MIKE-SHE a été utilisé seul pour les deux scénarios sans canaux («sans canal» et «zones humides restaurées», comme il a été vu plus haut), et ii) le modèle hydrologique MIKE-SHE a été couplé au modèle hydraulique MIKE-11 pour le scénario simulant la chenalisation (le scénario de «référence»), qui représentait en détail l'écoulement dans les chenaux de la rivière (CMB, vol. 5, p. 11).

¹² Il pourrait y avoir d'autres changements dans l'évaporation en raison de la chenalisation du canal principal de la rivière ainsi que dans les interactions connexes entre les eaux de surface et les eaux souterraines, mais ceux-ci seraient mineurs.

18

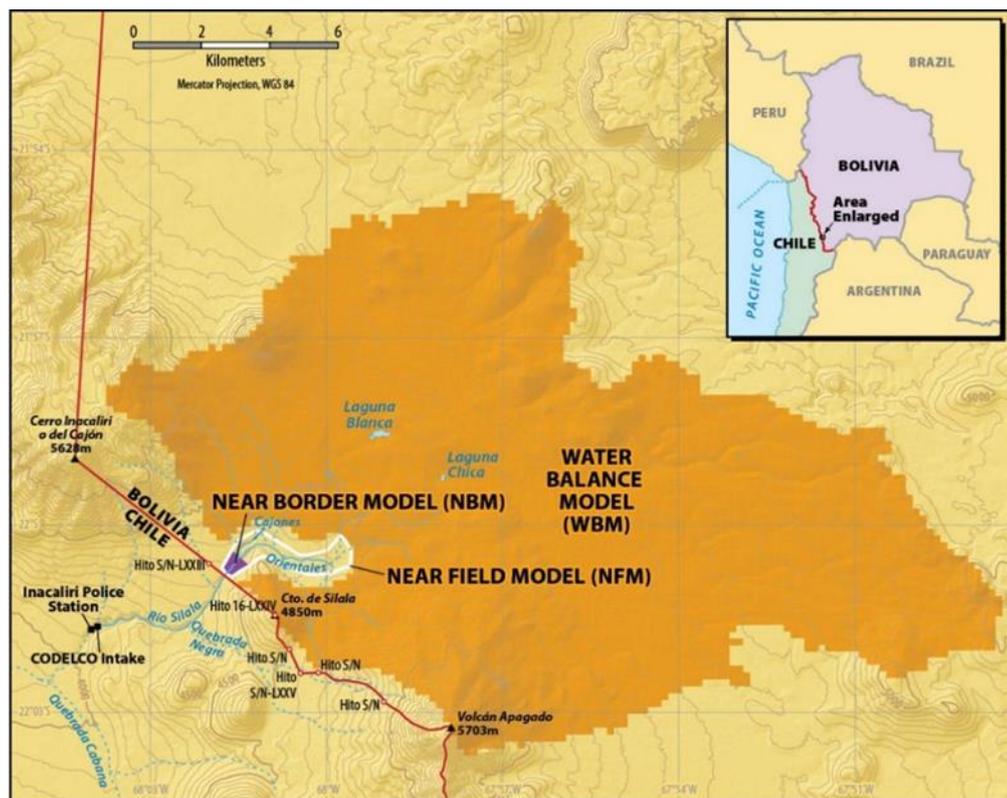


Figure 5
Domaines couverts par les trois modèles distincts du DHI
 (Muñoz *et al.*, 2019 ; Wheater et Peach (2019a),
 figure 2, PAC, vol. 1, p. 91).

Légende :

- | | | |
|---------------------------|---|---------------------------------|
| Water Balance Model (WBM) | = | Modèle de bilan hydrique (MBH) |
| Near Border Model | = | Modèle de la zone frontalière |
| Near Field Model | = | Modèle en champ proche |
| Inacaliri Police Station | = | Poste de police d’Inacaliri |
| CODELCO Intake | = | Prise d’eau de la CODELCO |
| Area enlarged | = | Emplacement de la zone agrandie |

Il importe de relever que les résultats du modèle de bilan hydrique (CMB, vol. 3, annexe E), qui calcule la recharge à partir des variables des apports naturels issus de précipitations moins l'évaporation, n'ont pas été utilisés dans le modèle en champ proche (CMB, vol. 5, annexes G et H). Les experts du DHI ont plutôt formulé des hypothèses au sujet des niveaux piézométriques ou des écoulements aux limites du modèle en champ proche (appelées les conditions limites du modèle), comme nous le verrons ci-après. Nous faisons observer que la recharge calculée à l'aide du flux entrant dans le modèle en champ proche diverge des résultats obtenus par le modèle de bilan hydrique et que les divers scénarios modélisés en champ proche présentent des valeurs différentes pour la recharge (voir *infra*, section 4.3.1), ce qui n'est évidemment pas possible. En réalité, l'ensemble de la recharge des aquifères ignimbritiques dans le bassin versant souterrain plus vaste s'écoule dans la zone en champ proche¹³. Les précipitations et le bassin versant souterrain sont pour l'essentiel identiques dans chaque scénario, et toute modification dans l'évaporation est faible, comme l'ont reconnu les experts du DHI.

¹³ En raison de l'interprétation incorrecte que fait le DHI de la géologie (voir RC, vol. 1, p. 179-201, en particulier figures 3-6 et 3-7), les écoulements souterrains contournent le champ proche, ce qui donne au DHI une justification erronée pour les variations dans les apports entrants (DB, vol. 5, p. 28-30).

4.3. Principaux points de désaccord

4.3.1. Conditions limites du modèle en champ proche

Le fait d'avoir choisi de modéliser une si petite partie du bassin versant du système hydrologique en tant que champ proche signifie que les écoulements modélisés seront principalement déterminés par les conditions limites postulées pour le modèle : or, celles utilisées par le DHI sont inappropriées. En particulier, les conditions des nappes libres à la limite amont du modèle sont fixes, alors qu'en réalité, elles ne le sont absolument pas. Les variations dues au retrait des chenaux et à la croissance hypothétique du couvert tourbeux à long terme, qui, selon le DHI, auraient eu des effets importants sur l'émission d'eaux souterraines dans le cours d'eau, influent également sur les conditions à la limite du modèle, compte tenu de la proximité de la rivière.

Une des conséquences évidentes des conditions limites inappropriées est que les apports entrant dans le modèle changent considérablement selon les différents scénarios étudiés par le DHI ; or, si les apports au modèle changent, il en va évidemment de même pour les flux sortants. L'apport au modèle en champ proche était de 253 l/s pour le scénario de référence (avec chenalisation), mais de 216 l/s pour le scénario avec zones humides restaurées qui simule le retrait des chenaux et une croissance présumée de la tourbe (CMB, vol. 5, p. 67, tableau 1). Une différence dans les écoulements d'eaux de surface et d'eaux souterraines combinés de 49 l/s a été observée dans les divers scénarios, dont 37 l/s sont dus uniquement aux changements inadéquats des apports aux limites. Comme il a été dit plus haut, en réalité, la recharge du bassin versant souterrain restera pour l'essentiel identique dans les trois scénarios et elle ne pourra que s'écouler jusqu'au Chili, que ce soit sous forme d'eaux de surface ou d'eaux souterraines.

Dans notre rapport Wheeler et Peach (2019a) (RC, vol. 1, p. 114-125), nous avons démontré, à l'aide de calculs simples, que l'hypothèse erronée aux limites amplifiait les effets de la remontée de nappe et de la présence de tourbe et qu'elle semblait expliquer les estimations outrancières du DHI. Selon nous, sachant que les très grandes différences dans le niveau des nappes déterminent l'écoulement souterrain (150 mètres, d'après la modélisation du DHI (CMB, vol. 3, p. 488, figure 11)), une baisse de moins de 0,6 mètre du niveau des nappes libres et une croissance durable du couvert tourbeux (allant jusqu'à 0,6 mètre selon le DHI (CMB, vol. 5, p. 70)) auront des effets mineurs, représentant quelques centièmes tout au plus de l'écoulement de surface transfrontière. Nous avons estimé que ces effets combinés induisaient une variation de l'ordre de 1,2 % de l'écoulement (RC, vol. 1, p. 124). Bien que cette analyse se fonde sur une forte simplification de la réalité (un segment de versant en deux dimensions), elle renseigne toutefois sur l'ampleur éventuelle des effets.

Il importe en outre de noter, comme indiqué plus haut, que toute augmentation de l'écoulement de surface s'accompagnera d'une diminution correspondante de l'écoulement souterrain, le premier s'écoulant le long de la pente topographique, et le second suivant le gradient hydraulique souterrain jusqu'au Chili.

Dans leur rapport (DHI, 2019) joint à la duplique de la Bolivie (15 mai 2019), les experts du DHI ont accepté notre critique au sujet des conditions limites du modèle utilisées pour simuler les effets de la chenalisation et ont reconnu que leurs calculs avaient conduit à une surestimation des effets (DB, vol. 5, p. 55).

Les experts du DHI ont présenté des résultats révisés et décrit ceux produits antérieurement comme étant une limite haute. Une autre approche a été retenue à la condition limite en champ proche pour définir une limite basse, et une nouvelle fourchette de résultats a été donc obtenue pour quantifier les effets de la chenalisation. Le DHI indiqué ainsi que,

«si les chenaux et les systèmes de drainage étaient retirés, l'écoulement des eaux de surface du Silala qui franchit la frontière diminuerait de 11 à 33 % par rapport aux

conditions actuelles. [L]’évapotranspiration dans les zones humides sans les canaux augmenterait de 28 à 34 % par rapport aux valeurs de référence, soit entre 2,8 et 3,4 l/s, alors que l’écoulement souterrain du Silala qui traverse la frontière ... augmenterait de 4 à 10 % par rapport aux conditions actuelles» (DB, vol. 1, p. 35).

Cependant, nous sommes d’avis que la limite basse (une diminution de 11 % de l’écoulement de surface) constitue encore une surestimation invraisemblable des effets de la chenalisation. Nous réaffirmons que la recharge dans le bassin versant souterrain est restée la même et que les pertes au profit des écoulements transfrontières sont uniquement la conséquence de l’évaporation accrue ; les nouveaux résultats du DHI ne tiennent donc pas. Par conséquent, il semblerait que la modélisation du DHI renferme d’autres erreurs.

Nous avons signalé un autre point inquiétant concernant les conditions limites dans notre rapport Wheeler et Peach (2019a) (RC, vol. 1, p. 125). Les observations de terrain consignées par le DHI (CMB, vol. 5, p. 49, figure 35) sont incompatibles avec les conditions limites latérales postulées dans le modèle en champ proche. Cela rejoint d’autres préoccupations quant à l’exactitude de la géologie utilisée par les experts du DHI pour définir leur modèle en champ proche, que nous verrons ci-après à la section 4.3.3.

4.3.2. Incohérences, inexactitudes et instabilités du modèle

Dans notre rapport Wheeler et Peach (2019a), nous avons signalé diverses incohérences dans les résultats présentés par le DHI dans le contre-mémoire (RC, vol. 1, p. 126-127). Cependant, les données numériques fournies par la Bolivie en février 2019 (après une demande répétée) nous ont permis de procéder à une évaluation plus approfondie de la modélisation du DHI. L’analyse des configurations, des paramètres, des données d’entrée et des résultats de simulation des modèles a révélé que de nombreux aspects de la modélisation mettaient sérieusement en doute la fiabilité des résultats, en particulier en ce qui concerne la modélisation de la zone de 2,56 km² du champ proche sur laquelle la Bolivie fonde ses estimations des effets de la chenalisation.

L’examen des données numériques par des hydrologues chiliens (Muñoz *et al.*, 2019) a permis de mettre au jour de nombreuses différences non signalées entre les modèles utilisés par le DHI pour comparer les scénarios et entre les conditions limites des modèles MIKE-SHE et les conditions initiales. Outre que ces différences n’ont pas été signalées, la méthodologie utilisée n’a pas été expliquée et des hypothèses incorrectes ont été émises. Nous en mentionnons quelques-unes ci-après ; pour une explication plus complète, voir Muñoz *et al.* (2019) et Wheeler et Peach (2019b) (PAC, vol. 1, p. 100-118).

21

- i) Plus important encore est sans doute le fait que, comme nous l’avons découvert, des topographies distinctes avaient été utilisées dans les différents scénarios, y compris pour un même scénario — celui de référence — employé pour modéliser les processus liés au bassin versant (le modèle MIKE SHE) et l’écoulement en chenal (le modèle MIKE 11). Ces différences topographiques, qui vont jusqu’à 7 m, sont nettement supérieures aux légères variations dans la profondeur des chenaux et dans la croissance de la tourbe que les modèles étaient censés évaluer, et sont, en soi, de nature à générer de considérables écarts entre les scénarios (PAC, vol. 1, p. 103-104, figures 5 et 6). Il s’ensuit que les différences topographiques utilisées n’étaient visiblement pas justifiées.
- ii) Nous avons également découvert des ajouts en eau inexpliqués. Dans la modélisation physique du champ proche, les apports souterrains devraient refléter le fait que les sources sont alimentées par des flux entrants souterrains aux limites du modèle. Or, il ressort clairement des fichiers du DHI que, en plus des apports souterrains à la limite, une quantité d’eau additionnelle a été introduite dans le modèle en tant que source extérieure, sans aucune explication ou justification. Ainsi, 42 l/s ont été introduits dans le scénario de référence

(simulant la situation avec chenalisation) comme prétendue «alimentation des sources», alors que seuls 31 l/s ont été introduits dans les deux scénarios sans canaux. Une différence de 11 l/s a donc manifestement été introduite dans les comparaisons entre les scénarios, cette valeur représentant plus de la moitié des variations simulées des écoulements de surface résultant de la chenalisation que signale le DHI (PAC, vol. 1, p. 110-111). Cette quantité d'eau introduite sans raison revient à inventer un volume d'eau, sans aucune justification physique. En introduisant ce volume inventé, les experts du DHI ont artificiellement intensifié l'effet simulé de la chenalisation.

- iii) De très grandes différences ont également été découvertes dans les conditions initiales postulées, c'est-à-dire dans les niveaux piézométriques initiaux, pour les divers scénarios. Ces différences oscillaient entre -18 m et +16,5 m (PAC, vol. 1, p. 110, figure 9). Le modèle en champ proche est un modèle dynamique (variable dans le temps) et, s'il a été exécuté de façon à se rapprocher d'un modèle en régime permanent, il montre toutefois des instabilités transitoires de sorte que des différences aussi importantes dans les conditions initiales devraient influencer les résultats de la simulation.
- iv) Les résultats présentés à la Cour sont exagérés en raison des instabilités dans les sorties du modèle du DHI. Ces instabilités, illustrées dans notre rapport Wheeler et Peach (2019b) (PAC, vol. 1, p. 115, figure 12), étaient majoritairement liées au modèle MIKE-11 et en partie dues à des erreurs de calcul dans la modélisation du DHI et à des incohérences dans la représentation topographique des chenaux.
- v) En outre, le DHI a utilisé des valeurs très hautes pour la rugosité des chenaux dans la modélisation hydraulique, ce qui a entraîné des vitesses d'écoulement inférieures aux valeurs attendues et une augmentation des profondeurs des lames d'eau, expliquant sans doute pourquoi le modèle a incorrectement simulé par endroits des écoulements d'eau à l'extérieur du chenal principal (PAC, vol. 1, p. 111).

22

Alors que les erreurs et inexactitudes *signalées* pour la modélisation du champ proche étaient peu ou prou de même ampleur que les effets simulés, ce qui, en soi, fait déjà peser un doute sur la validité des conclusions tirées de la modélisation, nous concluons que les effets importants qu'invoque la Bolivie correspondent, pour l'essentiel, aux biais causés par les différences *non signalées* que l'on observe entre les scénarios modélisés. Nous constatons que les erreurs de calcul les plus importantes étaient liées au modèle hydraulique MIKE-11 et que des topographies différentes ont été utilisées pour modéliser les mêmes scénarios avec MIKE-SHE et MIKE-11. Le fait que MIKE-11 a été utilisé pour le scénario de référence (avec chenalisation), mais non pour les scénarios «sans canal» et «avec zones humides restaurées» ajoute une autre incohérence majeure dans les comparaisons entre les scénarios. Nous avons en effet remarqué ultérieurement que, lorsque les modèles du DHI sont exécutés avec des données topographiques plus réalistes, que les erreurs de calcul dans le modèle MIKE-11 sont corrigées et que les deux modèles sont utilisés uniformément pour tous les scénarios, les résultats concordent alors avec nos estimations.

4.3.3. Erreurs relatives à l'interprétation de la géologie et de l'hydrogéologie

Un grand nombre d'erreurs et d'incohérences, découvertes dans la cartographie géologique et l'analyse de la géologie structurale de la Bolivie (SERNAGEOMIN 2019a ; SERNAGEOMIN, 2019b), ont été intégrées par les experts du DHI dans leur propre représentation conceptuelle de l'hydrogéologie et donc dans le modèle en champ proche. Par conséquent, l'interprétation que propose le DHI de l'hydrogéologie et son application dans le modèle en champ proche comprennent elles aussi de nombreuses erreurs, ainsi qu'il a été exposé en détail dans notre rapport Wheeler et Peach (2019b) (PAC, vol. 1, p. 119-137), dont les plus importantes sont répertoriées ci-dessous :

- i) L'attribution d'une date radiométrique erronée, utilisée pour déterminer la fourchette d'âges des ignimbrites Silala (dénomination bolivienne), a donné lieu à une interprétation incorrecte de la stratigraphie (couches de roche), ce qui a des incidences importantes sur la géométrie de l'aquifère et la distribution des valeurs de perméabilité dans le modèle en champ proche, l'aquifère ignimbristique ayant une superficie bien plus restreinte que celle proposée par la Bolivie (PAC, vol. 1, p. 122-128).
- ii) La Bolivie a ignoré l'existence des ignimbrites Silala et Cabana dans sa caractérisation de la stratigraphie ignimbristique. L'ignimbrite Silala présente un fort degré de soudage et affleure en discordance sur les ignimbrites bien plus âgées dans la zone humide Orientales. L'ignimbrite Cabana est hautement perméable. Elles ont toutes deux une extension latérale limitée et sont contraintes par deux collines composées de volcanites à faible perméabilité du Miocène, ce qui restreint l'écoulement des eaux souterraines dans cette région. Cela influe sur la paramétrisation du modèle en champ proche et sur la géométrie de l'aquifère intégrée à ce dernier (PAC, vol. 1, p. 122-128). Par exemple, du fait de l'interprétation incorrecte de la géologie faite par le DHI, les eaux souterraines contournent le champ proche, alors que, dans la réalité, elles doivent intégralement s'écouler à travers cette zone.
- iii) La faille de Silala, présentée par le DHI comme offrant un chemin d'écoulement souterrain à forte perméabilité, n'existe pas et n'a pu être corrélée aux épisodes tectoniques qui se sont produits des millions d'années avant la mise en place des ignimbrites ou des volcanites du Miocène ; elle ne peut donc être utilisée pour définir et circonscrire les zones à forte perméabilité qui traversent les zones humides Cajones et Orientales et la gorge du Silala avec une sinuosité totalement impossible (PAC, vol. 1, p. 128-130 ; PAC, vol. 2, p. 214-221).
- iv) L'analyse structurale de la Bolivie est biaisée, ce qui a donné lieu à des interprétations erronées de la géologie structurale, puis à une hypothèse incorrecte concernant la présence et l'emplacement de fractures ouvertes capables de conduire les eaux souterraines ; il est donc probable que les propriétés des aquifères aient été attribuées de manière incorrecte dans la modélisation conceptuelle et numérique. (PAC, vol. 2, p. 212-235).
- v) Le DHI a fait abstraction des éléments de preuve chiliens qui démontrent la présence d'un système aquifère peu profond, mis en évidence par des preuves géophysiques et hydrochimiques. Même s'il a admis la présence de deux origines distinctes pour les eaux souterraines alimentant les sources des zones humides boliviennes, le DHI n'en a pas tenu compte dans la construction du modèle en champ proche, ce qui a donné lieu à une interprétation incorrecte de la distribution des niveaux des nappes et des chemins d'écoulement des eaux souterraines (PAC, vol. 1, p. 132-133 ; Peach et Wheeler (2019) ; Arcadis, 2017 ; SERNAGEOMIN, 2019a ; Herrera et Aravena, 2017 ; Herrera et Aravena, 2019).
- vi) Le modèle conceptuel du DHI de l'écoulement souterrain et les courbes potentiométriques utilisées pour le modèle en champ proche (CMB, vol. 4, p. 97) sont incompatibles entre eux et traduisent différentes interprétations du régime d'écoulement des eaux souterraines (Wheeler and Peach (2019b), PAC, vol. 1, p. 108, figure 8).

Tous les problèmes répertoriés ci-dessus influent sur la représentation des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le modèle en champ proche, ce qui a une incidence sur l'estimation des effets de la chenalisation sur les écoulements de surface et souterrain.

Cette liste est troublante et amène à conclure à l'inexactitude de la modélisation qui a été utilisée pour étayer et justifier les estimations du DHI des effets de la chenalisation sur les écoulements de surface et souterrains qui émanent des zones humides boliviennes dans le cours supérieur du Silala. En résumé, les modèles en champ proche mis au point par les experts du DHI

mandatés par la Bolivie se fondent sur une compréhension incorrecte de la géologie et de l'hydrogéologie du bassin versant en surface du Silala ainsi que de son bassin versant souterrain.

4.3.4. Dégradation des zones humides

24 Des experts mandatés par la Bolivie se sont penchés, notamment dans deux rapports de FUNDECO (DB, vol. 3, annexes 23.3 et 23.4), sur l'incidence de la chenalisation historique sur les changements observés dans les zones humides. Ces études de la Bolivie ont mis au jour certains changements survenus dans les zones humides, mais elles sont biaisées à bien des égards, comme nous l'avons vu dans notre rapport Wheeler et Peach (2019b) (PAC, vol. 1, p. 137-140), et comme le DHI lui-même (DHI, 2018b) l'a indiqué dans la duplique de la Bolivie (DB, vol. 2, p. 65-122).

La Bolivie répète une très grave erreur au sujet de la superficie actuelle des zones humides (0,6 ha), dont le DHI affirme qu'elle est erronée¹⁴. Elle soutient en outre que le recul important des zones humides est uniquement dû à la chenalisation historique¹⁵. Cette affirmation s'appuie sur le rapport FUNDECO (2018), dans lequel il est dit que, d'après des éléments de preuve géochimiques, la dessiccation de la zone humide «a commencé vers 1908, témoignant clairement des effets que la canalisation a eus sur les sources du Silala» (DB, vol. 3, p. 142), et que l'analyse des pollens a montré que, «[à] partir de 1908, un processus graduel de dessiccation s'est produit» (DB, vol. 3, p. 142). Ainsi, selon les preuves invoquées par la Bolivie, ce processus de dessiccation date d'une vingtaine d'années avant la construction de la chenalisation (installée en 1928) et «a atteint son maximum vers 1950» (DB, vol. 3, p. 142), date qui, à notre connaissance, ne coïncide avec aucune modification des chenaux. Des éléments de preuve dans d'autres domaines, notamment une analyse pédologique, font apparaître des changements majeurs remontant à entre 680 à 862 ans, et d'autres survenus entre 1960 et 1980 (DB, vol. 3, p. 155). Étant donné que les dates des changements observés n'ont aucun rapport avec la date de la chenalisation, il faut conclure que d'autres facteurs jouant un rôle important sont à l'œuvre. Nous convenons avec les experts du DHI mandatés par la Bolivie que les changements climatiques pourraient avoir causé certaines des modifications observées (DB, Vol. 2, p. 99).

Dans Wheeler et Peach (2019a) (RC, vol. 1, p. 127-138), nous avons expliqué qu'il avait été procédé à l'observation détaillée d'une zone humide chilienne exempte de perturbations dans le bassin hydrographique du Silala, couplée à des données de télédétection à haute résolution des zones humides boliviennes, afin de déterminer s'il y avait des preuves de la dégradation de ces dernières. La Bolivie affirme que «les chenaux et systèmes de drainage artificiels du Silala ont considérablement perturbé et dégradé les *bofedales* et entraîné le recul et la détérioration des zones humides» (CMB, vol. 1, p. 102). Nos résultats ont montré que les zones humides boliviennes et chiliennes occupent encore à ce jour la totalité du fond de vallée et s'étendent de façon saisonnière jusqu'au pied des collines adjacentes (RC, vol. 1, p. 132-136). Il s'ensuit que la chenalisation en Bolivie n'a pas eu d'incidence sur la superficie active de la zone humide dans le fond de vallée, où se trouvent les chenaux de drainage.

25 Le fonctionnement hydrométéorologique de la végétation hygrophile est, d'après les données de télédétection, similaire dans les trois zones humides, et les estimations connexes de l'évaporation réelle semblent indiquer que les taux d'évaporation les plus élevés sont observés dans les zones humides boliviennes Cajones et Orientales, où ils sont supérieurs de 10 % à ceux relevés dans la zone non perturbée de Quebrada Negra (RC, vol. 1, p. 137). Cela montre que, pour ce qui est de l'évaporation, les zones humides boliviennes fonctionnent au moins aussi bien que la zone humide chilienne exempte de perturbations. Ainsi, il ressort des données satellites qu'il n'y a pas eu de réduction importante de l'évaporation en lien avec la chenalisation des zones humides boliviennes,

¹⁴ «Il semble que les zones décrites dans le rapport Ramsar ne reflètent pas la zone humide dans son intégralité» (DB, vol. 5, p. 41).

¹⁵ «Les données scientifiques montrent que les ouvrages hydrauliques ont causé la fragmentation des *bofedales*» (DB, vol. 1, p. 50).

et que les légères diminutions des niveaux piézométriques associées au drainage de ces zones n'ont pas empêché l'évaporation de la végétation hygrophile.

Cette conclusion majeure, à savoir que la chenalisation n'a pas eu d'effet décelable sur l'évaporation dans les zones humides, a des implications considérables. Ainsi qu'il a été vu plus haut, le DHI et nous-mêmes considérons que les variations dans les pertes par évaporation dans les zones humides sont la première cause des changements potentiels dans l'écoulement transfrontière *total* qui va de la Bolivie au Chili, étant donné que tant les eaux de surface que les eaux souterraines s'écoulent d'un pays à l'autre (DB, vol. 5, p. 30 ; RC, vol. 1, p. 108).

Nous faisons observer au passage que l'erreur de la Bolivie au sujet des zones humides se retrouve dans la critique que fait celle-ci de notre analyse des données de télédétection à haute résolution relatives à l'étendue des zones humides (DB, vol. 1, p. 46). Notre analyse a montré une forte variabilité saisonnière dans la superficie active de la végétation hygrophile, ce qui d'après la Bolivie «fait ressortir des calculs erronés que la raison ne peut accepter». La Bolivie néglige donc les éléments de preuve présentés par ses propres experts, Torrez Soria *et al.* (2017) (CMB, vol. 3, p. 73) et Castel (2017), qui confirment également une forte expansion et contraction des zones de végétation hygrophile active au fil des saisons.

4.3.5. Dans les sources Cajones et Orientales, l'écoulement des sources à apports souterrains aurait-il pu être considérablement amélioré par le recours à des explosifs ?

Il a été laissé entendre (CMB, vol. 1, p. 47) que des explosifs avaient été utilisés pour améliorer l'écoulement des sources à apports souterrains des zones humides Cajones et Orientales. Or, comme nous l'avons vu dans notre rapport Peach et Wheeler (2019), les éléments de preuve présentés à l'appui de cette hypothèse sont peu convaincants et l'exemple auquel se réfère la Bolivie au sujet de l'accroissement des rendements des forages profonds dans des roches à très faible perméabilité au moyen de procédés par explosifs n'est pas applicable. Dans le contre-mémoire, la Bolivie cite en effet Driscoll (1978) (CMB, vol. 1, p. 47) pour démontrer que l'abattage à l'explosif peut accroître les flux d'eau par un facteur de 6 à 20. Toutefois, l'article cité n'a aucun rapport avec la situation qui nous occupe en Bolivie. Premièrement, il porte sur l'amplification des apports d'eau dans des forages profonds (plus de 100 mètres de profondeur), et non sur des sources. Deuxièmement, les forages avaient été réalisés dans des granites, quartzites et ardoises présentant un faible degré de fracturation. Ces roches sont métamorphes et subissent de considérables modifications sous l'effet de pressions et températures élevées ; elles sont donc en général très peu perméables, contrairement aux roches perméables alimentant les sources boliviennes. Troisièmement, les forages profonds ont été obturés par du sable pour diriger le tir horizontalement, ce qui ne peut manifestement pas s'appliquer au cas de la Bolivie. Les rendements des sources boliviennes n'auraient pas pu être considérablement augmentés au moyen des procédés par explosifs décrits (RC, vol. 1, p. 217-218).

En résumé, les raisons fondamentales pour lesquelles les experts du DHI mandatés par la Bolivie et nous-mêmes sommes en désaccord sur les effets de la chenalisation historique tiennent à la compréhension erronée qu'a le DHI de la géologie ainsi qu'à l'utilisation inappropriée qu'il fait d'un logiciel de modélisation éprouvé. Le DHI a lui-même reconnu que nos inquiétudes initiales concernant les erreurs dans les conditions limites de sa modélisation étaient justifiées, mais après qu'il a mis à notre disposition ses données numériques, d'autres erreurs très graves et des hypothèses inexplicables nous sont apparues. Selon nous, les effets de la chenalisation tiennent principalement aux changements subis par l'évaporation dans les zones humides. Or, le DHI et nous-mêmes sommes d'accord sur le fait que ceux-ci correspondent, dans le meilleur des cas, à une très petite (< 2 %) augmentation de l'écoulement de surface de la rivière. Notre analyse par télédétection ne montre

aucune différence importante dans l'évaporation si l'on compare une zone humide intacte au Chili avec la zone humide chenalisée en Bolivie.

Le DHI mentionne également d'autres effets de la chenalisation, qui découleraient d'une accentuation du gradient hydraulique de l'écoulement souterrain et d'une résistance hydraulique accrue à cet écoulement en raison d'une possible accumulation de la tourbe. Si nous convenons que ces effets sont possibles, notre propre analyse a toutefois montré qu'ils étaient très limités (conclusion confirmée par la suite lorsque nous avons exécuté les modèles du DHI en corrigeant partiellement les erreurs).

Nous avons signalé dans notre analyse actualisée (Wheater et Peach (2019b), PAC, vol. 1, p. 142) que le DHI faisait référence à une estimation historique de l'écoulement, effectuée en 1922 avant la chenalisation, pour étayer ses simulations et conclusions. Or, selon nous, on ne saurait porter crédit à une estimation unique, réalisée en un lieu incertain et dans un environnement difficile où les mesures contemporaines se sont révélées largement erronées. Le DHI (DB, vol. 5, p. 56) indique que cette mesure unique de l'écoulement était inférieure de 18 % au débit actuel (à l'emplacement supposé), mais il a aussi dit ailleurs (CMB, vol. 2, p. 392) que même dans des conditions de mesure quasi idéales, faites dans un canal construit spécialement à cet effet, il fallait s'attendre à des erreurs de l'ordre de 25 à 30 % dans les mesures du débit du Silala.

Le recul et la dégradation de la zone humide que dénonce la Bolivie ne sont pas confirmés par nos données de télédétection ni par les données collectées sur le terrain, et ces phénomènes sont mis en doute par les propres experts de la Bolivie. De même, le DHI et nous-mêmes avons démontré que la Bolivie avait affirmé à tort que le rôle de la chenalisation dans la dégradation de la zone humide était attesté. Quant à sa thèse sur le recours à des explosifs, elle n'est pas plausible ni étayée par un quelconque élément de preuve fiable.

5. CONCLUSIONS

27

Il est encourageant de constater que les experts de la Bolivie et nous-mêmes sommes globalement d'accord sur le fonctionnement hydrologique du bassin hydrographique du Silala. Ce dernier s'écoule de la Bolivie au Chili et forme un système d'eaux de surface et d'eaux souterraines qui constituent un ensemble unitaire et franchissent la frontière internationale en surface comme en sous-sol. Il s'agit donc incontestablement d'un cours d'eau international.

De fortes divergences demeurent au sujet de l'interprétation de l'hydrogéologie, mais ce qui pose plus particulièrement problème en l'espèce c'est le fait que la Bolivie continue d'affirmer, sur les conseils de ses experts du DHI, que la chenalisation historique de ses zones humides a des effets importants sur les écoulements de surface, alors que nous sommes d'avis que ces effets sont très limités. Dans nos rapports joints à la réplique du Chili, nous avons montré que la géologie utilisée par le DHI pour sa modélisation était erronée et que les conditions aux limites retenues aboutissaient à un modèle fondamentalement vicié. Dans notre analyse actualisée, jointe à la pièce additionnelle du Chili, nous avons également démontré que la majeure partie de l'interprétation de la géologie par la Bolivie était erronée. En outre, après avoir eu accès aux données numériques utilisées pour la modélisation du DHI, nous avons montré de façon probante que cette modélisation comportait des lacunes irrémédiables. Comme il a été expliqué plus haut, les effets importants simulés correspondent en grande partie aux biais causés par les erreurs dans la modélisation du DHI.

Nous sommes d'avis que l'effet potentiel de la chenalisation est principalement de réduire l'évaporation dans les zones humides. Une telle réduction pourrait accroître la quantité d'eau disponible pour l'écoulement de surface qui traverse la frontière. Cependant, le DHI et nous-mêmes convenons que cet effet serait très limité et représenterait 2 % tout au plus de l'écoulement annuel. En effet, notre examen des zones humides boliviennes par télédétection semble montrer que la

chenalisation n'a pas modifié de manière significative l'étendue latérale et la dynamique saisonnière de ces zones, et que l'évaporation n'y a pas été notablement réduite.

Les experts du DHI mandatés par la Bolivie expliquent aussi par d'autres mécanismes les effets importants qu'ils tirent de la modélisation, tels que représentés dans leurs scénarios comparant la situation de «référence» (avec chenalisation) avec les situations «sans canal» et «avec zones humides restaurées». Notre calcul simplifié, quoique approximatif, a montré que ces mécanismes pouvaient générer une variation de 1 % dans l'écoulement de surface. En outre, il importe de rappeler que toute augmentation de l'écoulement de surface s'accompagnera d'une diminution correspondante de l'écoulement souterrain traversant la frontière, et inversement. Toute variation nette de l'écoulement transfrontière sera principalement due à une modification de l'évaporation dans les zones humides, modification limitée comme le reconnaît le DHI, et même, selon notre analyse par télédétection, négligeable.

Pour conclure, la modélisation par la Bolivie de l'incidence de la chenalisation est incontestablement biaisée à bien des égards. Elle n'est nullement fiable et la Cour ne devrait pas en tenir compte. Nous avons constamment affirmé que cette incidence, de notre avis d'experts, serait limitée. De fait, les effets de la chenalisation historique sur les écoulements transfrontières qui circulent de la Bolivie au Chili sont si faibles qu'ils ne sont probablement pas décelables.

6. RÉFÉRENCES

- Arcadis, 2017. *Detailed Hydrogeological Study of the Silala River*. (MC, vol. 4, annexe II).
- Alcayaga, H., 2017. *Characterization of the Drainage Patterns and River Network of the Silala River and Preliminary Assessment of Vegetation Dynamics Using Remote Sensing*. (MC, vol. 4, annexe I).
- British Geological Survey, 1996. *British Regional Geology, London and the Thames Valley*, 4th ed., 173 pp.
- Castel, A.P., 2017. *Analyse multi-temporelle à partir d'images satellite des bofedales (zones humides des hauts plateaux andins) des sources du Silala, Potosí — Bolivie*. DIREMAR. La Paz. (RC, vol. 2, annexe 98).
- Danish Hydraulic Institute (DHI), 2018a. *Etude des écoulements dans les zones humides et le système de sources du Silala*. (CMB, annexe 17).
- Danish Hydraulic Institute (DHI), 2018b. *Analyse technique et validation indépendante de plusieurs études techniques supplémentaires des sources Silala*. (DB, vol. 2, annexe 23).
- Danish Hydraulic Institute (DHI), 2019. *Actualisation des scénarios de la modélisation mathématique hydrologique des eaux des sources Silala par une analyse de sensibilité des limites du modèle*. (DB, vol. 5, annexe 25).
- Driscoll, F.G., 1978. Blasting — it turns dry holes into wet ones, *Johnson Drillers' Jnl*, Nov/Dec, Johnson Division UOP, Inc., St. Paul, MN, p. 3.
- Fundación para el Desarrollo de la ecología (FUNDECO), 2018. *Study of Evaluation of Environmental Impacts in the Silala, Palynology*. (DB, vol. 3, annex 23.4).
- Herrera, C. and Aravena, R., 2017. *Chemical and Isotopic Characterization of Surface Water and Groundwater of the Silala Transboundary Basin, Second Region, Chile*. (MC, vol. 4, annexe III).
- Herrera, C. and Aravena, R., 2019. *Chemical and Isotopic Characterization of Surface Water and Groundwater of the Silala River Transboundary Basin, Second Region, Chile*. (RC, vol. 3, annexe XI).
- Latorre, C. and Frugone, M., 2017. *Holocene Sedimentary History of the Río Silala (Antofagasta Region, Chile)*. (MC, vol. 5, annexe IV).
- Mao, L., 2017. *Fluvial Geomorphology of the Silala River, Second Region, Chile*. (MC, vol. 5, annexe V).
- 29 McRostie, 2017. *Archaeological First Baseline Study for the Silala River, Chile*. (MC, vol. 5, annexe VI).
- Muñoz, J.F., Suárez, F., Fernández, B., Maass, T., 2017. *Hydrology of the Silala River Basin*. (MC, vol. 5, annexe VII).
- Muñoz, J.F., Suárez, F., Sanzana, P. and Taylor, A., 2019. *Assessment of the Silala River Basin Hydrological Models Developed by DHI*. (PAC, vol. 2, annexe XV).
- Peach, D.W. and Wheeler, H.S., 2017. *L'évolution du Silala, de son bassin versant et de sa gorge*. (MC, vol. 1).

Peach, D.W. and Wheeler, H.S., 2019. *La géologie, l'hydrogéologie et l'hydrochimie du bassin hydrographique du Silala*. (RC, vol. 1).

Ramsar Convention Secretariat, 2018. *Report Ramsar Advisory Mission N° 84, Ramsar Site Los Lipez, Bolivia*. (CMB, vol. 5, annexe 18).

SERNAGEOMIN (Chile), 2017. *Geology of the Silala River Basin*. (MC, vol. 5, annexe VIII).

SERNAGEOMIN (Chile), 2019a. *Geology of the Silala River Basin: An Updated Interpretation*. (RC, vol. 3, annexe XIV).

SERNAGEOMIN (Chile), 2019b. *A Review of the Geology Presented in Annexes of the Rejoinder of the Plurinational State of Bolivia*. (PAC, vol. 2, annexe XVI).

Torrez Soria et al., 2017. *Characterization of the Soils of the Silala Bofedals and its Vicinities*. (CMB, vol. 3, annexe 17, annexe D, appendice A1).

Wheeler, H.S. and Peach, D.W., 2017. *Le Silala dans sa forme actuelle — fonctionnement du système fluvial*. (MC, vol. 1).

Wheeler, H.S. and Peach, D.W., 2019a. *Incidences de la chenalisation du Silala en Bolivie sur l'hydrologie de son bassin hydrographique*. (RC, vol. 1).

Wheeler, H.S. and Peach, D.W., 2019b. *Incidences de la chenalisation du Silala en Bolivie sur l'hydrologie de son bassin hydrographique — une analyse actualisée*. (PAC, vol. 1).
