

**Résumé des conclusions scientifiques du DHI sur le  
différend concernant le statut et l'utilisation des  
eaux du Silala (Chili c. Bolivie)**

**Déclaration écrite du DHI**

**10-01-2022**

**[TRADUCTION]**

# **Résumé des conclusions scientifiques du DHI sur le différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)**

## **Déclaration écrite du DHI**

**10-01-2022**

**[TRADUCTION]**

Ce document a été sollicité par la Cour Internationale de Justice (CIJ) dans le cadre du différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie). Le document résume le travail du DHI concernant l'évaluation des flux d'eaux de surface et souterraines du Silala, en soulignant les points sur lesquels DHI est d'accord avec les experts du Chili et les points sur lesquels DHI est en désaccord avec les experts du Chili.

## **TABLE DES MATIÈRES**

### 1. Résumé

1.1 Principales conclusions sur lesquelles DHI est *en accord* avec les experts du Chili

1.2 Principales conclusions sur lesquelles DHI est *en désaccord* avec les experts du Chili

### 2. L'expertise

2.1 Les experts du DHI

2.2 Le rôle du DHI dans la procédure

### 3. Les caractéristiques du Silala

### 4. La méthodologie du DHI

### 5. Points d'accord entre les experts de la Bolivie et du Chili

### 6. Points de désaccord entre les experts de la Bolivie et du Chili

6.1 L'impact des canaux sur les flux transfrontaliers

6.2 Désaccords entre les experts de la Bolivie et du Chili sur la méthodologie et les résultats

7. Discussion technique détaillée sur les points de désaccords

7.1 Le bilan hydrique: modèles de Champ Lointain et du Champ Proche

7.2 L'étendue de la zone du modèle du Champ Proche et les conditions de contour assignées

7.3 Les différences topographiques entre les canaux et le terrain

7.4 Le modèle hydrogéologique du DHI est valide

8. Bibliographie

## **1. RESUME**

Les zones humides et les sources du Silala en Bolivie sont situées à 0,5-3 km de la frontière avec le Chili, dans la partie sud-ouest du Département de Potosí. Au début du siècle dernier, ces zones humides ont été drainées et canalisées et leur débit exploité par l'Antofagasta (Chili) et Bolivian Railway Compagnie Ltd. au Chili. En 2017, à la demande de l'État Plurinational de Bolivie, DHI a réalisé une étude technique des flux du système des zones humides et des sources du Silala en Bolivie, en quantifiant les flux de surface et souterraines, à la fois dans leur état actuel, avec des canaux artificiels et un réseau de drainage, et dans leur état naturel futur estimé.

Un des objectifs principaux a été de mener une analyse indépendante des eaux de surface et les aquifères d'eau souterraine du Silala afin de déterminer leur nature et leur connectivité. Pour cela, il a fallu se documenter sur les connaissances physiques factuelles et la compréhension du système du Silala afin de créer une base transparente pour l'analyse et les conclusions ultérieures.

Ces objectifs ont été atteints en employant la méthodologie technique suivante :

a) Des programmes détaillés de collectes de données sur le terrain qui ont été réalisées in situ en Bolivie, notamment :

- des enquêtes détaillées et des programmes d'échantillonnage du sol
- la surveillance du débit des eaux de surface et du débit des sources dans les zones humides du Silala en Bolivie, et
- un programme intensif de caractérisation hydrogéologique de l'aquifère souterrain.

b) Des études détaillées de modélisation numérique simulant l'écoulement d'eaux souterraines/de surface et leurs échanges dans les conditions actuelles et naturelles (en d'autres termes, les conditions en l'absence des canaux artificiels et du réseau de drainage d'une part, et avec les zones humides restaurées d'autre part).

### **1.1 Principales conclusions sur lesquelles DHI est d'accord avec les experts du Chili**

- 1) La principale source d'eau de surface des sources du Silala est l'écoulement des eaux souterraines<sup>1</sup>, l'eau de surface interagit avec les eaux souterraines sous-jacentes le long de son cours.
- 2) Les canaux n'ont pas modifié la direction générale de l'écoulement des eaux de surface ou souterraines.
- 3) Le Silala est de nature complexe et comprend un système couplé d'eaux souterraines et d'eaux de surface qui prend naissance sur le territoire bolivien (en amont) et s'étend au Chili (en aval).
- 4) L'évaporation des zones humides augmentera si les canaux sont supprimés.
- 5) Le débit des eaux de surface diminuera et celui des eaux souterraines augmentera à la frontière si les canaux sont mis hors service et si les zones humides sont restaurées à leur état naturel.
- 6) Les données recueillies sur le terrain et les modèles établis suggèrent que l'eau déversée du bassin de captation<sup>2</sup> du Silala (représentant les pertes par évapotranspiration<sup>3</sup> des sols,

---

<sup>1</sup> En hydrologie, le débit est l'écoulement de l'eau d'une rivière, d'un aquifère, d'un lac ou d'une autre masse d'eau.

<sup>2</sup> Un bassin est une zone de terrain où les précipitations s'accumulent et s'écoulent vers une embouchure commune.

<sup>3</sup> La transpiration est le processus par lequel l'eau est transférée dans l'atmosphère par 1) l'évaporation du sol et d'autres surfaces et 2) la transpiration des plantes.

des zones humides et des canaux) s'écoule finalement vers le Chili sous forme d'eaux souterraines ou de surface, avec ou sans canaux.

## **1.2 Principales conclusions sur lesquelles DHI est en désaccord avec les experts du Chili**

- 7) Sur l'ampleur de la diminution du débit des eaux de surface transfrontalières à l'état naturel (c'est-à-dire sans les canaux et le réseau de drainage). La fourchette estimée de la diminution du DHI, basée sur les données et modèles de terrain sur site, est de 11% à 33%, tandis que l'expert du Chili déclare (sans calculs détaillés) qu'elle est négligeable.
- 8) Les mesures historiques du débit de surface avant la canalisation montrent une diminution de 18% par rapport aux débits actuels, ce qui est cohérent avec la fourchette des résultats du DHI. Le Chili ne reconnaît pas la valeur de ces mesures historiques.
- 9) Les experts du Chili affirment qu'en raison d'inexactitudes dans les données d'entrée, le modèle de Champ Proche du DHI ne peut pas être utilisé pour prédire les impacts des structures de drainage artificielles sur le flux transfrontalier. Au contraire, DHI estime que le modèle de Champ Proche, qui est basé sur des mesures de terrain réelles dans la zone d'impact, fournit la meilleure base pour les évaluations d'impact malgré les imprécisions ou les incertitudes qui sont inhérentes à ces modèles.
- 10) Les experts du Chili remettent en question les mesures, interprétations, analyses et modèles du DHI mais n'ont pas présenté d'analyse alternative détaillée reflétant les conditions du site du Silala et les différentes propriétés des zones humides du Silala. Ils n'ont pas non plus présenté d'analyse hydrologique détaillée, ni d'évaluation d'impact approfondie.

## **2. SUR LES EXPERTS**

- 11) Le DHI (anciennement: *Danish Hydraulic Institute* [Institut hydraulique danois]) est une organisation indépendante, à but non lucratif, basée au Danemark, qui compte 30 bureaux et environ 1.100 employés à temps plein dans le monde. DHI est une société de recherche et de conseil spécialisée dans la résolution des défis liés à l'environnement aquatique. Depuis plus de 50 ans, DHI a été le fer de lance du développement de la technologie appliquée à l'évaluation des ressources hydriques et a mené de nombreuses études sur la disponibilité et le partage des ressources, la prévision et la planification des inondations, ainsi que l'évaluation des impacts des infrastructures artificielles sur l'environnement aquatique. Les progiciels avancés de simulation des flux d'eau étant souvent des éléments cruciaux pour ces projets, DHI intègre ses expériences et les connaissances tirées de ces

projets dans des progiciels avancés de modélisation de l'eau (commercialisés sous la marque "MIKE"). Depuis des décennies, des milliers de professionnels de l'eau dans le monde entier (autorités publiques, entreprises publiques de services de l'eau, entreprises d'énergie et d'irrigation et consultants en ingénierie) utilisent les connaissances et les technologies du DHI pour résoudre leurs défis liés à l'eau. DHI a développé le logiciel MIKE SHE spécifiquement pour les investigations détaillées des systèmes hydrologiques où les eaux de surface et les eaux souterraines interagissent étroitement, ce qui rend ce logiciel particulièrement adapté à l'étude du cas du Silala.

- 12) DHI a participé à des projets dans le monde entier et possède une grande expérience de la gestion durable des ressources en eau, notamment de l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface. DHI a beaucoup travaillé sur l'hydrologie de montagne, notamment dans les Andes et a construit des systèmes de gestion de l'eau pour de grandes zones humides telles que les Everglades, l'Okavango et certains des plus grands deltas du monde, notamment le Gange/Brahmapoutre, le Mékong, l'Ayeyarwady et le Yangtze. DHI a joué un rôle déterminant dans l'élaboration des principes modernes de gestion intégrée des ressources hydriques et dispose d'un centre de collaboration permanent avec le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUMA) afin de promouvoir davantage cette question.
- 13) De plus, DHI a été responsable des conceptions hydrauliques de grands projets d'infrastructure sensibles au niveau international, garantissant un faible impact sur l'environnement, telles que les grands ponts traversant le Grand Belt et l'Oresund, susceptibles d'influencer la salinité de la mer Baltique. L'Institut a également été impliqué en tant qu'expert technique dans des affaires d'eaux transfrontalières telles que la "Revendication territoriale de Singapour à l'intérieur et autour du détroit de Johor (Malaisie c. Singapour)" devant le TIDM, l'affaire du projet Gabčíkovo-Nagymaros (Hongrie c. Slovaquie) devant la CIJ et l'arbitrage sur les eaux de l'Indus Kishenganga (Pakistan c. Inde).

## 2.1 Les experts du DHI

- 14) **M. Roar A. Jensen** (MSc) a dirigé l'équipe du DHI sur ce projet. M. Jensen est un expert en hydrologie et en ressources hydriques. Il a plus de 35 ans d'expérience dans la planification et l'évaluation des ressources hydriques, acquise dans le cadre de nombreux projets menés dans de nombreux pays d'Europe, d'Amérique latine, d'Asie et d'Afrique où, au fil des ans, il a collaboré avec de nombreuses institutions spécialisées dans les ressources hydriques, agissant à la fois comme chef de projet et comme hydrologue principal. Il a été responsable de projets dans le domaine de la gestion et de la prévision des inondations, de l'évaluation de la disponibilité de l'eau et de la planification des

ressources hydriques, avec une utilisation conjointe des eaux souterraines et des eaux de surface. M. Jensen est un modélisateur mathématique expérimenté dans les hautes Andes.

15) Le **Dr. Torsten V. Jacobsen** est un des principaux spécialistes de la modélisation des eaux de surface et souterraines. Il est titulaire d'une maîtrise en ingénierie civil avec une spécialisation en modélisation hydraulique et hydrologique, d'un doctorat en dynamique des fluides et a plus de 25 ans d'expérience en hydraulique et hydrologie complexes, acquise dans le cadre de projets relatifs aux ressources hydriques au Danemark, mais aussi en Europe, aux États-Unis, en Afrique, en Asie, en Amérique du Sud et en Australie. Dans ces projets, il a été un expert de premier plan dans les domaines de l'hydrologie intégrée, de la modélisation des ressources hydriques et de la gestion de l'eau. Il a géré un large éventail de projets de conseil et de recherche, portant sur l'évaluation des ressources hydriques de surface et souterraines et leurs interactions, la gestion des ressources hydriques, la gestion et la restauration des zones humides, la protection des eaux souterraines et le changement climatique. Le Dr. Jacobsen a également beaucoup travaillé sur les zones humides dans les bassins arides, semi-arides et humides.

16) **M. Michael M. Gabora** (MSc) a dirigé l'étude portant sur la caractérisation hydrogéologique et le développement des éléments du modèle conceptuel hydrogéologique du projet. Il a plus de 22 ans d'expérience professionnelle dans la définition de la portée, la mise en œuvre et la gestion des études hydrologiques et hydrogéologiques. Son expérience comprend un large éventail de projets, mais s'est principalement concentrée sur la caractérisation hydrogéologique et la modélisation numérique des eaux souterraines des aquifères de roches fracturées pour les études d'assèchement, l'exploration des eaux souterraines, les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface et le transport des contaminants. M. Gabora a beaucoup travaillé dans les Andes arides de la Bolivie, du Chili, d'Argentine et du Pérou sur des projets liés à l'évaluation de l'impact environnemental d'infrastructures prévues ou existantes, à la conception technique et à l'aide à la décision dans le domaine de l'eau. Cette expérience comprend des études hydrogéologiques dans des zones humides de haute altitude (bofedales) bien développées en Argentine, ainsi que de nombreuses autres études pour lesquelles les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface étaient une composante essentielle de l'analyse de l'impact environnemental. M. Gabora est titulaire d'un diplôme en sciences de la terre et des planètes et d'un M.Sc. en ressources hydriques, obtenus tous deux à l'université du Nouveau-Mexique. M. Gabora est également géoscientifique professionnel (Ontario, Canada), géologue agréé (Arizona, États-Unis) et hydrologue professionnel certifié par l'American Institute of Hydrology.

## 2.2 Le rôle du DHI dans la procédure

17) En 2017, à la demande de l'État Plurinational de Bolivie, DHI a réalisé une étude technique des flux des zones humides et du système des sources du Silala, en quantifiant les flux de surface et de subsurface, à la fois dans leur état actuel et dans leur état naturel, c'est-à-dire sans les canaux artificiels et le réseau de drainage. Mener une analyse indépendante des eaux de surface et des eaux souterraines du Silala afin de déterminer leur nature et leur connectivité a été un objectif clé de l'étude. Il était également important d'obtenir et de documenter les connaissances physiques factuelles et la compréhension du système du Silala afin de créer une base scientifiquement solide pour les analyses et conclusions ultérieures.

18) A cet égard, DHI a préparé les rapports suivants qui ont été soumis à la Cour :

- **(DHI 1)** : Etude des écoulements dans le système des zones humides et des sources du Silala (partie du Contre-mémoire de la Bolivie (CMB) annexe 17). Ce rapport et ses annexes décrivent en détail la collecte exhaustive de données sur de terrain et l'analyse des conditions hydrologiques et hydrogéologiques dans le Silala ainsi que l'évaluation de l'impact de son débit.
- **(DHI 2)** : Analyse technique et avis de validation indépendant des études techniques complémentaires sur les sources du Silala, décembre 2018 (Duplique de la Bolivie, annexe 23). Ce rapport contient la revue technique générale du DHI sur les études techniques boliviennes sur le Silala initiées après DHI 1. Le rapport comprend des copies des études boliviennes originales.
- **(DHI 3)** : Analyse et évaluation de la Réplique du Chili sur les demandes reconventionnelles de la Bolivie dans l'affaire du Silala. Mars 2019, (Duplique de la Bolivie, annexe 24) contenant les commentaires du DHI sur les observations des experts du Chili sur DHI 1 et DHI 2.
- **(DHI 4)** : Actualisation des scénarios du modèle hydrologique mathématique des eaux des sources du Silala par une analyse de sensibilité des limites du modèle, avril 2019 (Duplique de la Bolivie, annexe 25). Ce rapport décrit les résultats de l'analyse de sensibilité des conditions de contour les plus restrictives qui conduisent à ce que les impacts du système de drainage artificiel soient définis comme une fourchette entre une limite supérieure et une limite inférieure. Le rapport commente également les réponses des experts du Chili (W&P 3 et W&P 4).

- Suite à la soumission du dernier rapport du DHI à la Cour, les experts du Chili, dans l'Écrit Additionnel du Chili (W&P 5), ont soulevé des considérations supplémentaires sur les évaluations du DHI. DHI n'a pas eu l'occasion de commenter ces dernières considérations devant la Cour.

### 3. LES CARACTERISTIQUES DU SILALA

19) Les bofedales du Silala sont, désignées par la Convention de Ramsar<sup>4</sup>, comme des zones humides situées dans les Andes boliviennes à une altitude d'environ 4300 m au-dessus du niveau de la mer, près de la frontière entre la Bolivie et le Chili. Le bassin de captation versant et les zones humides environnantes descendent de la Bolivie vers le Chili et sont entourés de volcans s'élevant à 5600 m au-dessus du niveau de la mer. Il s'agit d'une région au climat froid et venteux, à la végétation très clairsemée, et la zone peuplée la plus proche de la Bolivie se trouve à plus de 20 km. Les sols grossiers dominent le bassin de captation versant en amont des sources du Silala et permettent aux rares précipitations de s'infiltrer dans la couche superficielle du sol, laissant peu de traces des eaux de surface courantes. Une grande partie de l'infiltration des événements de précipitation les plus petits s'évapore de la couche superficielle du sol par temps sec. Par conséquent, seuls les événements de précipitations plus importants fournissent une recharge significative des eaux souterraines.



Schéma 3-1. Schéma des zones humides du Silala en Bolivie.

<sup>4</sup> Dans le cadre de la Convention de Ramsar de 1971 relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement pour les oiseaux aquatiques qui l'habitent ("la Convention de Ramsar"), une zone humide est un site considéré comme important au niveau international.

- 20) Les bofedales de Bolivie (le type de zones humides de haute altitude auquel appartiennent les zones humides du Silala) sont des écosystèmes fragiles dotés d'une flore et d'une faune uniques, une sorte d'oasis dans un paysage aride et sec. L'écoulement des sources et la couche superficielle du sol partiellement inondée des bofedales naturels maintiennent un écosystème unique. Ces conditions, qui étaient naturelles dans le Silala, ont été sévèrement dégradées. À l'exception des lacs de cratère plutôt inaccessibles situés au sommet du volcan Inacaliri, les zones humides du Silala et les eaux de surface associées constituent la seule source permanente d'eau douce de surface en Bolivie dans un rayon de 20 km.
- 21) En 1910, la société Antofagasta and Bolivia Railway Compagnie Ltd. a commencé à tuber l'écoulement des zones humides du Silala en Bolivie vers le chemin de fer pour l'utiliser pour ses locomotives à vapeur. Par la suite, en 1928, la société a construit un réseau dense de 6,4 km de canaux et de tuyaux de drainage sur le territoire bolivien. Cette infrastructure artificielle dirige l'eau rapidement depuis chacune des nombreuses sources dans les zones humides jusqu'à la frontière avec le Chili, où elle est encore aujourd'hui collectée et canalisée pour alimenter les utilisateurs d'eau éloignés.
- 22) Les zones humides du Silala se composent de plusieurs sources, à deux endroits différents (désignés par DHI comme zones humides Sud et Nord), où les eaux souterraines se déversent à la surface (Figure 3-1). Au total, 138 sources individuelles ont été excavées et reliées par des canaux de drainage individuels ou des tuyaux de drainage aux deux principaux canaux collecteurs (le canal nord et le canal sud). À partir de la zone humide sud, le canal sud conduit l'eau à travers une gorge étroite et raide jusqu'au point de confluence où il rejoint le canal nord de la zone humide nord. À partir du point de confluence, le canal principal transporte l'écoulement combiné des zones humides du nord et du sud jusqu'à la frontière via un ravin raide mais plus large.
- 23) Avant la canalisation, l'écoulement soutenu des eaux souterraines à travers des sources avait permis le développement des bofedales dans les zones humides du nord et du sud et le long du fond des gorges, et d'importantes tourbières se sont développées.
- 24) Dans les Andes arides, l'expérience a montré que les systèmes de bofedales étendus se trouvent souvent dans des zones de roches hautement fracturées qui peuvent transmettre des eaux souterraines importantes et sont connectées à des aquifères régionaux qui peuvent soutenir les flux. Cela correspond à la situation observée dans le Silala bolivien. Il est également bien connu que les bofedales sont très sensibles aux changements relativement modestes dans les élévations des eaux souterraines (Cooper et al., 2019); (Cooper et al., 2015); (FUNDECO, 2019, RB, Vol. 5, annexe 26). Oyague et Copper (2020) donnent la description générale suivante des bofedales : "...les pousses de plantes poussent de manière si dense qu'elles forment un barrage presque imperméable qui limite

le mouvement latéral de l'eau, et lorsque les coussins se touchent, ils isolent les piscines empêchant un drainage rapide". Cela tend également à prouver que les matériaux qui ont été excavés et enlevés pour construire le réseau de drainage devaient avoir une faible perméabilité et devaient donc avoir pour effet de restreindre l'écoulement naturel des sources.

25) Dans le Silala, le réseau de drainage artificiel a réduit le niveau des eaux souterraines dans les zones humides sous la surface du sol et a asséché des sols auparavant saturés qui présentaient des eaux stagnantes généralisées ou à écoulement lent dans la surface. Par conséquent, il y a moins d'eau disponible pour l'évaporation directe de la surface et pour la transpiration<sup>5</sup> dans les zones humides actuelles du Silala que dans la situation naturelle, non canalisée (voir Figure 3-2). La végétation dans les zones actuellement drainées est dominée par des herbes caractéristiques des zones de hautes terres où la profondeur des eaux souterraines est plus grande. Le drainage et l'élimination des eaux de surface stagnantes ou les eaux qui coulent lentement dans les zones humides ont considérablement perturbé l'écosystème d'origine.

26) En plus de l'abaissement artificiel des eaux souterraines par le système de drainage construit, il existe des preuves que les sources ont également été excavées et que la tourbe et la couche supérieure du sol, densément enracinées à l'origine, qui limitaient l'écoulement des sources, ont été enlevées. Cela a augmenté le débit des eaux souterraines dans les zones humides et, par conséquent, le débit des eaux de surface dans l'ensemble des zones humides.

27) Les changements décrits dans les zones humides sont évidents sur le terrain. Les photographies de la partie supérieure de la figure 3-3 permettent de comparer l'écoulement à grande vitesse actuel, concentré dans le chenal principal du Silala avec l'écoulement lent passé, entrelacé à travers la surface marécageuse d'un bofedal non canalisé à 50 km du Silala (en haut à droite). On trouve la preuve directe que ces écoulements lents et la morphologie du bofedal dominaient les zones humides du Silala avant la canalisation dans une petite parcelle mal drainée de la zone humide Nord qui présente la même végétation et le même schéma d'écoulement qu'une tourbière non canalisée (Figure 3-3, en bas à droite). Le changement de végétation, conséquence des canaux, est évident lorsqu'on compare la partie artificiellement drainée de la zone humide Nord (Figure 3-3, en bas à gauche), qui montre une terre sèche dominée par des herbes envahissantes sur les rives du canal à écoulement rapide, avec la partie contrastée naturellement et faiblement drainée, de la même zone humide (Figure 3-3, en bas à droite).

---

<sup>5</sup> La transpiration est le processus d'évaporation à travers les feuilles de la végétation.

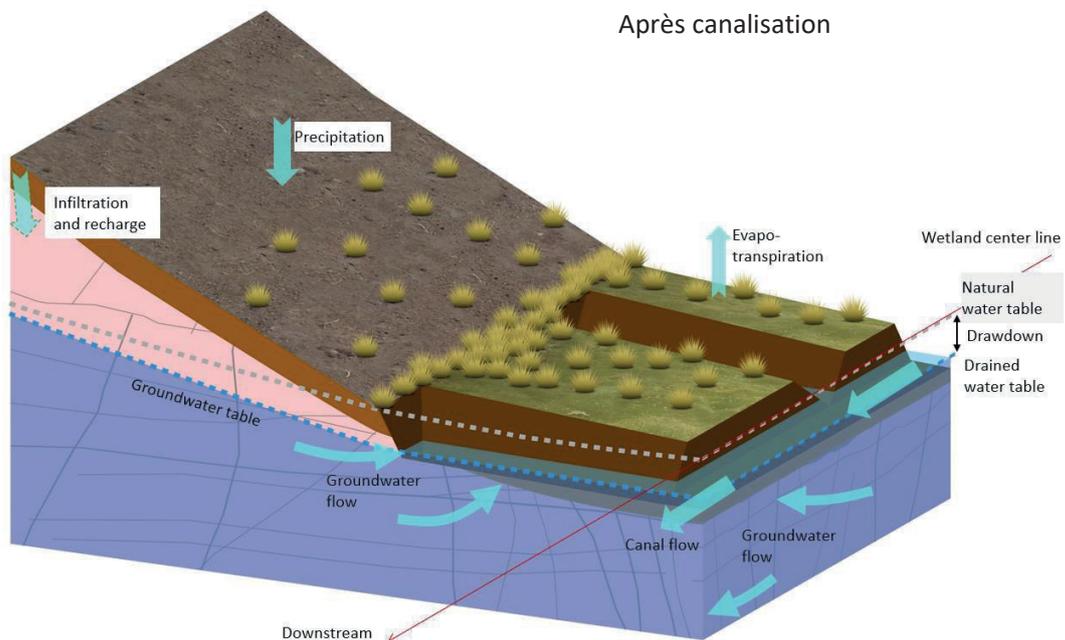
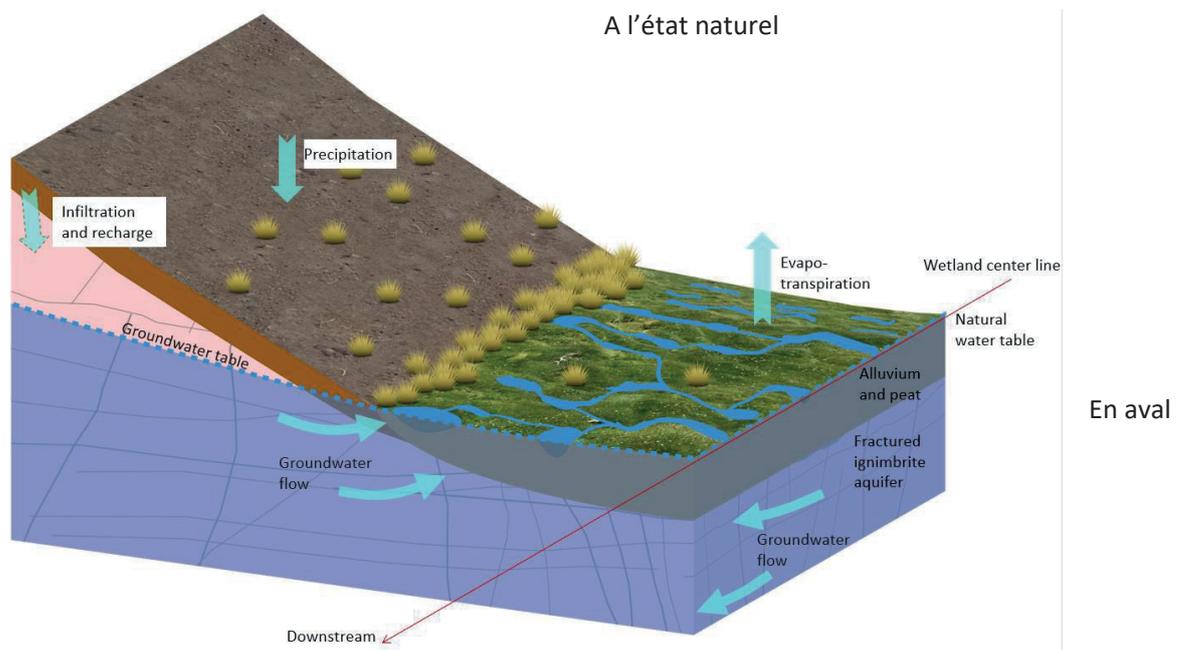


Schéma 3-2 Élément de la pente d'une colline en zone humide naturelle non perturbée (en haut) et en zone humide canalisée et drainée (en bas), montrant le niveau d'eau et les impacts sur cette zone humide.

28) Indépendamment des impacts des travaux de drainage introduits sur les flux transfrontaliers d'eaux de surface et souterraines, ces travaux ont sans aucun doute eu des impacts écologiques majeurs sur les zones humides.

29) Les mesures du système naturel non canalisé ont été réalisées par l'ingénieur Robert Fox, qui était chargé de la conception de l'approvisionnement en eau de la compagnie ferroviaire et a étudié la quantité et la qualité des eaux du Silala (Fox R. H. 1922). Il a mesuré un débit de 131 l/s "avec de très légères variations" (18% de moins que le débit moyen actuel de 160 l/s).

Les mesures de M. Fox sont les seules mesures in situ connues du débit des eaux de surface transfrontalières du Silala naturel avant l'installation des travaux de canalisation, et correspondent parfaitement aux évaluations du DHI des débits non perturbés du DHI (11-33 % inférieurs aux débits canalisés) (DHI 4, 2019, RB, Vol. 5, annexe 25).



*Schéma 3-3. Exemples d'impacts du réseau de canaux et de drainage. Canal étroit bordé de pierres dans le Silala avec de l'eau qui s'écoule rapidement (en haut à gauche) comparé à des écoulements de surface lents et étendus dans le bofedal naturel voisin de Villamar (en haut à droite) et dans une parcelle du Silala non perturbée, ayant conservé le schéma d'écoulement original (rangée inférieure droite). En bas à gauche: des herbes envahissantes empiètent sur la végétation originale dans la section drainée plus sèche du canal principal de la zone humide nord.*

#### 4. LA METHODOLOGIE UTILISÉE PAR DHI

30) Comprendre la combinaison des eaux de surface et souterraines et les impacts hydrologiques associés à l'assèchement et à la canalisation est une tâche complexe. Il est bien connu que la nature est diverse et que la pente et l'altitude du terrain, la végétation, les propriétés du sol, etc. varient dans l'espace. Dans certaines parties de la zone des sources du Silala, elles varient en quelques mètres. De même, l'épaisseur des différentes formations géologiques de subsurface varie dans l'espace, tout comme leur capacité à stocker et à transmettre les eaux souterraines. Ces caractéristiques hydrogéologiques "cachées" sont tout aussi importantes pour comprendre les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines dans la région.

La collecte de données souterraines est beaucoup plus difficile et coûteuse que les mesures de surface car elle nécessite des études géophysiques, le forage de puits pour recueillir des échantillons de roche, la mesure du niveau des eaux souterraines et des puits d'essai pour déterminer les propriétés hydrauliques de la roche qui régissent sa capacité à stocker et à transmettre les eaux souterraines.

31) Si la présence d'eaux souterraines est bien attestée par l'existence de sources, les connaissances sur l'origine et la nature de ces eaux souterraines étaient rudimentaires au début des travaux du DHI en 2017. Par conséquent, DHI a formulé des recommandations et des spécifications détaillées *pour une campagne intensive de collecte de données sur le terrain (in situ) pendant 6 mois, qui a ensuite été exécutée par la Bolivie avec des équipes d'enquête spécialisées supervisées par DHI et son sous-consultant*. Ces types de programmes de collecte de données sur le terrain sont réalisés pour comprendre la nature du système d'écoulement des eaux souterraines et sont appelés programmes de caractérisation hydrogéologique. Le travail sur le terrain s'est concentré sur le Champ Proche du Silala, car c'est la zone qui a été la plus affectée par les canaux et le drainage des zones humides et où les prédictions de modèle de ces impacts seront les plus sensibles aux niveaux d'eau et aux paramètres hydrauliques mesurés sur le terrain. Au total, 35 puits de surveillance ou piézomètres<sup>6</sup> ont été installés dans 29 puits forés sur et le long du cours des gorges et des zones humides du Silala en Bolivie (certains à des profondeurs de plus de cent mètres) (DHI 1; annexe F pp. 1-99, CMB, annexe 17). Un registre géologique d'échantillons de roche provenant des puits a été réalisé afin de comprendre les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du sous-sol.

32) Des mesures de l'élévation des eaux souterraines ont été obtenues à partir de piézomètres afin de comprendre les gradients et les schémas d'écoulement des eaux souterraines. Des

---

<sup>6</sup> Un piézomètre mesure le niveau d'eau (ou la hauteur piézométrique) des eaux souterraines à un endroit et à une profondeur spécifiques.

essais de forage et des puits ont été réalisés pour quantifier la capacité de la roche ignimbrite<sup>7</sup> à transmettre et à stocker les eaux souterraines.

- 33) Une vaste campagne de mesures du débit de surface a été réalisée le long de l'ensemble du réseau de canaux et combinée à des études détaillées des sources et des canaux de drainage individuel. Ces mesures et analyses permettent de comprendre où les eaux souterraines se déversent dans les eaux de surface et où les eaux de surface perdent de l'eau au profit des eaux souterraines, ainsi que de comprendre les contributions des différents tronçons du canal<sup>8</sup>.
- 34) Afin de compléter la compréhension des conditions des eaux souterraines et de surface, les données du programme de caractérisation hydrogéologique ont été combinées avec les données hydrogéologiques du Chili accessibles (Arcadis 2017, MC).
- 35) L'étude de caractérisation hydrogéologique a révélé un aquifère d'ignimbrite épais, latéralement étendu, hautement fracturé et hétérogène, capable de transmettre et de stocker de grands volumes d'eau. Par conséquent, cet aquifère est capable de maintenir un débit d'eau souterraine vers les sources et les écoulements de surface au fil du temps. Les élévations mesurées des eaux souterraines indiquent également que les eaux souterraines plus profondes s'écoulent vers le haut de l'aquifère en direction des zones humides du Nord et du Sud et que le gradient général (la pente de la nappe phréatique) est relativement raide en direction du Chili. Un tel gradient implique que les eaux souterraines qui ne sont pas déversées dans les eaux de surface ou les sources s'écouleront au-delà de la frontière.
- 36) À l'heure actuelle, la quantification du débit des eaux souterraines transfrontalières est approximative, mais on estime qu'il dépasse 230 l/s (voir les détails de l'estimation dans DHI 1, 2018, annexe F, p. 81) (CMB, Vol. 4, annexe 17). Affiner l'estimation des flux transfrontaliers d'eaux souterraines aurait nécessité des études géophysiques, des puits profonds supplémentaires, des tests de pompage et une compréhension géologique détaillée (c'est-à-dire une lithologie, une stratigraphie) obtenue par un programme plus étendu de caractérisation de la surface. Cependant, les contraintes de temps n'ont pas permis une telle extension du programme déjà intensif.
- 37) La méthodologie scientifique appliquée suit des approches techniques bien établies pour de telles études qui mettent l'accent sur la collecte de données hydrologiques et hydrogéologiques spécifiques au site. Les données in situ sont la base du modèle

---

<sup>7</sup> L'ignimbrite est une roche formée par des éruptions volcaniques explosives et déposée à haute température. Au Silala, les ignimbrites forment les principaux aquifères (masses de roches perméables qui peuvent contenir ou transmettre des eaux souterraines) de la région.

<sup>8</sup> Un tronçon d'un canal ou d'une rivière est une petite section d'un canal ou d'une rivière plutôt que sa longueur totale.

conceptuel<sup>9</sup> de l'hydrogéologie de la zone, qui constitue le cadre du développement d'un modèle hydrologique intégré utilisé pour analyser les flux d'eaux de surface et souterraines dans le Silala pour différents scénarios.

38) Pour analyser l'impact des canaux artificiels sur la baisse du niveau des eaux souterraines dans les zones humides du Silala et les impacts hydrologiques connexes sur le flux transfrontalier, DHI a développé un modèle hydrologique intégré du Champ Proche. Comme le montre la Schéma 4-1, le développement du modèle de Champ Proche a suivi les meilleures pratiques établies pour de tels modèles, à savoir :

- 1) Développement d'un modèle conceptuel et d'un modèle<sup>10</sup> numérique référentiel<sup>11</sup> cohérent avec les informations tirées des recherches sur le terrain et des études précédentes ;
- 2) Calibration du modèle (référentiel / ligne de base) pour reproduire les élévations des eaux souterraines et les débits de surface mesurés sur le terrain ;
- 3) Modification du modèle calibré (référentiel / ligne de base) pour représenter les zones humides du Silala dans leur état naturel (c'est-à-dire sans canaux et infrastructures connexes) afin de permettre une comparaison des flux non canalisés avec ceux du modèle de ligne de base).

---

<sup>9</sup> Un modèle conceptuel est une représentation simplifiée des principaux processus et caractéristiques d'un système, tel qu'un système hydrologique.

<sup>10</sup> Le modèle de Champ Proche est utilisé dans différentes configurations, chacune d'entre elles représentant un scénario à analyser : ligne de base (la situation actuelle); pas de canaux (similaire à la ligne de base mais sans canalisation) et non perturbé (sans canalisation et avec des couches de tourbe restaurées).

<sup>11</sup> Un modèle numérique est une représentation mathématique du modèle conceptuel qui est habituellement appliquée pour simuler d'abord les états mesurés et observés, par exemple d'un système hydrologique intégré, puis à calculer les impacts de différents changements (scénarios).

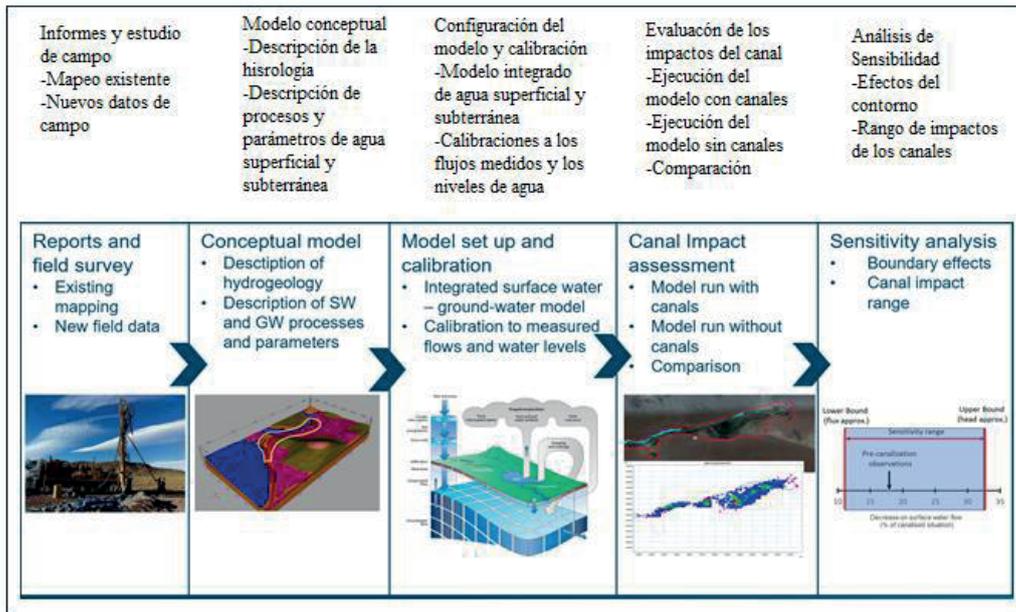


Schéma 4-1 Méthode d'évaluation de l'impact

- 39) La délimitation du domaine du modèle de Champ Proche (la zone simulée par le modèle) est fondée sur l'étendue du programme de caractérisation hydrogéologique et est limitée aux endroits où la géologie et l'hydrogéologie sont relativement bien connues.
- 40) En raison de la mesure du modèle de Champ Proche, les limites [contours] du modèle sont potentiellement affectées par les canaux. Par conséquent, les simulations ont été répétées en utilisant différentes conditions-cadres pour évaluer l'impact sur les prédictions du modèle. Le résultat de cette analyse de sensibilité est une limite supérieure et inférieure des impacts attendus sur les flux transfrontaliers.
- 41) Il est internationalement reconnu que les analyses et la quantification des impacts des structures artificielles sur les systèmes hydrologiques complexes sont mieux réalisées par l'application de modèles mathématiques intégrés que par de simples calculs analytiques manuels, tels que ceux produits par les experts du Chili, qui ne peuvent reproduire les complexités du monde naturel. Par conséquent, l'approche technique adoptée par DHI dans ce cas est considérée comme une pratique courante pour de telles enquêtes et, en fait, est exigée par les organismes de réglementation environnementale pour autoriser les projets d'infrastructure dans le monde entier.

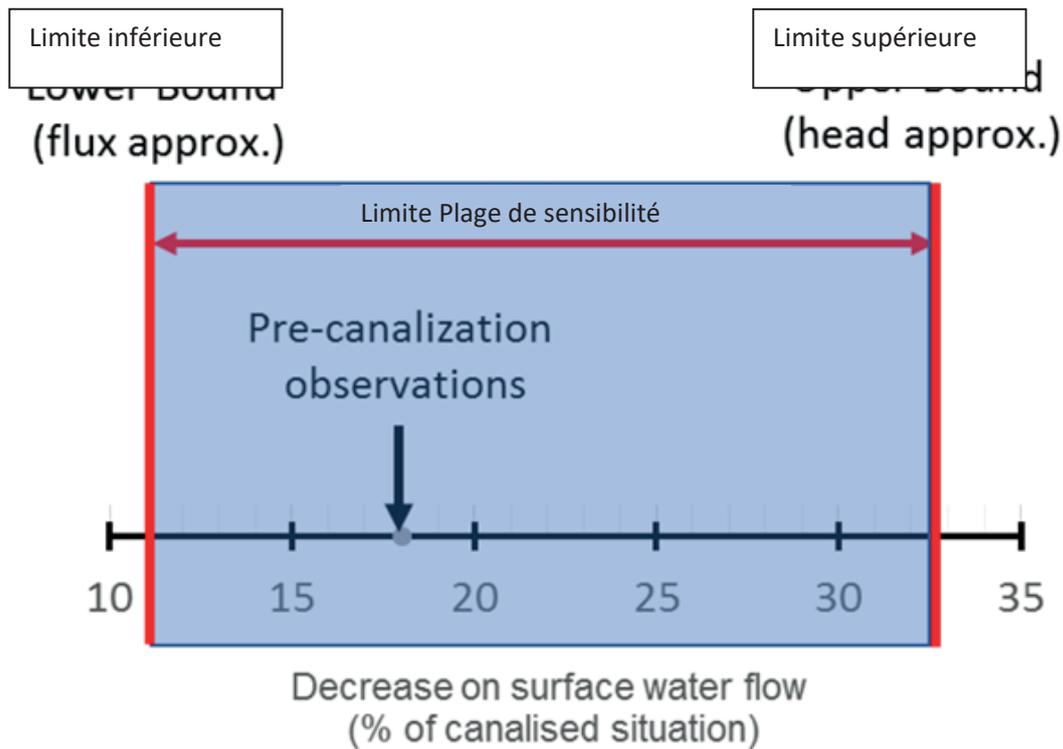


Schéma 4-2 Estimation de la baisse du débit des eaux de surface transfrontalières en cas de mise hors service des canaux et de restauration des zones humides

42) Nos analyses montrent qu'en raison de la canalisation artificielle des zones humides et des gorges, les eaux de surface qui traversent la frontière internationale ont augmenté et devraient diminuer de 11% à 33 % par rapport à la situation actuelle si les structures de drainage étaient démantelées et si les zones humides étaient restaurées dans leur état d'origine. Ce résultat est confirmé par les mesures effectuées par M. Fox, avant la canalisation, du débit des eaux de surface des zones humides non perturbées (Fox, R. H., 1922), qui était inférieur de 18% au débit moyen mesuré récemment (Schéma 4-2).

43) Les analyses chimiques de l'eau ont suggéré qu'une grande partie des eaux souterraines se déversant dans les sources du Silala et les eaux de surface ont eu de longs temps de résidence dans l'aquifère et se sont potentiellement infiltrées dans les sols il y a des milliers d'années (c'est-à-dire l'âge apparent de la datation au carbone  $^{14}$ <sup>12</sup>, voir la discussion sur les limites de ces méthodes dans DHI 1, 2018, annexe F CMB, Vol. 4, annexe 7). Un modèle plus grossier et à plus grande échelle du Champ Lointain a été développé, défini comme la meilleure estimation de l'étendue géographique du bassin de captation d'eau souterraine des sources du Silala en Bolivie, avec les objectifs suivants: 1) évaluer la probabilité que la source d'eau des sources du Silala soit susceptible d'être une ressource

<sup>12</sup> La datation au carbone 14: la radioactivité du carbone 14 présent dans les eaux souterraines sous forme de carbone inorganique dissous a été utilisée dans des études hydrologiques pour déterminer la date de la plus ancienne recharge des eaux souterraines depuis les années 1960.

renouvelable ou non et 2) vérifier que les temps de mouvement des eaux souterraines simulés dans l'aquifère étaient du même ordre de ampleur que les âges apparents<sup>13</sup> déterminés à partir des analyses du carbone 14. Ces âges devraient être similaires si les âges apparents sont quelque peu représentatifs de l'âge réel ou idéalisé des eaux souterraines<sup>14</sup> et si la compréhension conceptuelle du bassin de captation des eaux souterraines (le Champ Lointain) et des zones de recharge est correcte.

44) Les résultats du modèle de Champ Lointain confirment qu'une grande partie de l'eau qui se déverse dans la zone du Silala est âgée de milliers d'années, mais probablement pas aussi vieille que certains des âges apparents de la datation au carbone 14, ce qui suggère qu'il peut y avoir eu une certaine diminution du carbone 14 associée à des processus chimiques le long de la voie d'écoulement des eaux souterraines ou à un écoulement potentiellement interbassin dans le domaine de Champ Lointain ou à une combinaison de ces deux processus. Le modèle indique également que certains des rejets d'eau dans les sources auraient des âges moyens de la nappe souterraine inférieure, associés à une recharge localisée et à un régime d'eau souterraine localisé, conformément au modèle conceptuel (DHI 1, 2018, annexe F, p. 1-99 CMB, Vol. 4, annexe 17). Les simulations du modèle du Champ Lointain montrent que les précipitations sur le bassin de captation du Champ Lointain peuvent générer une recharge moyenne des eaux souterraines de 150 l/s à 370 l/s ou plus<sup>15</sup>. Cette recharge (également connue comme une ressource renouvelable) est interprétée comme étant légèrement supérieure aux mesures des eaux de surface transfrontalières (160-170 l/s). Cependant, il faut également tenir compte du débit transfrontalier des eaux souterraines, qui est estimé à 230 l/s ou plus pour un débit transfrontalier combiné de l'ordre de 390 l/s ou plus. Par conséquent, il n'est pas possible de déterminer de manière définitive si (a) le flux transfrontalier combiné correspond au taux de recharge moyen pour le Champ Lointain (c'est-à-dire 150 l/s à plus de 370 l/s) et constitue donc une ressource renouvelable; ou (b) si une partie du flux provient d'un système d'eaux souterraines plus grand (c'est-à-dire un flux interbassin); ou c) si une partie du débit est constituée d'eau souterraine non renouvelable qui s'est accumulée au cours d'une période climatique plus humide et qui s'évacue maintenant lentement de l'aquifère à mesure que l'élévation des eaux souterraines s'adapte aux conditions climatiques actuelles.

---

<sup>13</sup> Age apparent au carbone 14 : l'âge apparent est déduit de la datation au carbone 14 et représente l'âge maximal de l'eau souterraine dans l'échantillon. Comme le carbone 14 ne fait pas partie de la molécule d'eau, son activité et les âges interprétés au carbone 14 peuvent être affectés par des réactions entre les constituants dissous dans les eaux souterraines et les matériaux de l'aquifère, ce qui peut entraîner des âges apparents plus anciens que l'âge réel des eaux souterraines.

<sup>14</sup> Âge des eaux souterraines : l'âge des eaux souterraines est défini comme le temps écoulé entre la recharge de la nappe phréatique et le moment où les échantillons d'eaux souterraines ont été prélevés.

<sup>15</sup> Les chutes de neige sont fréquentes dans la région, mais sont difficiles à enregistrer dans les pluviomètres normaux, de sorte que les précipitations et, par extension, la recharge des eaux souterraines peuvent être sous-estimées.

## 5. POINTS D'ACCORD ENTRE LES EXPERTS DE LA BOLIVIE ET DU CHILI

- 45) La principale source d'eau de surface des sources du Silala est l'écoulement des eaux souterraines, et les eaux de surface (à l'intérieur et à l'extérieur des canaux) interagissent avec les eaux souterraines sous-jacentes le long de leurs parcours (DHI 1, 2018, point 9 CMB, Vol. 2, annexe 17; W&P 5, Vol. 1, p. 3 point 2).
- 46) Le Silala est de nature complexe et comprend un système couplé d'eaux souterraines et d'eaux de surface qui prend naissance sur le territoire bolivien (en amont) et s'étend au Chili (en aval) (DHI 1, 2018, p. 2 point 9, CMB, Vol. 2, annexe 17 ;W&P 5, Vol. 1, p. 3 point 2).
- 47) Le programme de caractérisation hydrogéologique a clairement identifié des couches géologiques d'épaisseur significative, des conductivités hydrauliques élevées<sup>16</sup> et des gradients<sup>17</sup> d'eau souterraine significatifs vers le Chili (DHI 1, 2018, p. 2, points 5-6 , CMB, Vol. 2, annexe 17 ; W&P 5, p. 3 point 3).
- 48) En général, les pentes de la nappe phréatique et du terrain sont importantes et la construction des canaux ne peut pas avoir changé la direction générale de l'écoulement des eaux de surface ou souterraines. Par conséquent, les données de terrain et les analyses des modèles du Champ Proche et du Champ Lointain suggèrent que l'eau qui s'évacue du bassin de captation du Silala (représentant l'évapotranspiration des sols, des zones humides et des canaux) s'écoule finalement vers le Chili sous forme d'eau souterraine ou de surface, avec ou sans canaux (DHI 3, 2019 p. 11 ; DB, Vol. 5, annexe 24 ; W&P 5, p.3).
- 49) Les experts des deux parties s'accordent à dire que les travaux de drainage de 1928 ont affecté les écoulements de surface à travers la frontière (W&P 3, p. 12) et ont conduit à une réduction des pertes d'eau directes par évapotranspiration et possiblement par infiltration. Par conséquent, l'évapotranspiration des zones humides augmentera si les canaux sont supprimés (DHI 3, 2019, p. 11, para. 5 ; DB, Vol. 5, annexe 24 ; W&P 5, p. 3 para. 3).
- 50) Les experts chiliens sont d'accord avec DHI pour dire que les travaux de drainage sur les zones humides ont réduit les nappes phréatiques (souterraines) dans les zones humides et les gorges du Silala. Ils conviennent également que l'augmentation des gradients hydrauliques et la réduction de la résistance hydraulique à travers les sources et

---

<sup>16</sup> La conductivité hydraulique est la mesure de la facilité relative avec laquelle l'eau peut s'écouler à travers les espaces poreux et les fractures.

<sup>17</sup> Un gradient, une pente ou un taux de changement de niveau d'eau décrit la différence de niveau d'eau entre deux points en relation avec la distance.

l'augmentation du débit des sources qui en résulte sont des effets plausibles de la canalisation. (W&P 3 pp. 11-14). L'augmentation du débit à travers les sources entraîne une augmentation du débit des eaux de surface transfrontalières. Nous sommes donc également d'accord sur le fait que le flux à travers la frontière a augmenté en raison des drains artificiels et de la canalisation (DHI 1, 2018, p. 2 point 10 ; CMB, Vol. 2, annexe 17 ; W&P 5, p. 3, point 4 et par. 2), mais le désaccord sur l'ampleur de cette augmentation persiste, comme détaillé ci-dessous.

51) Les estimations de l'ampleur de l'augmentation du débit des eaux de surface associée à la canalisation ne sont pas des données exactes. Il y a toujours une incertitude associée aux prédictions hydrologiques et hydrogéologiques (DHI 3, 2019, p. 7, par. 7 ; DB, Vol. 5, annexe 24).

52) Les experts du Chili conviennent également que le simple calcul manuel de Darcy du profil bas de l'impact des canaux de drainage présenté par les experts du Chili est insuffisant pour évaluer l'ampleur de l'impact des canaux (DHI 3, 2019, p. 7, paragraphe 8 ; DB, Vol. 5, annexe 24 ; W&P 5).

## **6. POINTS SUR LESQUELS LES EXPERTS DE LA BOLIVIE ET DU CHILI SONT EN DESACCORD**

### **6.1 L'impact de la canalisation sur les flux transfrontaliers**

53) Si bien les experts techniques du Chili et de la Bolivie s'accordent à dire que les flux d'eau de surface à travers de la frontière ont augmenté en raison du drainage des zones humides, l'ampleur de ce changement est contestée.

Les experts du Chili l'évaluent comme négligeable, mais n'ont présenté qu'une analyse très simplifiée pour étayer leur position – une analyse dont ils ont ensuite admis qu'elle n'était pas suffisante pour quantifier un impact de ce type (W&P 5, p. 4). Contrairement à DHI, les experts du Chili n'ont pas effectué de recherches sur le terrain dans les bofedales boliviens.

L'analyse du DHI démontre que la canalisation a considérablement augmenté les flux de surface vers le Chili. DHI a mené plusieurs missions de recherche et de collecte de données dans les zones humides du Silala en Bolivie et fonde son estimation sur un vaste programme de caractérisation in situ, sur des analyses détaillées du modèle numérique basées sur des données in situ (approche normalement appliquée pour de telles analyses) et sur des mesures de débit historiques et actuelles sur le site.

54) Les experts du Chili ont déclaré que les conditions-cadre originales du modèle n'étaient pas adaptées aux conclusions du DHI. DHI convient qu'en raison des limitations du programme de caractérisation sur le terrain, les contours du modèle sont potentiellement affectés par les canaux. Par conséquent, plusieurs simulations différentes du modèle ont été effectuées pour évaluer comment les contours affectent les prédictions du modèle des flux transfrontaliers avec et sans canalisation, respectivement.

Le résultat de l'analyse est que si les canaux sont démantelés et que les zones humides sont restaurées à leur état naturel, les flux d'eau de surface transfrontaliers devraient diminuer de 11% à 33 %.

55) Les conditions-cadres testées comprennent *à la fois* un scénario de contour supérieur (pression constante le long des contours du débit d'entrée) qui entraînera des différences de débit estimées dans le contour supérieur (33%) et un scénario de contour inférieur (contour de débit constant), qui est considéré comme conservateur dans le sens où il est probable de sous-estimer la différence de débit (11%). Par conséquent, il faut supposer que le résultat le plus correct se situe quelque part entre les contours supérieur et inférieur.

56) Les seules observations du débit du Silala avant la canalisation, 131 l/s (Fox 1922), sont inférieures de 18% aux observations moyennes actuelles (160 l/s). Ceci est cohérent avec la gamme de résultats du modèle de Champ Proche (par. 55).

57) Les experts du Chili réfutent la mesure de l'ingénieur Fox et remettent en question l'exactitude et la fiabilité de sa mesure, arguant que même aujourd'hui, il semble difficile de mesurer les flux. Cependant, Fox a passé beaucoup de temps à étudier les conditions et la planification des travaux, de sorte que ses conclusions sauraient être rejetées. De plus, DHI est convaincu que la plupart des problèmes liés aux relevés de débit du Silala proviennent de problèmes liés aux équipements automatiques (maintenant installés sur les sites) ou à des opérateurs de compteurs mal formés. Il est possible que Fox ait utilisé des méthodes manuelles pour mesurer le débit. Ces méthodes sont connues depuis de nombreuses années, et Fox cite le débit avec une précision à trois chiffres<sup>18</sup> et qu'il présente de "très légères variations". Cela signifie qu'il a effectué plusieurs mesures cohérentes sur une période donnée. De plus, Fox, en tant qu'ingénieur professionnel responsable de la conception des nombreux kilomètres de tuyauterie, devait pouvoir se fonder sur des mesures précises. Il a même effectué des analyses chimiques assez détaillées de l'eau du Silala, ce qui, selon nous, n'était pas la norme au début du siècle XX. DHI conclut donc qu'il semble hautement improbable qu'il n'ait pas effectué correctement ces mesures cruciales et que leur validité doit donc être reconnue.

---

<sup>18</sup> Il est de bonne pratique technique que le nombre de chiffres reflète la précision présumée de la mesure.

- 58) Les experts du Chili contestent également l'endroit où les mesures de Fox ont été prises. DHI estime que leur description est suffisamment précise pour localiser leur site de surveillance dans la gorge près du barrage actuel, à environ 600 m en amont de la frontière. Cet emplacement se trouve dans un tronçon du gorge où, selon des mesures récentes (DHI 1, 2018, p. 23, Schéma 13 ; CMB, Vol. 2, annexe 17), le débit ne varie pas beaucoup. Par conséquent, les observations peuvent être considérées comme représentatives des flux de surface traversant la frontière dans des conditions naturelles sans réseau de drainage artificiel.
- 59) L'ampleur des modifications estimées sur les eaux de surface traversant la frontière est tout à fait cohérent avec les observations de débit réalisées dans antérieurement à la canalisation. Pourtant les experts du Chili contestent ce changement significatif tel qu'il ressort des analyses et des observations sus mentionnées.
- 60) Les zones humides du Silala en Bolivie ont été largement drainées, disséquées, altérées et, par conséquent, leur étendue a été réduite. Les sols se sont asséchés, les dépôts de tourbe ont été excavés et enlevés, et la végétation native des zones humides a été remplacée par des herbes envahissantes caractéristiques des zones à faible teneur en humidité et d'eaux souterraines plus profondes (Schéma 3-3 et Schéma 6-1). DHI considère qu'il s'agit d'un changement écologique significatif de la zone humide Ramsar.

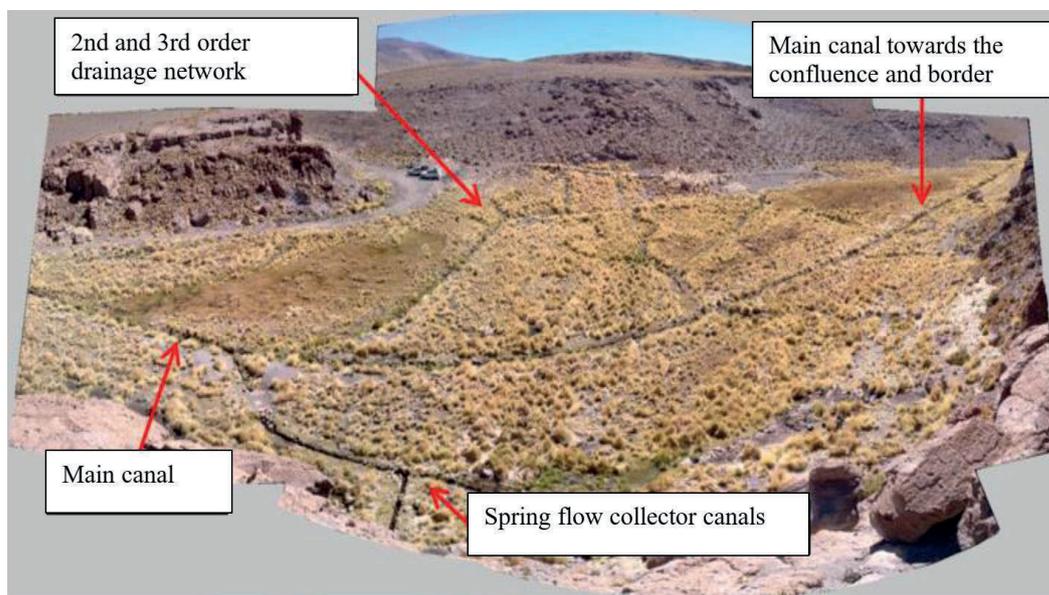


Schéma 6-1 Photographie aérienne d'ensemble du canal de la zone humide nord.

## 6.2 Points de désaccords entre les experts de la Bolivie et du Chili sur les méthodologies utilisées et les résultats obtenus

61) Les experts techniques du Chili comparent les estimations de l'évapotranspiration par télédétection de la petite zone humide voisine non perturbée de la Quebrada Negra, du côté chilien de la frontière, avec les deux zones humides du Silala en Bolivie. Comme les estimations (W&P 3, p. 41) semblent indiquer des taux d'évaporation plus élevés dans les zones humides boliviennes que dans les zones humides chiliennes, les experts du Chili concluent que la canalisation en Bolivie "ne semble pas avoir eu un effet significatif sur les taux d'évapotranspiration". DHI n'est pas d'accord avec cette conclusion, car elle compare trois zones humides, chacune avec des conditions d'eaux souterraines (et de climat) différentes. Il est en outre évident que les satellites ne peuvent pas observer les conditions initiales, non canalisées, dans les zones humides du Silala en Bolivie, plusieurs années après la mise en œuvre de la canalisation. De plus, la formule de calcul ne semble pas prendre en compte l'évaporation des surfaces d'eau libre qui constituerait une part importante de l'évapotranspiration dans le cas des zones humides non perturbées du Silala. Enfin, les taux d'évapotranspiration estimés pour Quebrada Negra non perturbée ne représentent qu'environ 50% des valeurs potentielles citées (CR Vol 3, p. 151, Muñoz & Suárez 2019, p. 61) ; cela est inférieur à ce que l'on pourrait attendre d'une zone humide naturelle où l'eau est abondante. Cependant, il est frappant de constater que les sous-zones au sein des zones humides que les experts du Chili associent à des taux d'évapotranspiration élevés (CR Vol 3, p. 153, Muñoz & Suárez 2019A, p. 63) correspondent à des sous-zones relativement moins drainées et plus caractéristiques des bofedales naturelles restantes. Cela contredirait la conclusion des experts du Chili.

62) Selon les experts du Chili, le modèle du Champ Proche du DHI ne peut être utilisé pour prédire l'impact des drains et des canaux artificiels *car* :

- Il ne reflèterait pas l'hydrogéologie (par exemple, le modèle n'intègre pas les aquifères perchés<sup>19</sup> tels qu'identifiés au Chili). DHI n'est pas d'accord car aucun aquifère perché n'a été identifié par aucun des nombreux puits hydrogéologiques forés et étudiés dans la zone modèle. En outre, DHI fait valoir que le modèle est construit et calibré à l'aide d'une grande quantité de données de terrain *recueillies sur le site*, tant en surface que dans le sous-sol. Le modèle reproduit les schémas d'écoulement des eaux souterraines, les gradients hydrauliques et les taux de décharge observés dans les zones humides du Sud et du Nord, ainsi que les débits de surface mesurés dans tout le système en Bolivie.

---

<sup>19</sup> Un aquifère perché se produit lorsque l'eau infiltrée est interceptée par une couche ou une lentille de faible perméabilité, ce qui entraîne une accumulation d'eau au sommet de la lentille de faible perméabilité, au-dessus de la nappe phréatique principale.

- La zone du modèle serait trop petite et ne couvrirait qu'un petit pourcentage du bassin de captation versant. DHI n'est pas d'accord. Le domaine du modèle couvre le Champ Proche, où les données de terrain ont été collectées et, plus important encore, où la plupart des impacts hydrologiques se sont produits. DHI admet qu'il existe certains effets de contour<sup>20</sup>, mais des analyses de sensibilité ont été appliquées pour tenir compte des effets qui donnent lieu à des prédictions de contour supérieur et inférieur. Comme indiqué, les experts du Chili n'ont pas effectué d'études sur le terrain dans la zone concernée et n'ont pas non plus développé de modèles numériques pour reproduire les conditions hydrologiques et hydrogéologiques mesurées sur le terrain.

63) La réinterprétation du modèle hydrogéologique conceptuel des experts du Chili (W&P 4, 2019) s'écarte du modèle conceptuel du DHI en termes d'étendue latérale de l'aquifère ignimbrite au-delà de la zone immédiate des gorges du Silala et ignore les observations géologiques et la datation de l'âge des unités rocheuses complétées in situ en Bolivie. Par conséquent, la stratigraphie<sup>21</sup> au-delà de la zone immédiate des gorges est contestée. DHI rappelle que le plus petit modèle a été délibérément limité aux zones du Champ Proche qui pourraient être raisonnablement bien représenté et où les impacts de la canalisation sont les plus importants. Il est peu probable que la stratigraphie en dehors du domaine du modèle modifie de manière significative les prédictions modélisées des impacts hydrologiques des canaux et des drains artificiels. En outre, une faille coïncidant avec la gorge du Silala, qui était précédemment incluse dans le modèle conceptuel du Chili, a maintenant été supprimée sans explication (Arcadis, 2017). En outre, les experts du Chili tentent d'extrapoler à la Bolivie leurs conclusions sur les aquifères perchés du Chili, alors qu'un programme intensif de caractérisation hydrogéologique n'a pas permis d'identifier d'aquifères perchés.

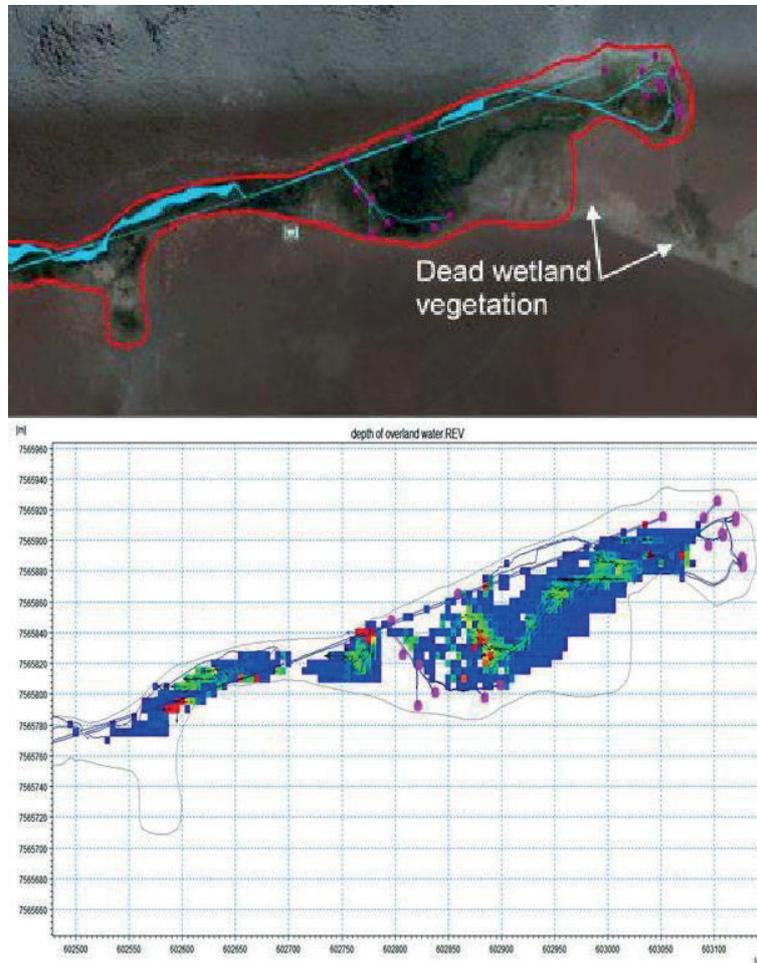
64) Le modèle de Champ Proche du DHI est basé sur des preuves de terrain et a été calibré pour refléter les modèles d'écoulement des eaux souterraines sur le terrain. Il reproduit de manière fiable les données prises in situ. Un exemple est la simulation du schéma d'écoulement de surface dans la zone humide sud qui a été partiellement restaurée en bloquant les canaux, ce qui démontre que les zones humides retiennent l'eau en surface lorsque les canaux sont inactifs (Schéma 6-2).

---

<sup>20</sup> C'est-à-dire où les conditions le long de la frontière du modèle affectent les résultats.

<sup>21</sup> La stratigraphie désigne l'ordre et la position relative des strates et leur relation avec l'échelle des temps géologiques.

- 65) Les experts du Chili remettent en question le cadre hydrogéologique du modèle de Champ Proche, les propriétés hydrauliques attribuées, la cohérence interne entre les ensembles de données utilisés et la pertinence de l'approche de modélisation adoptée dans l'étude. DHI a évalué, expliqué et répondu aux questions techniques soulevées par les experts du Chili et a conclu que l'approche, les propriétés et les hypothèses du DHI sont valables. Ces désaccords sont développés au chapitre 7 ci-dessous.
- 66) Il n'existe pas de modèle parfait ; il s'agit par nature d'une simplification du monde naturel complexe et les prédictions comportent donc un certain degré inhérent d'incertitude. Cependant, DHI a analysé comment les hypothèses clés ou les limitations du modèle affectent les prédictions du modèle et rend compte d'une variété d'impacts hydrologiques potentiels basés sur ces analyses. Les limites du modèle sont largement pris en compte et les organismes de réglementation demandent et acceptent fréquemment le type d'analyses présentées par DHI pour les évaluations de l'impact hydrologique.
- 67) Les experts du Chili supposent que les divergences ou inexactitudes locales dans les données d'entrée du modèle de Champ Proche entraînent de graves erreurs unilatérales qui entravent les résultats du modèle et le disqualifient dans l'évaluation de l'impact. Mais, DHI estime que le modèle calibré basé sur des données réelles de terrain fournit la meilleure base et, avec les observations in situ de l'ingénieur Fox sur l'écoulement des eaux de surface non perturbées avant la canalisation, reste le meilleur outil disponible pour évaluer l'impact de la canalisation sur l'écoulement des eaux de surface, indépendamment des inexactitudes mineures ou des incertitudes inhérentes à tous les modèles.
- 68) À titre de comparaison, les experts du Chili ont présenté un calcul manuel simplifié pour faire valoir que l'impact de la canalisation serait 20 fois moins important que celui prévu par le modèle intégré développé par DHI. Le calcul se fonde sur un profil d'écoulement des eaux souterraines idéalisé et uniforme (en une dimension) qui ne reflète en aucune façon les conditions du site du Silala. Dans des observations ultérieures à la Cour, les experts du Chili ont expliqué qu'un tel calcul simplifié n'était pas adapté à la quantification de l'impact et n'avait pour but que d'illustrer l'effet des conditions limites (W&P 5, p. 4). Néanmoins, le Chili continue de citer le facteur 20 pour prétendre que les impacts du DHI sont surestimés.



*Schéma 6-2 Schéma montrant comment les débits et les inondations simulés par le modèle de Champ Proche (image du bas), reflètent les débits de surface réels dans la zone humide du sud (représentés par des zones vert foncé sur l'image satellite ci-dessus). En outre, des zones dégradées (sèches) de la zone humide d'origine avec une végétation de tourbière morte sont clairement visibles en gris clair sur l'image satellite. L'image montre la situation actuelle de la zone humide du sud, où le flux a été obstrué dans plusieurs canaux. Cela a fait monter le niveau de l'eau dans les canaux (et les eaux souterraines) et la zone humide a commencé à se transformer pour retrouver son état d'origine avec des sols tourbeux saturés et des eaux de surface se déplaçant lentement (les zones vertes foncées sur l'image et dans le diagramme ci-dessous). Ce schéma d'écoulement, généré par le blocage des flux dans les canaux de drainage, est la preuve que l'assèchement de la zone humide a été causé par les structures de drainage artificielles.*

## **7. DISCUSSION TECHNIQUE DÉTAILLÉE SUR LES POINTS DE DÉSACCORD**

- 69) Ce chapitre présente des arguments plus techniques concernant les critiques des experts du Chili sur l'analyse du DHI et inclut un langage et des formulations plus techniques sur les points de désaccord résumés ci-dessus.
- 70) Les experts du Chili affirment que le seul impact des canaux est une modification de surface des zones humides et que les taux d'évapotranspiration ne représentent qu'un changement mineur du débit des canaux. Selon les résultats du modèle DHI de Champ Proche, le changement de flux *total* des eaux souterraines et de surface à travers la frontière peut être limité, mais les canaux ont augmenté le flux des eaux de surface et par conséquent réduit le flux des eaux souterraines. Le débit transfrontalier estimé des eaux de surface provenant des zones humides naturelles non canalisées est donc inférieur de 11 % à 33 % par rapport à la situation actuelle (DHI 4, 2019, p.8 DB, Vol. 5, annexe 25). Dans les sections 6.2 à 6.3 ci-dessous, nous exposons plus en détail les réserves des experts du Chili sur le modèle.

### **7.1. Le bilan hydrique : les modèles de Champ Lointain et de Champ Proche**

- 71) DHI a développé et appliqué trois modèles différents pour comprendre, décrire et analyser l'hydrologie du Silala :
- a. Un modèle de bilan hydrique (modèle MBH ou modèle de Champ Lointain) pour l'analyse de la recharge et de la durabilité;
  - b. Un modèle détaillé de la section Confluence-Frontière pour des études d'infiltration détaillées;
  - c. Un modèle de Champ Proche (NFM) pour les évaluations d'impact des canaux et des réseaux de drainage.
- 72) Les modèles sont indépendants et sont utilisés à des fins différentes. Par conséquent, c'est un contresens lorsque les experts du Chili supposent qu'ils sont liés et que les conditions (-cadres) aux limites sont transférées ou coïncident.

- 73) Le modèle de bilan hydrique a été établi avant l'achèvement du programme de caractérisation hydrogéologique détaillée du Champ Proche. Par conséquent, il s'est fondé sur des informations géologiques éparses et des données préliminaires pour le contour aval dans la zone de Champ Proche (DHI 1, 2018, annexe E, p. 20 CMB, Vol. 3, annexe 17). Ces conditions (-cadres) aux sont cependant suffisantes pour établir des bilans hydriques.
- 74) Les experts du Chili laissent entendre que DHI part du principe que les simulations des 49 dernières années sont représentatives des variations climatiques des 5 000 dernières années. Ce n'est pas le cas, nous considérons qu'elles sont représentatives du climat *actuel*. C'est le climat *actuel* qui importe pour évaluer les débits du Silala comme étant une ressource renouvelable ou non (paragraphe 44).
- 75) Cependant, il est vrai que nous avons utilisé le climat actuel comme la meilleure estimation du climat préhistorique pour évaluer si le bassin de captation présumé d'eau souterraine (le Champ Lointain) et les informations hydrogéologiques générales disponibles pour ce modèle sont compatibles avec l'âge ancien observé de l'eau de source. Nous avons calculé les temps de parcours des eaux souterraines dans le Champ Lointain et avons trouvé des temps de déplacement de l'ordre de milliers d'années (ce qui, selon nous, fait du Champ Lointain un bassin de captation des eaux souterraines).

## **7.2. Étendue de la zone du modèle de Champ Proche et conditions aux limites attribuées**

- 76) Des experts du Chili ont remis en question l'étendue spatiale limitée du modèle de Champ Proche. Cependant, la zone modélisée (le Champ Proche) comprend toutes les zones humides, les canaux et les réseaux de drainage. Les impacts du canal sont simulés par les processus hydrologiques dans cette zone de modélisation. Les experts du Chili continuent de prétendre que la zone est trop petite pour une évaluation d'impact (W&P 5, p. 40).
- 77) La taille du modèle de Champ Proche a été choisie car elle constitue une zone pour laquelle il était possible de collecter suffisamment de données hydrogéologiques pour former une base adéquate pour la modélisation hydrogéologique, étant donné les contraintes temporelles. Notre modèle hydrogéologique conceptuel et le modèle du Champ Proche sont tous deux basés sur les données tirées d'une campagne intensive de forage et d'essais sur

le terrain (comprenant plus de 35 piézomètres) dans le Champ Proche du Silala (analyse de la stratigraphie, des caractéristiques hydrauliques, des niveaux et des gradients des eaux souterraines).

78) Comme pour tous les modèles d'eau souterraine, les conditions (-cadres) pour le modèle de Champ Proche sont approximatives. Une délimitation unique de l'étendue exacte des segments de contour ouverts et fermés n'est pas possible, mais les contours sont généralement décrits par rapport aux données du niveau potentiel. Partout où le gradient des eaux souterraines est parallèle à la limite d'un modèle, les eaux souterraines s'écouleront parallèlement au contour et, dans de telles situations, peuvent être considérées comme des contours fermés (par opposition aux contours ouverts). Dans le modèle de Champ Proche, des contours fermés ont été introduits là où c'est approximativement le cas.

79) Les experts du Chili soulignent que le long d'un segment de ces contours, l'écoulement des eaux souterraines peut être presque parallèle au contour. Nous trouvons toujours que l'approximation est tout à fait raisonnable, compte tenu également du fait que le segment du contour sud remis en question est associé à de faibles perméabilités, c'est-à-dire à un écoulement limité.

80) Pour explorer les effets potentiels de la zone du modèle et les conditions (cadres), DHI a effectué une analyse de sensibilité. Nous notons que les experts du Chili conviennent que l'approche utilisée dans l'analyse de sensibilité représente les contours supérieurs et inférieurs de l'évaluation d'impact (W&P 5, p. 42).

### **7.2.1 Représentation du flux de surface du modèle de Champ Proche**

81) Les différences entre les deux schémas d'écoulement ont été détaillés ci-dessus (Schéma 3-3). Les conditions d'humidité et d'évaporation du sol étant différentes dans les deux situations, le modèle doit refléter ces différences. L'approche de modélisation intégrée des eaux de surface et des eaux souterraines pour évaluer les impacts des canaux est simple. Le système actuel des sources du Silala est modélisé d'abord avec les canaux artificiels existants (modèle de base) et ensuite sans les canaux (modèle sans canaux). La configuration du modèle est modifiée en supprimant la composante unidimensionnelle du débit des canaux (car il n'y a pas de canaux à l'état naturel) et les différences entre les débits simulés dans les scénarios de base et sans canaux sont comparées. Les experts du Chili affirment que des modèles différents sont utilisés pour le scénario avec canaux et le scénario sans canaux

et que, en ne tenant pas compte du modèle de flux canalisé, ils ne sont « pas directement comparables ». Il semble assez évident que les impacts hydrologiques associés aux canaux correspondent à la différence entre les scénarios du modèle avec et sans canaux. Critique cette approche est quelque peu surprenante et contradictoire.

82) Le cadre de modélisation DHI et l'approche de modélisation reflètent la tâche à accomplir, à savoir évaluer les impacts de la suppression des canaux entraînant un changement dans le régime d'écoulement, dans la mesure où l'écoulement souterrain et l'écoulement de surface bidimensionnel deviennent plus dominants. Par conséquent, l'approche du modèle a été soigneusement choisie pour atteindre l'objectif visé.

83) Les experts du Chili affirment que le modèle ne décrit pas la "réalité" (W&P 5, p. 47). DHI montrent qu'il décrit la réalité observée, mesurée et décrite par le modèle conceptuel et numérique. Cela dit, le modèle *est* une simplification en ce qui concerne la résolution spatiale et les processus physiques du système. Ceci est vrai pour tous les modèles et, comme pour tous les modèles, il y aura un certain degré d'incertitude par rapport aux données d'entrée et aux paramètres du modèle, ce qui se traduit par une incertitude anticipée. Toutefois, c'est le cas pour tout modèle et cela ne le disqualifie donc pas comme outil d'évaluation d'impact.

84) Même un modèle informatique avancé est une simplification par rapport au système naturel (par exemple, la variabilité à petite échelle) et pourtant, en utilisant les données du programme complet de collecte de données sur le terrain, il fournit le meilleur outil d'évaluation quantitative disponible et est supérieur aux calculs manuels qui manquent de données spécifiques au site.

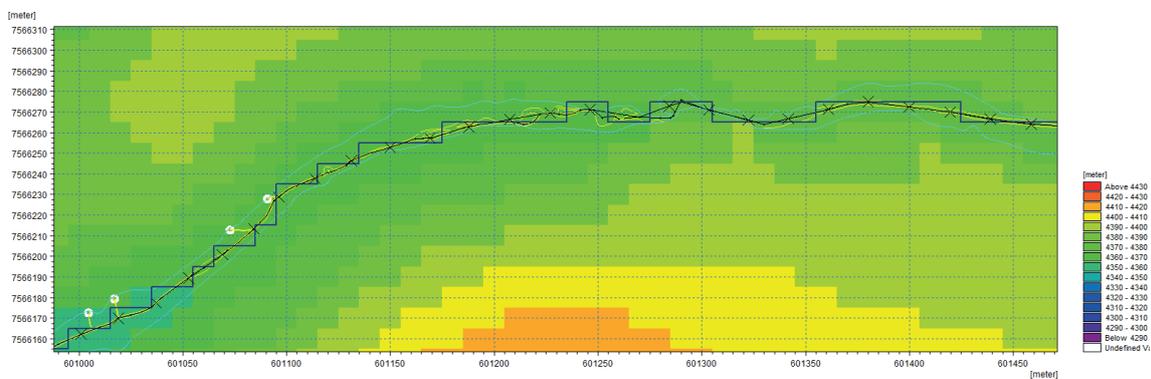
### **7.3 Les différences topographiques entre le canal et le terrain**

85) Les experts du Chili décrivent les différences topographiques entre le terrain et les canaux et entre les terrains dans les scénarios du modèle. Pour expliquer comment les données sont utilisées et représentées dans le modèle intégré, il est nécessaire d'expliquer comment le logiciel de modélisation largement utilisé (MIKE SHE- MIKE11) combine les données d'élévation de la surface et du canal.

86) Pour résumer la description détaillée disponible dans les manuels du logiciel, MIKE SHE utilise différentes résolutions dans les données topographiques pour la composante de l'écoulement en canal et la composante de

l'écoulement en surface. Dans le cas du modèle de Champ Proche du Silala, le modèle MIKE SHE découpe et analyse les canaux en sections d'une dizaine de centimètres et l'écoulement de surface est reporté sur une grille de 10 m x 10 m, ce qui est courant dans la modélisation numérique et est appelé discrétisation<sup>22</sup>.

- 87) Les échanges entre l'eau du canal et l'eau de surface a lieu numériquement au niveau des contours des cellules de la grille (Schéma 7-1). C'est-à-dire que, bien que le canal soit situé au milieu de la cellule, l'échange d'eau se produit à la limite de la cellule, une simplification qui est nécessaire dans tous les modèles MIKE-SHE.



*Schéma 7-1 Zoom avant de la méthode MIKE SHE de cartographie de la topographie du bassin de captation du Silala et du réseau de canaux sur les éléments de grille du modèle, les liens fluviaux alignant les cellules de la grille. Le réseau de canaux est cartographié aux bords des cellules de la grille comme des liens de canaux. La géométrie de ces liens est interpolée à partir du réseau de canaux sur les liens de canaux.*

- 88) Le Schéma 7-2 montre la relation entre la topographie utilisée dans la composante écoulement de surface MIKE SHE et la topographie utilisée dans la composante d'écoulement canalisé de MIKE SHE, MIKE 11. La topographie utilisée dans MIKE SHE pour la grille bidimensionnelle d'écoulement de surface (10 mx 10 m) est indiquée par les deux lignes noires horizontales.

<sup>22</sup> Dans la modélisation numérique, la discrétisation est le processus qui consiste à transposer des données continues en éléments discrets (grille du modèle) afin de les rendre adaptées à une solution numérique par ordinateur.

- 89) Les informations topographiques utilisées pour calculer le débit du canal sont intégrées dans la section transversale (ligne bleue). A titre d'illustration, la section transversale la plus proche du canal est représentée par les élévations des deux cellules adjacentes à la liaison du canal qui est incluses dans les calculs de transfert de flux. Dans le modèle numérique, la géométrie du canal à chaque bord est interpolée à partir des sections transversales réelles.
- 90) L'échange de flux entre le canal et la surface dépend du niveau d'eau dans le canal. Au fur et à mesure que le niveau d'eau dans le canal s'élève, l'eau déverse du canal dans la cellule de surface adjacente, lorsque le niveau d'eau du canal dépasse le plus élevé des niveaux des berges du canal ou des cellules de surface. Si, comme dans le cas illustré au Schéma 7-2, la topographie de la surface est plus élevée que le niveau des berges du canal, l'eau s'écoulera d'abord du canal vers la surface lorsque le niveau de l'eau atteindra la plus basse des deux cellules situées de part et d'autre de la liaison du canal. Par conséquent, le canal débordera sur la plus basse des deux banques de canaux (la gauche ou la droite) - ce que les chiffres du Chili ne reflètent pas.
- 91) Les experts du Chili affirment que la topographie utilisée dans les scénarios "Pas de canal" et "Pas de perturbation" est trop différente de celle utilisée dans le scénario de base pour donner des résultats fiables et ont pris quatre exemples pour illustrer ce propos. Cependant, les exemples révèlent certaines incompréhensions quant au traitement de la topographie par le modèle. Les différences sont beaucoup plus faibles que celles rapportées par le Chili. Il est courant pour les modèles à différences finies, et ce n'est pas spécifique à la configuration du modèle du Silala ou au logiciel de modélisation MIKE SHE, de représenter les données topographiques d'entrée à une résolution spatiale représentée par la taille de la cellule de grille (c'est-à-dire que la topographie est moyennée pour chaque cellule de grille de 10 mx 10m).
- 92) L'élévation est une valeur moyenne sur la cellule de la grille, ce qui signifie que les élévations de la topographie sont généralement plus élevées que les élévations de la section transversale du canal dérivées du modèle numérique d'élévation à plus fine échelle. Chile compare le niveau topographique à un nœud de cellule de grille unique avec les élévations du canal. Cependant, le modèle relie un segment de canal par des liens de canal le long du bord de deux cellules de grille voisines. Ces deux cellules voisines (côté gauche et côté droit) ont des niveaux topographiques différents. Cela signifie que les différences d'élévation apparentes dessinées dans les schémas du Chili sont exagérées et ne sont pas représentatives du fonctionnement du modèle.

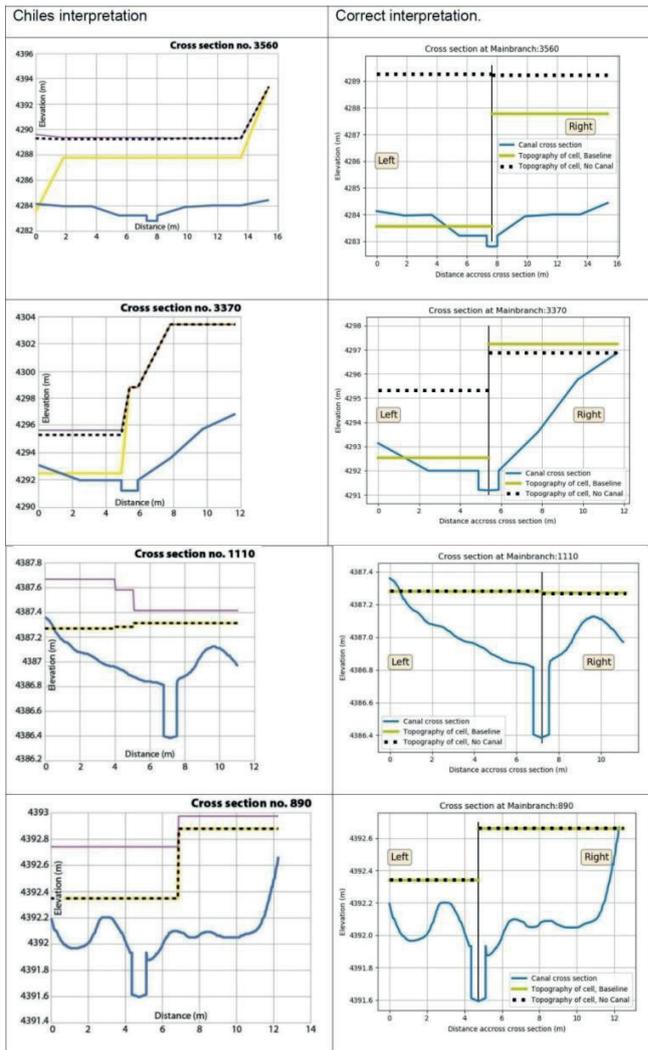
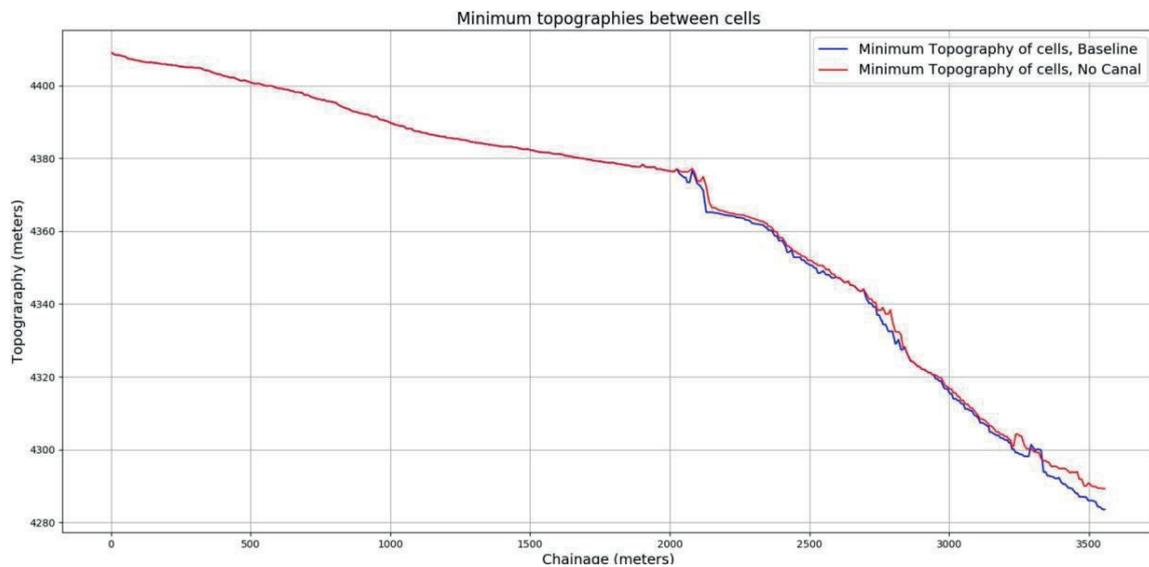


Schéma 7-2 Schémas de coupes transversales comparant l'interprétation du Chili à gauche et la représentation correcte à droite.

93) Le schéma 7-2 montre les différences entre la représentation par les experts du Chili à gauche et la représentation correcte selon le logiciel de modulation MIKE SHE à droite. Toute différence de topographie doit être mesurée en partant du niveau inférieur des deux cellules, car c'est lui qui détermine l'endroit où l'écoulement de surface se produit en premier lorsque l'eau déborde de la plaine d'inondation depuis le canal, comme décrit ci-dessus. L'examen d'une seule cellule est trompeur, et la colonne de droite du schéma 7-2 montre que, par rapport au point le plus bas, les différences sont beaucoup plus faibles. De plus, si l'on considère l'ensemble du modèle, la différence

moyenne entre l'élévation de la topographie et l'élévation du lit du canal est inférieure à 1 mètre.



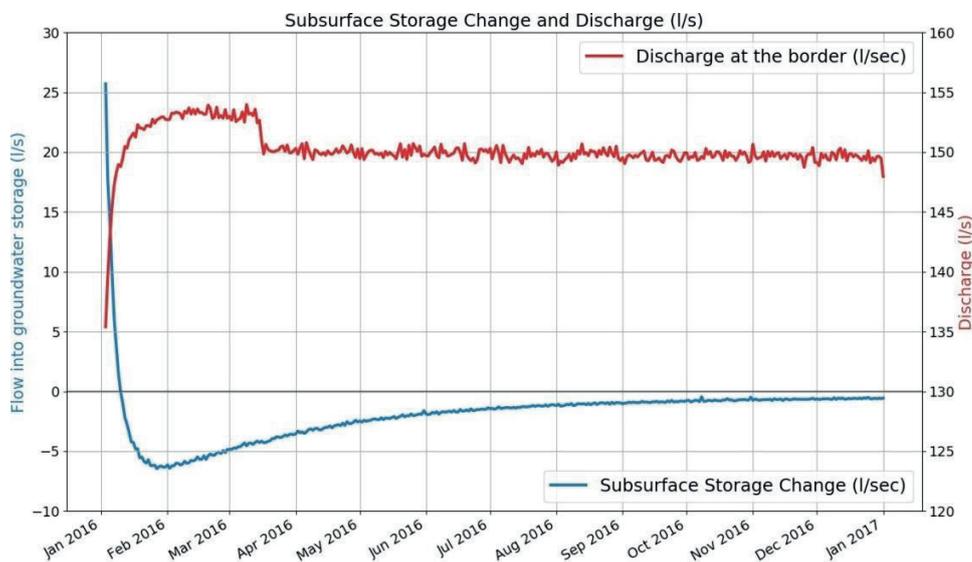
*Schéma 7-3 Profil longitudinal de la topographie le long de la voie d'écoulement depuis la zone humide sud jusqu'à la frontière pour le scénario de base et le scénario sans canal. Les niveaux topographiques font référence à l'élévation du point le plus bas à des endroits spécifiques.*

94) Le schéma 7-3 montre les différences de topographie par rapport à la pente globale. Avec et sans ajustement des élévations des sections transversales des canaux, des différences localisées modérées peuvent être observées, principalement immédiatement en amont de la frontière où des modèles topographiques plus fins et plus approximatifs se rejoignent. D'après les mesures et les résultats du modèle, le débit du canal ne change pas de manière significative entre la confluence du canal et la frontière avec le Chili, et les différences topographiques ne modifient pas la pente générale du canal ni la direction du débit.

95) Les experts du Chili ont signalé l'utilisation de noms de fichiers différents pour les données d'entrée topographiques du modèle dans les scénarios de base et sans canal. Nous les remercions d'avoir attiré notre attention sur ce point. Les différences de topographie sont mineures et limitées à une petite zone près de la frontière.

### 7.3.1 Les séries de modèles stationnaires atteignent l'équilibre

96) Les experts du Chili affirment qu'il y a une différence dans les niveaux initiaux d'eau souterraine entre les scénarios et que les niveaux d'eau souterraine n'ont pas complètement atteint l'équilibre à la fin de la simulation de base. Le schéma 7-4 montre le développement du stockage des eaux souterraines ainsi que le développement de l'écoulement de surface à la limite. Il est clair qu'après 3 mois, les deux courbes sont indépendantes des conditions initiales. Il est vrai que le stockage des eaux souterraines change encore légèrement, de l'ordre d'environ 3 l/s après 3 mois. Plus important encore, l'écoulement à la frontière est en équilibre. Toutefois, pour vérifier ces résultats, la même simulation a été reconduite sur un an. Les résultats présentés au schéma 7-4 montrent clairement que le débit de surface à la limite à la fin de la simulation n'a pas changé par rapport au résultat après 3 mois et que la variation du stockage souterrain est proche de zéro (0,6 l/s). Le renouvellement du stockage après trois mois est déjà intégré dans les marges d'erreur du tableau de résultats. Puisque l'écoulement de surface à la limite est équilibré, les résultats sont toujours valides.



*Schéma 7-4 Résultat de la même simulation que le modèle de base, mais étendue à un an. Tracé de la variation du stockage souterrain et de la décharge à la limite après 12 mois.*

### 7.3.2 L'application des paramètres de rugosité du canal

- 97) La résistance à l'écoulement ou la rugosité effective du canal est généralement représentée par un paramètre appelé coefficient de Manning ( $n$ ). Les experts du Chili affirment, en se référant à Muñoz et al. (2019B), que DHI a "utilisé des valeurs irréalistes pour ce paramètre, allant bien au-delà des valeurs acceptées par la doctrine pour les types de canaux décrits ici". C'est inexact car il faut tenir compte des effets supplémentaires de la rugosité à grande échelle, des irrégularités du lit et des séquences de bassins et de piscines.
- 98) L'approche généralement utilisée pour estimer les valeurs  $n$  dans les cours d'eau de montagne (Jarret, 1985) consiste à sélectionner une valeur de rugosité de base pour un canal droit, uniforme et lisse dans les matériaux concernés. Ensuite, après examen de divers facteurs, des valeurs de modification sont ajoutées à la valeur  $n$  de base pour obtenir la valeur  $n$  du canal considéré (Chow, 1959; Cowan, 1956). Ces valeurs additionnelles tiennent compte de l'irrégularité de la section transversale, des variations du canal, de l'effet des obstructions, de la densité de la végétation et du degré de méandre.
- 99) DHI convient que les modèles unidimensionnels tels que MIKE 11 sont des outils utiles pour simuler le calcul d'un débit. Nous sommes également d'accord, comme cela est reconnu par la doctrine (Jarret, 1984 ; Bathurst, 1985 ; Aguirre-Pe et Fuentes, 1990), que l'application de tels modèles à des cours d'eau analogues au Silala peut être difficile car "en plus de la rugosité du lit à petite échelle, les effets de la rugosité à grande échelle, de l'irrégularité de la géométrie du lit et des séquences de bassins et de mares doivent être pris en compte à une échelle moyenne dans l'espace" (Meier et Reichert, 2005).
- 100) Selon Jarret (1985), une première estimation de la rugosité des canaux du Silala serait de l'ordre de  $[0,071-0,12]$  et des conditions "extrêmement" dures pourraient nécessiter des ajustements plus importants". Par conséquent, la valeur de 0,2 utilisée dans le modèle du canal du Silala n'est en aucun cas irréaliste.

### 7.3.3 La précision des sections transversales des canaux

- 101) De façon générale, les sections transversales du modèle sont cohérentes avec la topographie et les dimensions du canal mesurées. Toutefois, les experts du Chili ont signalé certaines inexactitudes dans de petites parties du tronçon allant du confluent à la frontière. Dans la section aval du modèle, un modèle numérique de terrain a été utilisé, qui est plus approximatif que celui utilisé pour le reste du Silala. A une distance plus courte (300 m) dans la partie

inférieure de la section de la gorge, le canal n'a pas été correctement localisé mais a apparemment été légèrement déplacé (de quelques mètres de la ligne centrale du canal). Par conséquent, l'eau dans le modèle suit la partie inférieure de la gorge (où le canal physique est réellement situé) mais en utilisant une zone d'écoulement de forme légèrement différente dans ce tronçon que le canal dicterait. La correction de cet écart devrait réduire la résistance à l'écoulement car la zone d'écoulement deviendrait plus rectangulaire. En principe, cela peut réduire les niveaux d'eau du canal simulé et augmenter l'apport net d'eau souterraine (légèrement), ce qui générerait un débit d'eau de surface plus important dans le scénario de base, mais n'affecterait pas les deux autres scénarios. De l'avis du DHI, cela tendrait à augmenter les impacts estimés de la canalisation.

- 102) Un effet similaire est à prévoir si la section transversale la plus en aval du modèle devait être légèrement réduite. Cet effet serait certainement plus proche de la réalité, et pourrait également conduire à des niveaux d'eau légèrement inférieurs à la frontière, niveaux d'eau que le Chili conteste.

#### **7.4 Le modèle hydrogéologique du DHI est fiable**

- 103) Dans cette section, nous nous attacherons à démontrer que les interprétations hydrogéologiques et les modèles conceptuels du DHI sont basés sur un vaste programme de caractérisation hydrogéologique et qu'à de nombreux égards, ils sont cohérents avec les constats de l'étude hydrogéologique du Mémoire du Chili (Arcadis, 2017) tels que : distribution verticale de l'aquifère d'ignimbrite au sud des gorges ; le fait que le tectonisme et les failles sont susceptibles d'avoir augmenté le degré de fracturation des ignimbrites le long de la gorge du Silala ; le fait que l'aquifère d'ignimbrite a une perméabilité élevée ; et que l'écoulement des eaux souterraines dans l'ignimbrite se fait principalement par les fractures. Des modifications ont été apportées au modèle conceptuel élaboré par les experts du Chili (W&P 4) sans qu'il ait été nécessaire d'effectuer des forages et des tests géophysiques ou hydrogéologiques supplémentaires sur le site. Les changements d'interprétations de leurs experts sur la stratigraphie entrent en conflit avec les datations radiométriques boliviennes des unités rocheuses en question et la suppression de la faille qui coïncide avec la gorge du Silala contredit les rapports précédemment soumis par les experts du Chili (Arcadis, 2017).

- 104) La géologie de la région est en grande partie le résultat d'une activité volcanique du Miocène supérieur qui a entraîné la mise en place de centres et de dômes volcaniques dans la région. Des éruptions volcaniques explosives au cours

de cette période ont entraîné un dépôt d'ignimbrite étendu à l'échelle régionale, appelé l'ignimbrite du Silala.

- 105) Les failles, les fractures et les diaclases de l'ignimbrite de la région du Silala exercent un fort contrôle sur le nombre de sources d'eau, leur distribution spatiale et l'ampleur de leur débit dans les zones humides du Silala (SERGEOMIN, 2017 ; DHI 2, 2019 - DB, Vol. 4, annexe 23.5).



*Photographie 7-5 Exemple de fracturation dans une ignimbrite coïncidant avec une crue printanière et qui représente une remontée des eaux souterraines à la surface.*

- 106) Une étude structurale détaillée des fractures et des failles, incluant une cartographie spécifique du site réalisée par SERGEOMIN (2017 ; DHI 2, 2019 DB, Vol. 4, annexe 23.5) montre que les réseaux de fractures commandent la majeure partie de l'écoulement des eaux souterraines dans l'ignimbrite. Les densités de fractures les plus élevées ont été mesurées dans la zone des sources du Silala, où l'on peut observer des fractures ouvertes dans l'ignimbrite qui

transmettent les eaux souterraines à la surface et qui coïncident avec l'emplacement des sources (Photographie 7-5).

- 107) Les études hydrogéologiques du Champ Proche du Silala confirment l'hypothèse selon laquelle la plupart des flux d'eaux souterraines se produisent dans les fractures de l'ignimbrite et dans les zones érodées des fragments de roches rubéfiées. Le débit soutenu et relativement constant des sources du Silala et les examens sur site spécifiques des propriétés hydrauliques de l'ignimbrite montrent que le système de fracture associé aux sources du Silala est interconnecté à de grands volumes de roche sur de grandes étendues spatiales.
- 108) En général, les gradients d'eaux souterraines mesurés indiquent que les eaux souterraines, qui ne sont pas déversées dans les bofedales ou les canaux artificiels du Silala, s'écoulent vers l'ouest-sud-ouest en direction du Chili (DHI 1, 2018 ; annexe F CMB, Vol. 4, annexe 17). La cartographie des fractures et les résultats des tests hydrauliques (DHI 1, 2018 annexe F, Schéma 40; CMB, Vol. 4, annexe 17) suggèrent que cet écoulement se produit préférentiellement près de la gorge du Silala, où la perméabilité de la roche est la plus grande et où il a été démontré que l'aquifère perméable d'ignimbrite s'étend jusqu'à au moins 117 m sous la surface du sol (ce qui signifie que la limite inférieure de l'ignimbrite s'étend beaucoup plus profondément dans cette zone). Les mesures indiquent que le système d'eaux souterraines se déverse dans les eaux de surface le long des tronçons nord et sud des canaux au-dessus de leur confluence, et que les eaux de surface perdent une quantité modeste d'eau dans le système d'eaux souterraines du sud-ouest de la confluence à la frontière chilienne (DHI 1 ; 2018 ; annexe F, Schéma 42 et tableau 15 ; CMB, vol. 4, annexe 17). Les variations mesurées du niveau des eaux souterraines, combinées à la perméabilité élevée et à l'étendue spatiale et verticale de l'aquifère d'ignimbrite, suggèrent qu'il existe un important flux transfrontalier d'eaux souterraines vers le Chili (DHI 1, 2018 annexe F CMB, Vol. 4, annexe 17).
- 109) Les mesures de l'écoulement des eaux de surface (DHI 1, 2018; annexe C CMB, Vol. 2, annexe 17) et les rapports de mélange hydro-chimique suggèrent que la majorité (60-70%) des eaux souterraines qui se déversent dans la source et le canal du Silala proviennent d'eaux souterraines dont la provenance régionale est plus profonde. Les 30 à 40 % restants proviendraient eux de d'écoulements plus localisés, plus rapprochés du Champ Proche du Silala. La déclaration "a clairement démontré qu'il y a vraisemblablement deux sources primaires et distinctes qui se déversent d'eaux souterraines dans les sources du Silala". Le rapport hydrogéologique du DHI (DHI 1, 2018; annexe F; CMB,

Vol. 4, annexe 17) a été mal interprétée dans W&P 5 (2019) comme signifiant deux aquifères distincts, ce qui n'est pas exact. Dans les deux cas, l'écoulement des eaux souterraines se fait dans l'aquifère d'ignimbrite qui comprend des voies d'écoulement localisées et régionales avec un certain degré de mélange entre les deux régimes d'écoulement.

#### **7.4.1 Existence et fonction de la faille du Silala dans le processus hydrogéologique et les interactions entre eaux souterraines et eaux de surface**

110) De nombreux éléments de preuve ont été fournis à la Cour pour étayer l'existence d'une faille coïncidant approximativement avec les gorges du Silala, appelée Zone de faille du Silala (DHI 1, 2018 ; annexe F - CMB, vol. 4, annexe 17 ; SERGEOMIN, 2017 ; DHI 2, 2019, DB, vol. 4, annexe 23.5). La faille a été cartographiée comme une extension du système de failles Uyuni-Khenayani (UKFS) en Bolivie par de nombreux chercheurs (Sempere et al., 1988 ; Martínez et al., 1994 ; Elger et al., 2005).

111) Cependant, l'existence de cette faille est aujourd'hui remise en question, comme le montrent les extraits suivants des plaidoiries du Chili (Chili, 2019) du Silala:

a) *"Selon les experts du Chili, son existence est "si improbable que nous la croyons impossible"" (W&P 4, p. 45).*

b) Le Chili affirme également que le système de failles Uyuni-Khenayani, auquel est associée la faille du Silala, ne peut pas être responsable de la fracturation ou de la formation de failles dans les ignimbrites de la zone du Silala parce que le "système de failles principal est situé à 31 km à l'ENE de la rivière Silala" et n'a pas été actif depuis 10 Ma<sup>23</sup> et ne peut donc pas être responsable de la "zone de haute perméabilité qui traverse les Bofedales Norte (Cajones), les Bofedales Sur (Orientales) et la gorge de la rivière Silala" (W&P).P 5, p.135).

112) Ces déclarations remettent en question le rôle de la faille du Silala dans l'augmentation du degré de fracturation et de perméabilité de l'aquifère d'ignimbrite. Les experts du Chili, cependant, documentent l'existence d'une

---

<sup>23</sup> Ma : Il y a des millions d'années.

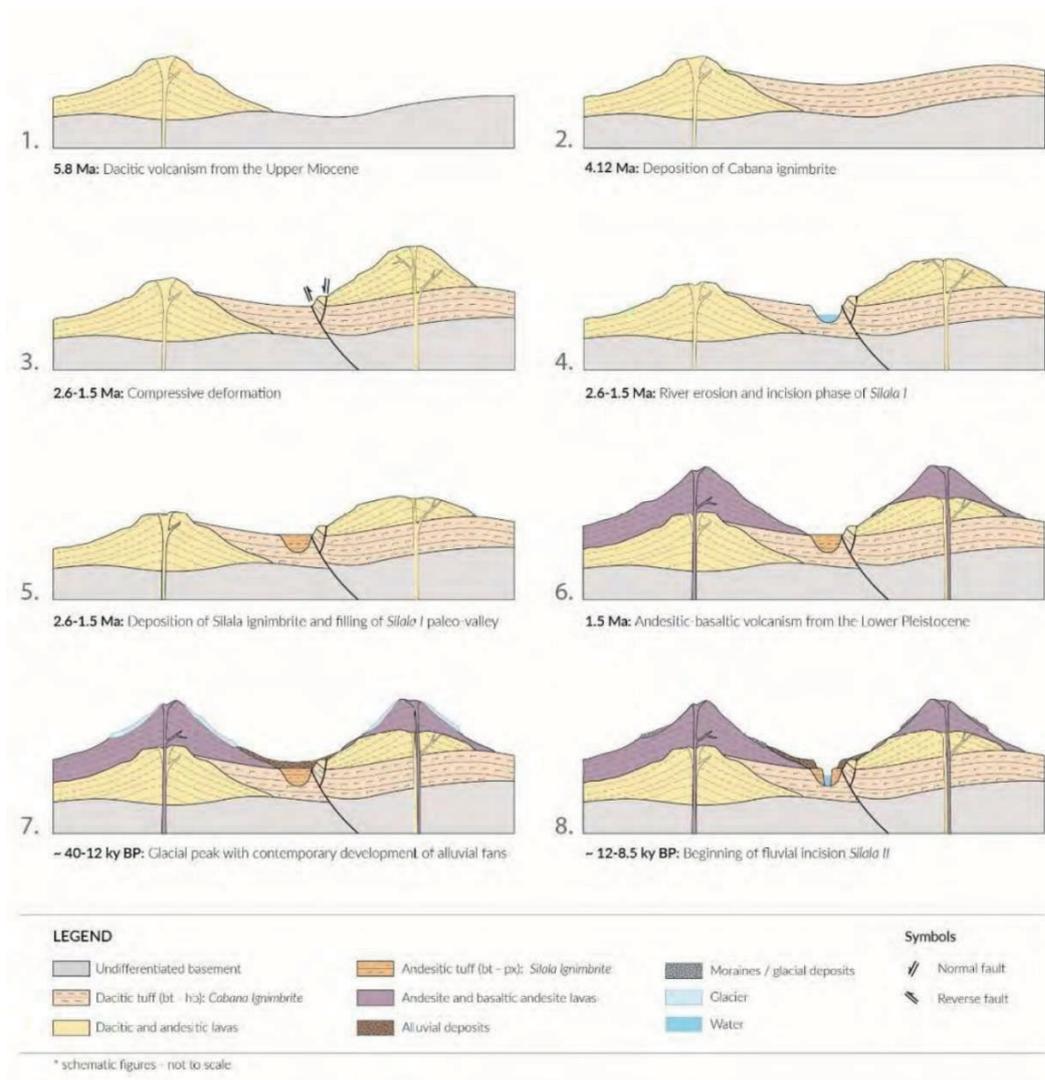
faille de chevauchement coïncidant avec la gorge du Silala et soulignent en outre qu'elle était active après le dépôt d'ignimbrites :

*"La géologie du bassin de captation de la rivière Silala est dominée par une série d'épisodes volcaniques entrecoupés de périodes d'activité sédimentaire pendant une période de tectonique active au cours des 6 derniers Ma environ" (Arcadis, 2017, p. 12; annexe 2, Vol. 4, MC, 2017) ; "Par la suite, à la fin du Pliocène et au début du Pléistocène (environ 2,6 Ma - 1,5 Ma), le bassin de captation de la rivière Silala a été soumis à une faille de compression locale qui a exposé et fait basculer les dépôts d'ignimbrite de Cabana" (Arcadis, 2017, p. 12, annexe 2, Vol. 4, MC, 2017); et "La qualité de la roche de l'UH3 le long de la gorge du Silala est très hétérogène, avec des zones de fracture/faille et des zones fortement altérées, où la roche est très friable et perméable." (Arcadis, 2017, p. 6 ; annexe 2, Vol. 4, MC, 2017).*

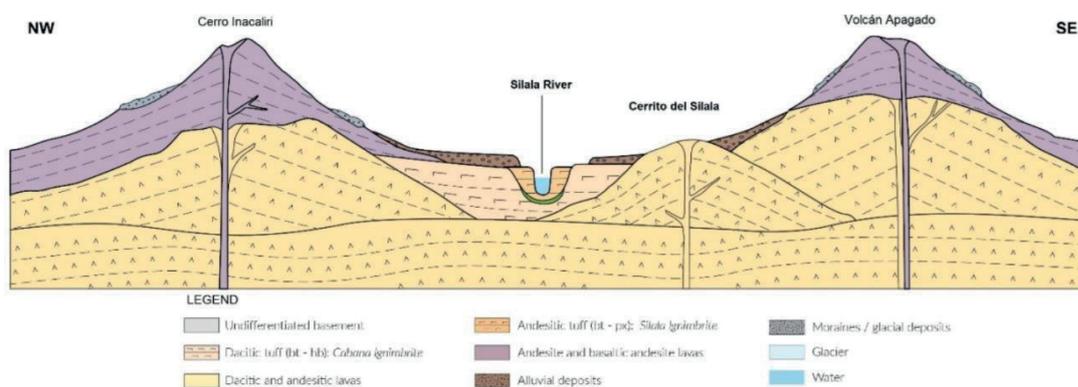
113) De nombreuses autres références à des failles le long des ravines et gorges de faille intersectées dans des échantillons de carottes de forage sont également faites tout au long du Mémoire de Chili (Arcadis, 2017, annexe 2, Vol.4, MC, 2017), y compris dans la présentation de la faille dans des diagrammes de l'évolution géologique et de la stratigraphie de la zone (Schéma 7-6). Cependant, la faille coïncidant avec la gorge du Silala (représentée en noir sur la Schéma 7-6) a été supprimée de la coupe transversale révisée du Chili (Schéma 7-7) sans discussion, explication ni nouvelle preuve géologique ou étude hydrogéologique.

114) Les experts du Chili concluent désormais que l'existence de la faille est "si improbable que nous la considérons comme impossible". Ceci malgré les preuves techniques, notamment la cartographie des failles par SERGEOMIN (2017; DHI 2, 2019, DB, Vol. 4, annexe 23.5), les densités de fractures mesurées plus élevées le long des lignes de failles cartographiées (SERGEOMIN, 2017 ; DHI 2, 2019, DB, Vol. 4, annexe 23.5), des mesures de tendance du réseau de fractures principal indiquant une cohérence avec la tendance régionale du système de failles Uyuni-Khenayani (SERGEOMIN, 2017; DHI 2, 2019; DB, vol. 4, annexe 23.5) et des pompages à haute conductivité hydraulique (DHI 1, 2018 ; annexe F, p. 81 ; CMB, vol. 4, annexe 17) le long de la gorge (y compris des opérations réalisées au Chili), qui confirment plutôt qu'ils ne réfutent l'existence d'une zone de faille dans cette région. Le Chili considère également que le déplacement relativement faible de l'ignimbrite à la limite serait une preuve de l'absence de formation de failles (W&P 4, 2019 ; p. 52). Cependant, le déplacement de la direction des failles

varie souvent, et les ignimbrites sont connues pour dissimuler les failles en absorbant la déformation de chaque fracture de manière incrémentielle sur une large zone (Wohletz, 2006).



*Schéma 7-6 Conceptualisation par SERNAGEOMIN de la gorge du Silala montrant une faille de chevauchement coïncidant avec la gorge (schéma inclus dans le Mémoire du Chili) et un aquifère d'ignimbrite s'étendant latéralement.*



*Schéma 7-7 Conceptualisation actualisée du Chili de la gorge du Silala - on notera l'absence de faille et les changements dans l'étendue de l'aquifère d'ignimbrite (W&P 4, 2019.)*

115) Peut-être plus important encore, les allégations chiliennes dénaturent le niveau d'importance attribué à la zone de faille du Silala d'un point de vue hydrogéologique. Les propriétés hydrogéologiques et les gradients hydrauliques mesurés du Champ Proche du Silala et le long des transepts de faille cartographiés sont définis et ne sont pas contestés. Ce sont ces propriétés qui contrôlent en définitive l'écoulement des eaux souterraines et les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Les valeurs de conductivité hydraulique présentées sont cohérentes avec les tests de pompage effectués dans et près de la gorge du Silala, tant en Bolivie qu'au Chili. Elles démontrent que l'aquifère ignimbrite fracturé est hautement perméable, avec des résultats de tests de conductivité hydraulique compris entre 2,8 et 17 m/d au Chili (Arcadis, 2017) et entre 13,8 m/d et 138,2 m/d en Bolivie (DHI 1, 2018, annexe F ; CMB, Vol. 4, annexe 17). Les causes du degré plus élevé de fracturation et de perméabilité de l'aquifère ignimbrite dans la zone de la gorge du Silala sont sans incidence.

116) Nous sommes d'accord avec les experts du Chili pour dire qu'une grande partie de la fracturation associée aux ignimbrites est liée au refroidissement. Ce qui est le postulat du DHI 1 2018 (annexe F, p.81 CMB, Vol. 4, annexe 17) est que la tectonique a probablement affecté la densité des fractures et donc les propriétés hydrauliques (c'est-à-dire la conductivité hydraulique, le rendement spécifique, le stockage spécifique) qui coïncident approximativement avec les failles et les ravines cartographiées. Cependant, la présence d'un degré plus élevé de fracturation et par extension de perméabilité près des transepts de faille cartographiés qui coïncident avec les gorges ne supposent pas de mouvement tectonique postérieur au dépôt d'ignimbrite.

#### **7.4.2 Ages géologiques des unités stratigraphiques et étendue latérale des ignimbrites dans le modèle conceptuel hydrogéologique chilien révisé**

- 117) Les datations radiométriques sont contradictoires de la roche ignimbrite qui forme les aquifères dominants de la région du Silala (voir le résumé détaillé dans W&P 4, 2019 ; tableau 1). La datation des ignimbrites par rapport aux [roches] volcaniques du Miocène est importante car cela fournit des informations sur l'étendue spatiale et verticale potentielle de l'aquifère d'ignimbrite, qui est un facteur majeur pour déterminer le modèle d'écoulement des eaux souterraines, le débit des sources et les flux transfrontaliers vers le Chili.
- 118) La datation permet de déterminer si les ignimbrites se sont déposées avant ou après les roches volcaniques environnantes, telles que celles associées aux volcans Inacaliri et Silala Chico. Les répercussions sur l'interprétation stratigraphique sont importantes. Cela peut être illustré à l'aide de l'exemple des interprétations de subsurface sous Silala Chico, où le Chili a proposé un modèle conceptuel en 2017 (Arcadis, 2017 ; annexe II, Vol. 4) et a révisé l'interprétation en 2019 (W&P 4, 2019), comme démontré par les Schémas 7-6 et 7-7. Comme le montre le Schéma 7-6, si l'ignimbrite est antérieure aux [roches] volcaniques du Miocène, on peut s'attendre à ce que l'ignimbrite soit présente sur une zone et des profondeurs beaucoup plus importantes. Si les [roches] volcaniques du Miocène sont antérieurs aux dépôts d'ignimbrite, l'ignimbrite peut être beaucoup moins expansive latéralement et verticalement.
- 119) Conceptuellement, les deux modèles alternatifs sont plausibles selon l'âge de la roche et la séquence stratigraphique correspondante qui sont acceptés comme corrects. Les experts du Chili écartent les échantillons boliviens et se basent sur les échantillons collectés au Chili pour leur interprétation de la séquence stratigraphique en Bolivie. Selon le DHI il est fondamental de prendre en considération les échantillons collectés sur le terrain en Bolivie pour l'interprétation de la stratigraphie en Bolivie. Il convient de s'appuyer sur ces âges dans l'interprétation conceptuelle.
- 120) Cependant, la géométrie tridimensionnelle de l'aquifère ignimbrite au Chili et en Bolivie ne peut être établie que par un programme de tests géophysiques et de sondages. Elle restera incertaine tant qu'un tel programme n'aura pas été mis en œuvre. Toutefois, des études collaboratives sur la datation des ignimbrites pourraient conduire à une interprétation unifiée de la stratigraphie et du modèle conceptuel.

- 121) Les principales implications de ces deux modèles conceptuels concurrents sont des taux d'écoulement transfrontalier des eaux souterraines potentiellement différents au Chili et des schémas d'écoulement des eaux souterraines locales différents selon que l'aquifère d'ignimbrite est plus ou moins étendu dans l'espace et verticalement (DHI 1, 2018 ; annexe F, pp. 1-99 CMB, Vol. 4, annexe 17 ; Arcadis, 2017, annexe II, Vol. 4) (Schéma 7-7). Il n'existe pas de données sur la lithologie du sous-sol ni de mesures du niveau des eaux souterraines dans la zone du Silala Chico, ce qui implique que ces interprétations sont par nature incertaines.
- 122) Les incertitudes quant aux conditions hydrogéologiques identifiées par W&P 4, 2019, situées au-delà des zones caractérisées par les forages et les piézomètres, justifient l'approche consistant à restreindre le modèle de Champ Proche aux régions où la géométrie de l'aquifère et les propriétés hydrauliques ont été caractérisées.



*Photographie 7-8 Fracture dans les parois d'ignimbrite de la gorge du Silala - on notera la fracture verticale qui traverse la section et qui comprend différents degrés de soudure et de variations lithologiques.*

- 123) Les experts du Chili affirment que des aquifères perchés ont été observés au Chili (W&P 4, 2019 ; Arcadis, 2017 ; SERNAGEOMIN, 2019 ; Herrera et Aravena, 2017) et que ceux-ci existent également en Bolivie et auraient donc dû être inclus dans le modèle numérique en raison des différentes distributions des niveaux piézométriques.

124) La présence d'un aquifère perché au Chili n'est ni admise ni réfutée, bien qu'il soit tout à fait possible qu'un tel système existe. Cependant, en Bolivie, aucun aquifère perché n'a été observé ou documenté au cours du vaste programme de caractérisation hydrogéologique impliquant plus de 30 puits. Les données de pompage indiquent que la conductivité hydraulique verticale peut être légèrement inférieure à la conductivité hydraulique horizontale en raison de la stratification lithologique dans l'ignimbrite. Par conséquent, le modèle numérique incorpore également une conductivité hydraulique verticale qui est inférieure à la valeur horizontale. Comme c'est le cas pour de nombreuses ignimbrites, il existe une fracturation verticale étendue est évidente dans toute la gorge du Silala (Photographie 7-8). Les fractures verticales créent des conduits pour l'écoulement vertical entre les diverses lithologies d'ignimbrite ou couches stratigraphiques, ce qui réduit le potentiel d'eau souterraine perchée étendue. Dans les bofedales sud et nord, des gradients verticaux ascendants ont généralement été mesurés dans l'aquifère d'ignimbrite (DHI 1, 2018 ; annexe F, p. 91, tableau 15 CMB, vol. 4, annexe 17), ce qui prouve que les eaux souterraines plus profondes s'écoulent vers le haut et se déversent finalement dans les eaux de surface et les sources.

125) L'argument en faveur d'un aquifère perché en Bolivie masque le fait que les deux parties ont estimé qu'il existerait un régime d'écoulement localisé avec une source de recharge plus proche en raison d'une chimie de l'eau différente. En Bolivie, ce régime d'écoulement localisé a été identifié dans les parties saturées de l'aquifère ignimbrite peu profonde. Contrairement à ce que prétendent les experts du Chili, la formulation des contours du modèle de Champ Proche du nord des zones humides n'a eu aucune conséquence dans la formulation des contours par l'eau perchée au contact alluvial-ignimbrite, comme le démontrent les puits DS-25 et DS-27-II (DHI 1, 2018 ; annexe F CMB, vol. 4, annexe 17). Ces puits d'observation sont forés dans l'aquifère d'ignimbrite saturé, et les élévations d'eau souterraine de ces puits permettent de déterminer les niveaux d'eau souterraine dans la zone située au nord des zones humides du nord, qui ont servi à la configuration du modèle de Champ Proche.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

1. DHI 1, 2018: Contrat CDP-I N° 01/2018, Étude des écoulements dans le système de zones humides et de sources du Silala (partie du Contre-mémoire de la Bolivie (CMB, annexe 17)).
2. DHI 2, 2018: Analyse technique et avis de validation indépendant des études techniques complémentaires sur les sources du Silala, décembre 2018 (document de la République de la Bolivie, annexe 23).
3. DHI 3, 2018: Produit unique de analyse et évaluation de la réponse du Chili aux Demandes Reconversionnelles de la Bolivie dans l'affaire Silala, mars 2019 (document de la République de la Bolivie, annexe 24).
4. DHI 4, 2019: Produit unique de actualisation des scénarios du modèle hydrologique mathématique des eaux de la source Silala avec: Analyse de Sensibilité des limites du modèle, avril 2019 (document de la République de la Bolivie, annexe 25).
5. W&P 1: Wheater et Peach: La rivière Silala aujourd'hui (Mémoire de la République de Chile)
6. W&P 2: Peach et Wheater: L'évolution de la rivière Silala, de son bassin et de ses gorges (Mémoire de la République de Chile)
7. W&P 3: Wheater et Peach: Impacts de la canalisation de la rivière Silala en Bolivie sur l'Hydrologie du bassin de la rivière Silala (Réponse du Chili aux Demandes Reconversionnelles)
8. W&P 4: Peach et Wheater: sur la géologie, l'hydrogéologie et l'hydrochimie du bassin de la rivière Silala. Nouvelle interprétation géologique et litiges sur les failles (Réponse du Chili aux Demandes Reconversionnelles).
9. W&P 5: Wheater et Peach: Impacts de la canalisation de la rivière Silala en Bolivie sur l'hydrologie du bassin de la rivière Silala: Une analyse actualisée (Écrit Additionnel du Chili)
10. Aguirre-Pe, J. et Fuentes, R., 1990: Résistance à l'écoulement dans les cours d'eau abrupts et rugueux. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116 (11), pp. 1374-1387.
11. Arcadis, 2017: Étude hydrogéologique détaillée de la rivière Silala, mai 2017. annexe II, Volume 4, Mémorial Chili, (MC) 3 juillet 2017.
12. Bathurst, J.C., 1985: Estimation de la résistance à l'écoulement dans les rivières de montagne. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111 (4), pp. 625-643.

13. Chili, 2017: Mémoire de la République de Chile - Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)
14. Chili, 2019: Écrit Additionnel de la République du Chili - Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)
15. Chow, V.T., 1959: Hydraulique en canal ouvert. McGraw-Hill.
16. Cooper, DJ, Sueltenfuss, J., Oyague, E., Yager, K., Slayback, D., Caballero, E., Argollo, J. et Bryan, M., 2019: Les moteurs de la dynamique de la nappe phréatique des tourbières dans les Andes centrales, en Bolivie et au Pérou. *Processus hydrologiques*, 2019; 33L, pp. 1913-1925.
17. Cooper, J., Kaczynski, K., Slayback, D. et K. Yager, 2015: Croissance et production de carbone organique dans les tourbières dominées par *Distichia muscoides*, Bolivie, Amérique du Sud, Arctique, Antarctique and *Alpine Recherche*, 47: 3, 505 - 510, <https://doi.org/10.1657/AAAR0014-060>.
18. Cowan, W.L., 1956: Estimation des coefficients de rugosité hydraulique. *Agricultural Engineering*, 37 (7), pp. 473-475.
19. Ferris, J.G., Knowles, D.B., Brown, R.H. et Stallman, R.W., 1962: Théorie des essais sur les aquifères, US Geological Survey Water Supply Paper 1536-E.
20. Fox, R. H., 1922: Conception d'installations hydrauliques pour la collecte et l'analyse des eaux des plaines de Siloli. *South African Journal of Science*, vol. 19, pp. 120- 131.
21. Freeze A.R. et Cherry, J.A., 1979: Eaux souterraines. Prentice-Hall Inc, New Jersey, p. 330.
22. FUNDECO, 2019: Étude des besoins en eau des zones humides du Silala. Avril 2019, annexe 26, Volume 5, REPLIQUE PAR L'ÉTAT PLURINATIONAL DE BOLIVIE.
23. Graham, D. N., & Butts, M. B., 2005: Modélisation flexible et intégrée des bassins versants avec MIKE SHE. Dans: *Modélisation des bassins versants*, 849336090, pp. 245-272.
24. Havnø, K., Madsen, M. et Dørge, J., 1995: MIKE 11 - Un progiciel de modélisation fluviale généralisée. Dans: *Modélisation informatique de l'hydrologie des bassins fluviaux*, Water Resources Publications, pp. 733-782.
25. Herrera, C. et Aravena, R., 2017: Caractérisation chimique et isotopique des eaux de surface et souterraines dans le bassin transfrontalier du Silala,

- Deuxième Région, Chili. (Mémoire de la République de Chile, Vol. 4, annexe III).
26. Holden, J. et Burt, T. P., 2003: Production de ruissellement dans les bassins versants recouverts de tourbe. *Recherche sur les ressources en eau*, 39 (7).
  27. Holden, J., Evans, M., Burt, T. et Horton, M., 2006: Impact du drainage des terres sur l'hydrologie des tourbières. *Journal of Environmental Quality*, 35 (5), pp. 1764-1778.
  28. Holden, J., Wallage, Z., Lane, S., and McDonald, A., 2011: Dynamique de la nappe phréatique dans une tourbe de couverture non perturbée, drainée et restaurée. *Journal of Hydrology*, 402 (1-2), pp. 103-114.
  29. Jarrett, R.D., 1984: Hydraulique des cours d'eau à forte pente. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (11), pp.1519-1539.
  30. Jarrett, R.D., 1985: Détermination des coefficients de rugosité pour les cours d'eau du Colorado. *Water Resources Investigation Report 85-4004*, U.S. Geological Survey.
  31. Meier, W.K. et Reichert, P., 2005: Cours d'eau de montagne - modélisation de l'hydraulique et du transport des substances. *Journal of Environmental Engineering*, 131 (2), pp. 252-261.
  32. Mulligan, B. et Eckstein, G., 2011. Le bassin du Silala/Siloli: Dispute sur le bassin vulnérable en Amérique du Sud. *Water Resources Development Vol 27, no. 3., 27 (no.3).*
  33. Muñoz, J.F. et Suárez, F., 2019A: Étude de la zone humide de Quebrada Negra. (République de la République du Chili, Vol. 3, annexe XIII).
  34. Muñoz, J.F., Suárez, F., Sanzana, P. et Taylor, A., 2019B : Évaluation des modèles hydrologiques du bassin de la rivière Silala développés par DHI. (Écrit Additionnel de la République du Chili, volume 2, annexe XV).
  35. SERGEOMIN, 2017: Cartographie géologique structurale de la zone entourant les sources du Silala, Cour Internationale de Justice, Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie), Duplique de l'État Plurinational de Bolivie (DB), vol. 4, annexe 23.5.
  36. SERNAGEOMIN, 2019: Brève revue de la géologie présentée dans les annexes de la Duplique de l'État Plurinational de Bolivie. (Écrit Additionnel de la République du Chili, volume 2, annexe XVI).
  37. Oyague, E. et Cooper, D.J., 2020: Tourbières de la puna des Andes centrales, Amérique du Sud. *Science et pratique des zones humides*, octobre

- 2020.
38. SERNAGEOMIN, 2017: Géologie du bassin de la rivière Silala. Volume 4, annexe II des Rapports d'Experts, Cour Internationale de Justice, Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie), Mémoire de la République de Chile.
  39. Singhal, B.B.S. et Gupta, R.P., 2010: Hydrogéologie appliquée des roches fracturées. 2ème édition, Springer.
  40. U.S. Geological Survey, 2012: Appauvrissement du débit par les puits: comprendre et gérer les effets du pompage des eaux souterraines sur le débit. Circulaire 1376. USGS, Reston, Virginie.
  41. Wohletz, K., 2006: Fractures dans le Tuf Soudé - Chapitre 2.3. Dans: Les tufs, leurs propriétés, utilisations, hydrologie et ressources, édité par Grant Heiken, Geological Society of America, Special Paper 408. 2006. Boulder, CO.

Au nom du DHI A/S

Date: 10 janvier 2022

|  |  |   |
|--|--|---|
|  <p>Roar A. Jensen,<br/>hydrologue et<br/>chef d'équipe</p> |  <p>Torsten V. Jacobsen,<br/>hydrologue</p> |  <p>Michael M. Gabora,<br/>hydrogéologue</p> |
|--|--|---|