

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

**COUR INTERNATIONALE DE JUSTICE**

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

**DUPLIQUE DE L'ÉTAT PLURINATIONAL DE BOLIVIE**

**VOLUMES II à VI**

**(Annexes 19-30)**

**15 mai 2019**

*[Traduction du Greffe]*

## TABLE DES MATIÈRES

Annexe

Page

### VOLUMES II À VI

#### Documents du mécanisme de consultations politiques Bolivie-Chili

- 19 Minutes of the XIV Meeting of the Bolivia-Chile Political Consultation Mechanism, 5 et 6 octobre 2005 [annexe non traduite]

#### Documents officiels du Chili

- 20 Records of the Ministry of Foreign Affairs of Chile, 2009 [annexe non traduite]

#### Articles de presse

- 21 *El Mercurio*, “The Foreign Minister opts for integration”, Santiago, 21 octobre 2001 [annexe non traduite]

#### Documents techniques

- 22 R. Gómez-García Palao, “Transboundary water resources between the Republics of Bolivia and Chile – Silala”, avril 1997 [annexe non traduite]
- 23 DHI, Analyse technique et validation indépendante de plusieurs études techniques supplémentaires des sources Silala, décembre 2018 1
- 23.1 IHH, Caractéristiques et efficacité des ouvrages hydrauliques construits et installés dans le secteur du Silala, 2018 15
- 23.2 C. Barrón, “Study of Georeferencing, Topographic survey and determination of the infiltration capacity in the event of possible surface runoff in the area of the Silala springs”, mai 2018 [annexe non traduite]
- Data DVD DVD-ROM containing supporting data Annexes from: “Georeferencing, Topographic survey and determination of the infiltration capacity in the event of possible surface runoff in the area of the Silala springs”
- 23.3 FUNDECO, Evaluation de l’impact sur l’environnement dans la région du Silala, mai 2018 120
- 23.4 FUNDECO, “Study of Evaluation of Environmental Impacts in the Silala, Palynology”, 2018 [annexe non traduite]
- 23.5 F. Urquidi, “Technical analysis of geological, hydrological, hydrogeological and hydrochemical surveys completed for the Silala water system”, juin 2018 [annexe non traduite]
- 23.5 SERGEOMIN (National Service of Geology and Mining), Study of the App A Geology, Hydrology, Hydrogeology and Environment of the Area of the Silala Springs, juin 2000-2001, Final Edition 2003 [annexe non traduite]
- 23.5 SERGEOMIN, “Structural Geological Mapping of the Area Surrounding the App B Silala Springs”, septembre 2017 [annexe non traduite]
- 23.5 Tomás Frias Autonomous University (TFAU), “Hydrogeological App C Characterization of the Silala Springs”, 2018 [annexe non traduite]
- 24 DHI, Analyse et évaluation de l’argumentation opposée par le Chili aux demandes reconventionnelles de la Bolivie dans l’affaire relative au Silala, mars 2019 137

<i>Annexe</i>		<i>Page</i>
25	DHI, Actualisation des scénarios de la modélisation mathématique hydrologique des eaux des sources Silala par une analyse de sensibilité des limites du modèle, avril 2019	145
26	FUNDECO, “Study of the Water Requirements of the Silala Wetlands”, avril 2019 [ <i>annexe non traduite</i> ]	

**Autres documents**

27	Note S/N of The Antofagasta (Chili) and Bolivia Railway P.L.C addressed to the Company DUCTEC S.R.L., Antofagasta, 23 août 2000 [ <i>annexe non traduite</i> ]	
28	1906 Chilean Concession to The Antofagasta-Chili and Bolivia Railway P.L.C. obtained from the data base of Chile’s Direction-General of Water, 2019 [ <i>annexe non traduite</i> ]	
29	Cartographie des zones humides du Silala Appendice A Appendice B Appendice C	
30	Vidéo par drone	

---

**ANNEXE 23**

**DHI, ANALYSE TECHNIQUE ET VALIDATION INDÉPENDANTE DE PLUSIEURS ÉTUDES  
TECHNIQUES SUPPLÉMENTAIRES DES SOURCES SILALA, DÉCEMBRE 2018**

*[Traduction]*

## TABLE DES MATIÈRES

Page

RÉSUMÉ .....	1
0. INTRODUCTION	
0.1. Objectif	
0.2. Portée	
1. ANALYSE DE L'ÉTUDE HYDRAULIQUE INTITULÉE «CARACTÉRISTIQUES ET EFFICACITÉ DES OUVRAGES HYDRAULIQUES CONSTRUITS ET INSTALLÉS DANS LE SECTEUR DU SILALA»	
1.1. Objectifs de l'étude	
1.2. Méthodologie et contenu de l'étude	
1.3. Analyse des résultats et conclusions	
1.4. Validation des résultats et conclusions	
2. ANALYSE DU DOCUMENT INTITULÉ «ÉTUDE DE GÉORÉFÉRENCEMENT, DE LEVÉS TOPOGRAPHIQUES ET DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'INFILTRATION EN CAS D'UN ÉVENTUEL RUISSELLEMENT DE SURFACE DANS LA ZONE DES SOURCES SILALA»	
2.1. Objectifs de l'étude	
2.2. Méthodologie	
2.2.1. Etude topographique	
2.2.2. Etude pédologique	
2.3. Analyse des résultats et conclusions	
2.3.1. Etude topographique	
2.3.2. Etude pédologique	
2.4. Validation des résultats et conclusions	
2.4.1. Etude topographique	
2.4.2. Etude pédologique	
2.5. Références	
3. ANALYSE DU DOCUMENT INTITULÉ «ÉTUDE D'ÉVALUATION DE L'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT DANS LA RÉGION DU SILALA — PREMIÈRE PARTIE»	
3.1. Objectifs de l'étude	
3.2. Méthodologie	
3.2.1. Délimitation de la surface des zones humides	
3.2.2. Travaux sur le terrain	
3.3. Analyse des résultats et conclusions	
3.4. Validation des résultats	
3.5. Références	
4. ANALYSE DU DOCUMENT INTITULÉ «ÉTUDE D'ÉVALUATION DE L'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT DANS LA RÉGION DU SILALA — DEUXIÈME PARTIE : PALYNOLOGIE»	
4.1. Objectifs de l'étude	

4.2. Méthodologie	
4.3. Description de la stratigraphie	
4.4. Méthode de datation au <sup>14</sup> C	
4.5. Analyse géochimique	
4.6. Analyse palynologique (analyses des pollens)	
4.7. Analyse des résultats et conclusions	
4.8. Validation des résultats	
4.9. Références	
5. ANALYSE DU DOCUMENT INTITULÉ «ANALYSE TECHNIQUE DES ÉTUDES CONCERNANT LA GÉOLOGIE, L’HYDROLOGIE, L’HYDROGÉOLOGIE ET L’HYDROCHIMIE DU SYSTÈME HYDROGRAPHIQUE DU SILALA»	
5.1. Résumé	
5.2. Objectifs de l’étude	
5.3. Méthodologie	
5.3.1. Présentation	
5.3.2. Géologie ignée	
5.3.3. Géomorphologie quaternaire	
5.3.4. Géologie structurale	
5.3.5. Hydrologie	
5.3.6. Hydrogéologie	
5.3.7. Hydrochimie	
5.4. Analyse des résultats et conclusions	
5.4.1. Formation du système de sources du Silala et sites représentatifs	
5.4.2. Relation recharge-débit	
5.5. Validation des résultats	
5.6. Références	
6. VALIDATION FINALE DES RÉSULTATS DE L’ENSEMBLE DES ÉTUDES .....	7
7. BIBLIOGRAPHIE (RÉFÉRENCES) .....	10

#### ANNEXES

Annexe 1 : Etudes hydrauliques examinées [*non traduite*]

Annexe 2 : Levés topographiques et études pédologiques examinés [*non traduite*]

Annexe 3 : Etudes environnementales examinées — première partie [*non traduite*]

Annexe 4 : Etudes environnementales examinées — deuxième partie [*non traduite*]

Annexe 5 : Etude hydrologique / hydrogéologique examinée [*non traduite*]

## RÉSUMÉ

A la demande du DIREMAR (bureau stratégique de reconnaissance des prétentions maritimes, du Silala et des ressources hydriques internationales de la Bolivie), le Danish Hydraulic Institute (DHI, institut danois d'hydraulique) a examiné les documents suivants :

1. Etude hydraulique : «Caractéristiques et efficacité des ouvrages hydrauliques construits et installés dans le secteur du Silala». Auteurs : Jose Luis Montaña Vargas, Jose Antonio Luna Vera, Juan Pablo Fuchs Arce, Juana Dolores Mejia Gamarra, Javier Carlos Mendoza Rodriguez.

2. Etudes de la topographie et de la pédologie : «Etude de géoréférencement, de levés topographiques et détermination de la capacité d'infiltration en cas d'un éventuel ruissellement de surface dans la zone des sources Silala». Réalisée par Consultores Tecnicos Ingenieria y Construcción Campos Barron S.R.L., La Paz, Bolivie, pour le DIREMAR.

3. «Evaluation de l'impact sur l'environnement dans la région du Silala — première partie». Sous la coordination de Luis F. Pacheco, directeur de l'institut d'écologie de l'Université supérieure San Andrés (UMSA) *et al.*

4. «Evaluation de l'impact sur l'environnement dans la région du Silala — deuxième partie : palynologie». Sous la coordination de Luis F. Pacheco *et al.*

5. Etude hydrogéologique : «Analyse technique des études concernant la géologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie et l'hydrochimie du système hydrographique du Silala». Auteur : Fernando Urquidi Barrau, consultant en géologie.

### Première analyse : étude hydraulique

#### «Caractéristiques et efficacité des ouvrages hydrauliques construits et installés dans le secteur du Silala»

Cette étude a consisté à répertorier et à décrire les ouvrages hydrauliques situés dans le secteur du Silala et à évaluer leur incidence sur les *bofedales* et les sources. A partir d'une enquête de terrain et des données collectées dans le cadre d'un programme antérieur, les auteurs décrivent les ouvrages hydrauliques tronçon par tronçon et les classent par catégorie ; la longueur totale de la chenalisation a également été calculée. Les recherches sur le terrain ont permis d'établir une description détaillée de l'étendue et des propriétés des canaux. Des photos et des mesures illustrent l'ampleur du système de drainage et son impact négatif sur les *bofedales*.

Les visites sur le terrain et l'analyse des mesures de débits réalisées par le service national de météorologie et d'hydrologie (SENAMHI) ont permis de conclure que les débits sont constants et que le système des sources Silala est alimenté par des eaux souterraines ; aucun ruissellement généré par des précipitations n'a été observé dans le bassin versant.

Sur la base des données recueillies sur le terrain, un modèle hydraulique de la chenalisation a été mis au point et exécuté. Ce modèle a notamment permis de calculer les nombres de Froude et les vitesses d'écoulement. Au vu des résultats et par comparaison avec les débits en milieu poreux, les auteurs concluent que la chenalisation a modifié le régime d'écoulement.

Les observations faites sur le terrain semblent indiquer que le transport solide est limité, mais les auteurs n'en tirent aucune conclusion finale.

Ils concluent que le terme «rivière» ne qualifie pas correctement le système d'écoulement du *bofedal* et que les ouvrages hydrauliques et les canaux ont été construits pour drainer et acheminer l'eau.

Nous avons relevé dans le rapport des phrases ou des passages équivoques, des contradictions et quelques incohérences mineures concernant la méthodologie.

*L'étude fournit des preuves détaillées de l'étendue et des propriétés des canaux.* Des photos et des mesures étayent l'ampleur du système de drainage et son impact négatif sur l'environnement dans les *bofedales* naturels.

De manière générale, notre analyse permet de conclure que cette étude apporte des informations utiles qui corroborent les conclusions des études et enquêtes de terrain précédentes, comme celle du DHI (DHI 2018b), quant à l'impact du système de canaux.

Comme il a été dit précédemment, un modèle hydraulique de la chenalisation a été mis au point à partir des données recueillies sur le terrain et exécuté. Les résultats du modèle mettent en évidence des vitesses d'écoulement élevées dans les canaux. Dans un *bofedal* naturel, le régime d'écoulement se caractérise par un écoulement lent dans un milieu poreux, la tourbe, combiné à un rejet de l'excédent sous forme de ruissellement de surface distribué selon un schéma anastomosé bidimensionnel à travers la végétation hygrophile. Ce régime n'étant pas celui des écoulements à grande vitesse concentrés que l'on observe dans les canaux actuels, *l'étude confirme que la chenalisation a modifié le régime d'écoulement dans le Silala.*

La méthodologie appliquée n'est toutefois pas valable pour mesurer les incidences *quantitatives* de la chenalisation sur les débits de surface du Silala. Pour ce faire, il faudrait quantifier les échanges hydriques entre les canaux et les zones humides et entre les eaux souterraines et les zones humides, comme dans les analyses du DHI (DHI, 2018b).

## **Deuxième analyse : étude de la topographie et de la pédologie**

### **«Etude de géoréférencement, de levés topographiques et détermination de la capacité d'infiltration en cas d'un éventuel ruissellement de surface dans la zone des sources Silala»**

Cette étude comprend deux parties distinctes :

Le chapitre 1 concerne le géoréférencement et les levés topographiques.

Le chapitre 2 présente une évaluation pédologique dans la zone en s'intéressant principalement aux propriétés hydrauliques.

De nouveaux levés topographiques détaillés ont permis d'établir et de géoréférencer 8 points de limite le long des canaux principaux dans la zone des sources Silala, de mesurer le niveau des sources et des piézomètres, et d'établir des coupes géoréférencées de l'ensemble de la chenalisation tous les 10 mètres au minimum. Il en résulte une série de cartes et de tableaux qui sont joints au rapport. Il n'est pas possible de déterminer si le modèle numérique de terrain de la zone a été mis à jour.

Les levés topographiques détaillés sont certainement utiles pour étudier l'hydrologie et l'hydrogéologie dans la zone. Malheureusement, aucune comparaison n'est faite avec les précédents levés topographiques effectués pour le DIREMAR et appliqués aux fins du géoréférencement des sources et des piézomètres dans les études antérieures. En particulier, il n'y a aucune référence au

précédent modèle numérique de terrain détaillé (DIREMAR, 2017) ou aux corrections qui seraient éventuellement nécessaires pour aligner celui-ci sur les nouveaux repères. De telles informations auraient apporté une valeur ajoutée considérable aux résultats.

Afin de pouvoir comparer les levés avec le précédent modèle numérique de terrain de la zone, nous avons procédé à quelques vérifications sur les cartes altimétriques établies et comparé les pentes moyennes des canaux nord et sud et du canal principal. Ces vérifications semblent indiquer que les nouveaux levés peuvent confirmer le précédent modèle numérique de terrain avec quelques corrections générales mineures. Si tel est bien le cas, les nouveaux levés ne devraient pas modifier les conclusions des précédentes évaluations, notamment celle du DHI (2018).

L'étude pédologique fait apparaître une prédominance de sols sableux sur toute la zone à l'examen. Les sols présentent une grande perméabilité et de fortes capacités d'infiltration. En 15 endroits, des puits ont été creusés à une profondeur allant de 0,3 à 1,8 mètre (limitée par l'épaisseur de l'horizon superficiel au-dessus de la roche fracturée). Dans les 14 puits situés à l'extérieur des zones humides, la teneur en eau au fond était relativement faible et aucun des puits creusés n'atteignait la nappe phréatique.

Les expériences sur le terrain font état de capacités d'infiltration 10 fois supérieures à celles utilisées dans les précédentes études. Si ces valeurs peuvent être incertaines, voire trop élevées, les expériences confirment toutefois les conclusions des précédentes études quant à l'absence de ruissellement de surface à l'extérieur des zones humides, ce qui signifie que les sources et zones humides du Silala sont quasi entièrement alimentées par des eaux souterraines.

### Troisième analyse :

#### «Évaluation de l'impact sur l'environnement dans la région du Silala — première partie»

Cette étude visait à déterminer si la chenalisation des *bofedales* avait eu une incidence sur les écosystèmes et, dans l'affirmative, si celle-ci avait entraîné un risque pour la survie des *bofedales* et de la végétation et des espèces particulières qu'ils accueillent.

Afin d'évaluer l'état des *bofedales* du Silala, situés dans les Andes boliviennes, sept études distinctes ont cherché à déterminer l'influence réelle des modifications anthropiques, c'est-à-dire la chenalisation des *bofedales*. Les études comprenaient des analyses de la végétation, de l'ichtyofaune, de l'herpétofaune, de l'avifaune et de la macrofaune.

Les résultats montrent que la structure de la végétation a été altérée, le couvert végétal étant plus fragmenté (désintégré) et dégradé, tout comme sa diversité. Certaines surfaces des *bofedales* du Silala avaient une végétation typique des zones humides, mais d'autres présentaient une végétation propre aux terres arides. Selon l'étude, la chenalisation est la principale cause du développement de zones arides et de la dégradation des conditions environnementales en ce qui concerne les facteurs tant biotiques qu'abiotiques. Les principaux éléments attestant cette situation proviennent de l'étude de la répartition de la végétation et des espèces dans les *bofedales*, dont les résultats ont été comparés avec des études menées dans d'autres *bofedales* non perturbés de la région.

Les études ont permis de confirmer que les *bofedales* du Silala comptent plus d'espèces des milieux arides et davantage de surfaces couvertes de plantes généralement présentes dans les zones marginales arides, tandis que la végétation typique des *bofedales* est moins présente et ne recouvre ici qu'une petite portion.

L'équipe de recherche a retenu une approche classique et éprouvée pour décrire l'état actuel des *bofedales* s'agissant de la flore et de la faune ; les résultats de chaque étude sont présentés dans le rapport. Les conclusions tirées se fondent principalement sur la répartition des types de végétation

en fonction de l'aridité ou de l'humidité des sols, car les observations des diverses faunes (poissons, oiseaux, amphibiens et reptiles et macroinvertébrés) n'ont pas apporté grand-chose.

Cette étude fournit les premières analyses quantitatives attestant la dégradation de l'état écologique du Silala par rapport à d'autres *bofedales* similaires non perturbés de l'Altiplano. Par conséquent, elle corrobore les évaluations et observations *qualitatives* exposées dans les précédentes études. Les conclusions concordent avec les analyses hydrologiques et les études de terrain qui ont mis en évidence les effets drainants de la chenalisation (par exemple, DHI, 2018b, et l'étude hydraulique analysée plus haut).

#### Quatrième analyse :

##### «Évaluation de l'impact sur l'environnement dans la région du Silala — deuxième partie : palynologie»

Cette étude avait pour objectif de reconstituer l'histoire du développement de la végétation au cours des 100 à 120 dernières années en vue de déterminer si la chenalisation des *bofedales* a eu une incidence sur la végétation et entraîné des changements.

Des changements dans les *bofedales* situés dans les deux vallées du Silala ont été observés au cours du siècle dernier et seraient dus au fait que l'eau de la zone a été détournée et utilisée pour des locomotives à vapeur au Chili. Les résultats de l'étude se fondent sur l'application de quatre méthodes mondialement reconnues d'évaluation des changements subis au fil du temps par les habitats et les sols.

Il est avéré que les changements observés dans les deux *bofedales* — la transformation des habitats initiaux des tourbières en habitats plus arides — se sont produits durant le siècle dernier. L'étude a permis de mettre au jour des indices montrant que les chemins d'écoulement des *bofedales*, initialement des petits cours d'eau anastomosés et des suintements à travers la végétation, font maintenant place à une chenalisation qui achemine l'eau plus rapidement à travers les *bofedales*. Ce changement peut être l'une des principales causes des altérations observées dans les habitats qui ont eu lieu au siècle dernier.

Notre analyse nous permet de conclure que les méthodes utilisées pour évaluer les conditions qui existaient au siècle dernier sont satisfaisantes et conformes à celles appliquées dans d'autres études similaires menées dans la région. Cependant, il y a lieu de mentionner que l'évaluation de la végétation antérieurement présente dans les *bofedales* nord et sud s'appuie uniquement sur l'analyse complète d'une carotte dans le *bofedal* nord et de deux carottes dans le *bofedal* sud. En outre, ces deux dernières carottes montraient une grande variation dans la stratigraphie, révélatrice de modifications dynamiques à long terme dans le *bofedal*, très probablement dues à des changements naturels à long terme dans les modalités d'écoulement de l'eau à travers les *bofedales*.

En résumé, alors que la première évaluation de l'impact sur l'environnement met en évidence, de manière quantitative, que les *bofedales* du Silala sont habités majoritairement par des espèces associées à des terres arides et, dans une moindre mesure, par des espèces associées à des *bofedales* sains, que l'on trouve dans d'autres *bofedales*, la deuxième évaluation de l'impact sur l'environnement montre que les changements se sont produits au siècle dernier, quand la chenalisation a été mise en place.

### Cinquième analyse :

#### «Analyse technique des études concernant la géologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie et l'hydrochimie du système hydrographique du Silala»

Fernando Urquidi, consultant en géologie, présente dans ce rapport une analyse technique compilée des documents suivants établis par des tiers :

- Service géologique et minier de Bolivie (SERGEOMIN, d'après le sigle espagnol), Study on the Geology, Hydrology, Hydrogeology, and Environment of the Area of the Silala Springs (Etude de la géologie, de l'hydrologie, de l'hydrogéologie et de l'environnement des sources Silala) (SERGEOMIN, 2003).
- SERGEOMIN, Structural Geological Mapping of the Area Surrounding the Silala Springs (Cartographie géologique structurale de la zone entourant les sources Silala) (SERGEOMIN, 2017).
- Université autonome Tomás Frías, Hydrogeological Characterization of the Silala Springs (Caractéristiques hydrogéologiques des sources Silala) (UATF, 2017).
- DHI, Study of the Flows in the Silala Wetlands and Spring System — Provisional Report 4 — Groundwater Flow (Etude des écoulements dans les zones humides et le système de sources du Silala — rapport provisoire 4 — Ecoulements souterrains) (DHI, 2018a).
- DHI, Etude des écoulements dans les zones humides et le système de sources du Silala (DHI, 2018b).
- Résultats des analyses isotopiques du laboratoire Hydroisotop (Urquidi, 2018).

L'auteur a résumé ainsi les principales thèses et conclusions de son étude :

- Le Silala s'est formé, sur le plan géologique, au cours de séquences volcaniques du Miocène supérieur — il y a 7,5 à 8 millions d'années — qui ont donné naissance à l'ignimbrite Silala (aquifère dominant).
- Les vallées du Silala ont ultérieurement été modifiées par des processus d'érosion glaciaire (mouvements des glaciers et eau de fonte).
- Les eaux de surface observées dans les *bofedales* et les sources du site du Silala sont tributaires des eaux souterraines.
- Le débit moyen du chenal principal du site du Silala oscille entre 160 et 120 l/s ; 60 % de ce débit semble provenir des *bofedales* nord et sud.
- Les zones de failles dans l'ignimbrite semblent être les formations qui contribuent majoritairement à l'écoulement souterrain dans le système d'eaux souterraines du Silala.
- Les propriétés hydrauliques de l'aquifère du Silala impliquent des conditions semi-captives en profondeur et des conditions libres dans les piézomètres superficiels.
- Les propriétés chimiques des eaux qui s'écoulent dans les *bofedales* nord et sud diffèrent grandement ; l'eau dans le *bofedal* nord est plus jeune et présente une plus faible concentration en matières dissoutes et en bicarbonate. Les eaux souterraines émergeant dans le *bofedal* nord pourraient être issues d'une recharge locale. Au vu de l'âge et de la composition chimique des eaux souterraines, il semblerait que la zone de recharge du *bofedal* sud soit la faille Silala.

— D’après la géologie, l’hydrologie, l’hydrogéologie et l’hydrochimie, le système d’eaux souterraines du Silala est par nature un système transfrontière.

De manière générale, l’auteur présente dans son rapport un grand nombre de données provenant de sources secondaires. La plupart semblent reproduites des documents qu’il a analysés. Cependant, en raison de l’absence de références, il est difficile de distinguer ce qui provient de sources secondaires de ce qui résulte de l’analyse technique (c’est-à-dire des conclusions subjectives de l’auteur).

Dans l’ensemble, les conclusions se fondent principalement sur l’étude 2018a du DHI ou sur des rapports utilisés dans ce cadre, et concordent en grande partie avec celles du DHI.

On constate certaines incohérences dans les données utilisées et dans les conclusions tirées, qui contredisent celles du rapport 2018b du DHI. Les principales contradictions concernent le rôle de la glaciation dans le développement de la gorge du Silala et la relation recharge-débit dans la région du Silala. Toutefois, il existe de nombreuses autres contradictions et il conviendrait de les résoudre afin de disposer d’une évaluation technique plus cohérente et homogène.

De l’avis du DHI :

- Nos conclusions sur la relation recharge-débit, malgré une certaine incertitude, semblent plus fiables que celles de l’auteur, car elles s’appuient sur des sources de données plus variées (satellites, stations au sol, tendances spatiales signalées et autres études) et des analyses plus complètes de ces données.
- La glaciation de la *gorge du Silala proprement dite* fait l’objet d’un débat quasi constant qui ne présente aucun intérêt pour le système hydrogéologique actuel ; y faire référence risque d’engendrer des discussions inutiles qui ne concernent pas les écoulements transfrontières en sous-sol ou en surface, ni la gestion de ces écoulements.

En règle générale, les informations fournies ne changent pas fondamentalement les conclusions ou les résultats des études antérieures du DHI, notamment pour ce qui est des estimations relatives à l’écoulement transfrontière.

.....

## 6. VALIDATION FINALE DES RÉSULTATS DE L'ENSEMBLE DES ÉTUDES

*La présente section décrit les résultats des cinq études examinées et évalue s'ils modifient les conclusions des études précédentes et s'ils aident à mieux comprendre, sur le plan technique, l'environnement et les aspects hydrographiques du système de sources du Silala.*

### Première analyse : étude hydraulique

#### «Caractéristiques et efficacité des ouvrages hydrauliques construits et installés dans le secteur du Silala»

*L'étude fournit des preuves détaillées de l'étendue et des propriétés des canaux. Des photos et des mesures étayent l'ampleur du système de drainage et son impact négatif sur l'environnement dans les *bofedales* naturels.*

De manière générale, notre analyse permet de conclure que cette étude apporte des informations utiles qui corroborent les conclusions des études et enquêtes de terrain précédentes, comme celle du DHI (DHI 2018b), quant à l'impact du système de canaux.

Un modèle hydraulique de la chenalisation a été mis au point à partir des données recueillies sur le terrain et exécuté. Les résultats du modèle mettent en évidence des vitesses d'écoulement élevées dans les canaux. Dans un *bofedal* naturel, le régime d'écoulement se caractérise par un écoulement lent dans un milieu poreux, la tourbe, combiné à un rejet de l'excédent sous forme de ruissellement de surface distribué selon un schéma anastomosé bidimensionnel à travers la végétation hygrophile. Ce régime n'étant pas celui des écoulements à grande vitesse concentrés que l'on observe dans les canaux actuels, *l'étude confirme que la chenalisation a modifié le régime d'écoulement dans le Silala.*

La méthodologie appliquée n'est toutefois pas valable pour mesurer les incidences *quantitatives* de la chenalisation sur les débits de surface du Silala. Pour ce faire, il faudrait quantifier les échanges hydriques entre les canaux et les zones humides et entre les eaux souterraines et les zones humides, comme dans les analyses du DHI (DHI, 2018b).

### Deuxième analyse : étude de la topographie et de la pédologie

#### «Etude de géoréférencement, de levés topographiques et détermination de la capacité d'infiltration en cas d'un éventuel ruissellement de surface dans la zone des sources Silala»

La méthodologie utilisée pour produire les *levés topographiques* détaillés nous semble valable pour les besoins de l'étude, et les résultats de celle-ci sont certainement utiles pour continuer à étudier l'hydrologie et l'hydrogéologie dans la zone concernée.

Malheureusement, aucune comparaison n'est faite avec les précédents levés topographiques effectués pour le DIREMAR et appliqués aux fins du géoréférencement des sources et des piézomètres dans les études antérieures. En particulier, il n'y a aucune référence au précédent modèle numérique de terrain détaillé (DIREMAR, 2017) ou aux corrections qui seraient éventuellement nécessaires pour aligner celui-ci sur les nouveaux repères. De telles informations auraient apporté une valeur ajoutée considérable aux résultats.

L'étude pédologique fait apparaître une prédominance de sols sableux sur toute la zone à l'examen. Les sols présentent tous de fortes capacités d'infiltration et sont bien drainés puisqu'aucun des sites testés à l'extérieur des zones humides n'atteignait la nappe phréatique libre.

Les expériences sur le terrain font état de capacités d'infiltration 10 fois supérieures à celles utilisées dans les précédentes études. Si ces valeurs peuvent être incertaines, voire trop élevées, les expériences confirment toutefois les conclusions des précédentes études quant à l'absence de ruissellement de surface à l'extérieur des zones humides, ce qui signifie que les sources et zones humides du Silala sont quasi entièrement alimentées par des eaux souterraines.

### Troisième analyse :

#### «Etude d'évaluation de l'impact sur l'environnement dans la région du Silala — première partie»

Les résultats montrent que la structure de la végétation a été altérée, le couvert végétal étant plus fragmenté (désintégré) et dégradé, tout comme sa diversité. Certaines surfaces des *bofedales* du Silala avaient une végétation typique des zones humides, mais d'autres présentaient une végétation propre aux terres arides. Selon l'étude, la chenalisation est la principale cause du développement de zones arides et de la dégradation des conditions environnementales en ce qui concerne les facteurs tant biotiques qu'abiotiques. Les principaux éléments attestant cette situation proviennent de l'étude de la répartition de la végétation et des espèces dans les *bofedales*, dont les résultats ont été comparés avec des études menées dans d'autres *bofedales* non perturbés de la région.

Les études ont permis de confirmer que les *bofedales* du Silala comptent plus d'espèces des milieux arides et davantage de surfaces couvertes de plantes généralement présentes dans les zones marginales arides, tandis que la végétation typique des *bofedales* est moins présente et ne recouvre ici qu'une petite portion.

L'équipe de recherche a retenu une approche classique et éprouvée pour décrire l'état actuel des *bofedales* s'agissant de la flore et de la faune ; les résultats de chaque étude sont présentés dans le rapport. Les conclusions tirées se fondent principalement sur la répartition des types de végétation en fonction de l'aridité ou de l'humidité des sols, car les observations des diverses faunes (poissons, oiseaux, amphibiens et reptiles et macroinvertébrés) n'ont pas apporté grand-chose.

Cette étude fournit les premières analyses quantitatives attestant la dégradation de l'état écologique du Silala par rapport à d'autres *bofedales* similaires non perturbés de l'Altiplano. Par conséquent, elle corrobore les évaluations et observations *qualitatives* exposées dans les précédentes études. Les conclusions concordent avec les analyses hydrologiques et les études de terrain qui ont mis en évidence les effets drainants de la chenalisation (par exemple, DHI, 2018b, et l'étude hydraulique analysée plus haut).

### Quatrième analyse :

#### «Etude d'évaluation de l'impact sur l'environnement dans la région du Silala — deuxième partie : palynologie»

Les résultats de cette étude se fondent sur l'application de quatre méthodes mondialement reconnues d'évaluation des changements subis au fil du temps par les habitats et les sols.

*Il est avéré que les changements observés dans les deux bofedales — la transformation des habitats initiaux des tourbières en habitats plus arides — se sont produits durant le siècle dernier. L'étude a permis de mettre au jour des indices montrant que les chemins d'écoulement des bofedales, initialement des petits cours d'eau anastomosés et des suintements à travers la végétation, font maintenant place à une chenalisation qui achemine l'eau plus rapidement à travers les bofedales. Ce changement peut être l'une des principales causes des altérations observées dans les habitats qui ont eu lieu au siècle dernier.*

Notre analyse nous permet de conclure que les méthodes utilisées pour évaluer les conditions qui existaient au siècle dernier sont satisfaisantes et conformes à celles appliquées dans d'autres études similaires menées dans la région. Cependant, il y a lieu de mentionner que l'évaluation de la végétation antérieurement présente dans les *bofedales* nord et sud s'appuie uniquement sur l'analyse complète d'une carotte dans le *bofedal* nord et de deux carottes dans le *bofedal* sud. En outre, ces deux dernières carottes montraient une grande variation dans la stratigraphie, révélatrice de modifications dynamiques à long terme dans le *bofedal*, très probablement dues à des changements naturels à long terme dans les modalités d'écoulement de l'eau à travers les *bofedales*.

En résumé, alors que la première évaluation de l'impact sur l'environnement met en évidence, de manière quantitative, que les *bofedales* du Silala sont habités majoritairement par des espèces associées à des terres arides et, dans une moindre mesure, par des espèces associées à des *bofedales* sains, que l'on trouve dans d'autres *bofedales*, la deuxième évaluation de l'impact sur l'environnement montre que les changements se sont produits au siècle dernier, quand la chenalisation a été mise en place.

### Cinquième analyse :

#### «Analyse technique des études concernant la géologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie et l'hydrochimie du système hydrographique du Silala»

Dans l'ensemble, les conclusions de l'auteur se fondent principalement sur l'étude 2018a du DHI ou sur des rapports utilisés dans ce cadre, et concordent en grande partie avec celles du DHI.

Cependant, les observations formulées ne semblent pas être strictement le fruit d'une interprétation objective technique des données et analyses présentées. En effet, de nombreuses affirmations ne sont pas étayées et certains documents d'où l'auteur tire ses conclusions ne sont pas présentés ou mentionnés.

On constate certaines incohérences dans les données utilisées et dans les conclusions, qui contredisent celles du rapport 2018b du DHI. Les principales contradictions concernent le rôle de la glaciation dans le développement de la gorge du Silala et la relation recharge-débit dans la région du Silala. Toutefois, il existe de nombreuses autres contradictions et il conviendrait de les résoudre afin de disposer d'une évaluation technique plus cohérente et homogène.

De l'avis du DHI :

- Nos conclusions sur la relation recharge-débit, malgré une certaine incertitude (principalement en raison du climat), semblent plus fiables que celles de l'auteur, car elles s'appuient sur des sources de données plus variées (satellites, stations au sol, tendances spatiales signalées et autres études) et des analyses plus complètes de ces données.
- Le débat sur la glaciation de *la gorge du Silala proprement dite* ne présente aucun intérêt pour le système hydrogéologique actuel et ne concerne pas les écoulements transfrontières en sous-sol ou en surface, ni la gestion de ces écoulements.

En règle générale, les informations fournies ne changent pas fondamentalement les conclusions ou les résultats des études antérieures du DHI, notamment pour ce qui est des estimations relatives à l'écoulement transfrontière.

## 7. BIBLIOGRAPHIE (RÉFÉRENCES)

Consultores Technicos Ingenieria & Construcción Campos Barron S.R.L., La Paz, Bolivie), Study of georeferencing, topographic survey and determination of the infiltration capacity in the event of possible surface runoff in the area of the Silala Springs (2018) (Etude de géoréférencement, de levés topographiques et détermination de la capacité d'infiltration en cas d'un éventuel ruissellement de surface dans la zone des sources Silala).

FUNDECO (Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivie), Environmental Impact Assessment Study in Silala, Part 1 (2018) (Evaluation de l'impact sur l'environnement dans la région du Silala — première partie).

FUNDECO (Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivie), Environmental Impact Assessment Study in Silala, Part 2: Palinologia (2018) (Evaluation de l'impact sur l'environnement dans la région du Silala — deuxième partie : palynologie).

Fox, R. H., «Engineering hydraulic works to capture and analyse the water of the Siloli Plains» (1922), *South African Journal of Science*, vol. 19, p. 120-131.

Instituto de Hidraulica e Hidrología (IHH, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivie), Caractéristiques et efficacité des ouvrages hydrauliques construits et installés dans le secteur du Silala (2018).

Ministerio de Energias, Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnologia Nuclear, Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, Unidad de Analisis y Calidad Ambiental, La Paz, Bolivie, Análisis Físico Químico de Aguas (2017).

DIREMAR, Digital Surface Model (DSM) based on measurements taken during the drone flight in last half of 2016 (2017) (DIREMAR, 2017).

DHI, Study of the Flows in the Silala Wetlands and Spring System — Provisional Report 4 — Groundwater Flow (janvier 2018) (DHI, 2018a).

DHI, Etude des écoulements dans les zones humides et le système de sources du Silala (mars 2018), rapport final, produit n° 2-2018, contrat CDP-I n° 01/2018 (DHI, 2018b).

Arcadis, Detailed Hydrogeological Study of the Silala River (2017), Cour internationale de Justice, *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)*, mémoire de la République du Chili, vol. IV, appendice E.

Wheater et Peach, rapport d'experts 1 (2017), p. 17, Cour internationale de Justice, *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)*, mémoire de la République du Chili, vol. I.

Yang Wang *et al.*, «Radiocarbon dating of soil organic matter» (1996), *Quaternary Research*, vol. 45, n° 3, p. 282-288.

Tyler *et al.*, «The extent and significance of bioturbation on <sup>137</sup>Cs distributions in upland soils», 2000, *Catena* 43-2001. p. 81-99.

Urquidi, Technical Analysis of Geological, Hydrological, Hydrogeological and Hydrochemical Surveys Completed for the Silala Water System, juin 2018 (Analyse technique des études concernant la géologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie et l'hydrochimie du système hydrographique du Silala), DIREMAR, La Paz, Bolivie (Urquidi, 2018).

Houston J., «Groundwater recharge through an alluvial fan in the Atacama Desert, northern Chile: mechanisms, magnitudes and causes» (2002), *Hydrological Processes* 16: 3019-3035.

Houston J., «Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: an evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques» (2007), *Journal of Hydrology* 334: 534-544.

SERGEOMIN, Study on the Geology, Hydrology, Hydrogeology, and Environment of the Area of the Silala Springs (juin 2003), La Paz, Bolivie (SERGEOMIN, 2003).

SERGEOMIN, Structural Geological Mapping of the Area Surrounding the Silala Springs (2017), La Paz, Bolivie (SERGEOMIN, 2017).

Université autonome Tomás Frías, Hydrogeological Characterization of the Silala Springs (2017), Potosí, Bolivie (UATF, 2017).

---

**ANNEXE 23.1**

**IHH, CARACTÉRISTIQUES ET EFFICACITÉ DES OUVRAGES HYDRAULIQUES  
CONSTRUITS ET INSTALLÉS DANS LE SECTEUR DU SILALA, 2018**

*[Traduction établie par le Greffe à partir de la traduction anglaise de l'original espagnol fournie par la Bolivie]*

**Rapport final, avril 2018**

**Etabli par MM. Montaña Vargas, Luna Vera, Fuchs Arce et Mme Mejia Gamarra,  
chercheurs de l'institut d'hydraulique et d'hydrologie de l'Université  
supérieure de San Andrés (IHH-UMSA)**

## TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
LISTE DES FIGURES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX .....	viii
LISTE DES ACRONYMES .....	ix
RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE .....	x
1. INTRODUCTION .....	1
1.1. Contexte .....	1
1.2. Objectif.....	1
1.3. Structure du rapport .....	1
1.4. Emplacement.....	2
1.5. Méthodologie .....	2
2. EXAMEN DE LA DOCUMENTATION ET RAPPORT D'ANALYSE.....	4
2.1. Concession pour la réalisation d'ouvrages hydrauliques .....	4
2.1.1. Rapport Fox (1922) .....	4
2.2. Ouvrages de captage et de chenalisation des sources .....	5
3. CONDITIONS NATURELLES.....	6
3.1. Masses d'eau du Silala .....	6
3.1.1. <i>Bofedales</i> .....	6
3.1.2. Caractéristiques des <i>bofedales</i> du Silala.....	7
3.1.3. Circulation de l'eau dans les <i>bofedales</i> .....	11
3.2. Apports d'origine souterraine – sources .....	13
4. RÉGIME D'ÉCOULEMENT .....	16
4.1. Débits dans le <i>bofedal</i> sud .....	16
4.2. Débits dans le <i>bofedal</i> nord.....	17
4.3. Tronçon de la confluence du <i>bofedal</i> sud et du <i>bofedal</i> nord .....	18
5. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES OUVRAGES HYDRAULIQUES.....	26
5.1. Généralités .....	26

5.2. Ouvrages dans le <i>bofedal</i> sud.....	28
5.2.1. Description détaillée .....	28
5.2.2. Tronçons de canaux creusés dans la roche .....	43
5.2.3. Synthèse des ouvrages du <i>bofedal</i> sud.....	45
5.3. Ouvrages dans le <i>bofedal</i> nord.....	46
5.3.1. Synthèse des ouvrages du <i>bofedal</i> nord.....	55
5.4. Canal du tronçon de la confluence .....	56
5.4.1. Description détaillée .....	56
5.4.2. Synthèse des ouvrages du tronçon de la confluence.....	59
6. DESCRIPTION ET CLASSIFICATION DES OUVRAGES DE CAPTAGE D'EAU .....	60
6.1. Ouvrages de captage d'eau.....	60
6.1.1. Classification .....	60
6.1.2. Captages spécifiques mineurs.....	60
6.1.3. Ouvrages de captage longitudinal.....	61
6.1.4. Captage spécifique majeur.....	65
6.1.5. Adduction .....	67
7. DESCRIPTION DU PROCESSUS DE TRANSPORT SOLIDE .....	68
7.1. Processus liés à l'érosion laminaire .....	68
7.2. Transport solide dans les canaux.....	69
8. MODÉLISATION HYDRAULIQUE DE L'ÉCOULEMENT DE SURFACE DANS HEC-GEORAS .....	71
8.1. Objectif spécifique .....	71
8.2. Modélisation hydraulique .....	71
8.3. Méthodologie .....	72
8.4. Géométrie du réseau hydrologique .....	73
8.5. Gradient du système de drainage .....	77
8.6. Coefficient de Manning (n).....	78
8.7. Scénario hydrologique du réseau .....	80
8.8. Régime hydraulique de l'écoulement.....	83

8.8.1. Campagne de mesures d'avril 2018.....	83
8.9. Simulation hydraulique de l'écoulement de surface avec HEC-RAS.....	84
8.10. Résultats de la modélisation hydraulique.....	87
9. CONCLUSIONS.....	87
9.1. Conditions naturelles.....	87
9.2. Etat des interventions sur les masses d'eau.....	89
9.3. Synthèse .....	91
RÉFÉRENCES.....	92
10. ANNEXES [ <i>non traduites</i> ]	

Annexe 1 : Caractéristiques détaillées des canaux des *bofedales* sud, nord et de confluence

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* sud – stations 0+000 à 0+099.04

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* sud – stations 0+170 à 0+288.08

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* sud – stations 1+760 à 1+783.66

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* sud – tronçon 1

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* sud – tronçon 2

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* sud – tronçon 3

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* sud – tronçon 4

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* sud – tronçon 5

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* sud – tronçon 6

Description des caractéristiques physiques du *bofedal* nord – stations 0+260 à 0+360

Description des caractéristiques physiques du canal de la confluence – stations 2+920 à 2+970

Annexe 2 : Caractéristiques des canaux du *bofedal* sud

Annexe 3 : Mesure de la qualité de l'eau dans les canaux des sources du Silala

LISTE DES FIGURES

	<i>Page</i>
Figure 1. Emplacement de la zone étudiée.....	3
Figure 2. Dépôts quaternaires (SERGEOMIN, 2017).....	6
Figure 3. Masse d'eau en tant qu'unité .....	7
Figure 4. Origine souterraine des eaux du Silala, a) <i>bofedal</i> nord, b) <i>bofedal</i> sud .....	7
Figure 5. Absence de trace de ruissellement en surface.....	8
Figure 6. Couvert végétal, a) <i>bofedal</i> nord, b) <i>bofedal</i> sud.....	8
Figure 7. Tronçon de la confluence, a) présence de tourbe, b) route d'accès .....	9
Figure 8. Schéma de section transversale du <i>bofedal</i> du Silala .....	10
Figure 9. Catégorie du <i>bofedal</i> du Silala selon l'hydropériode (Jackson, <i>et al.</i> , 2014) .....	11
Figure 10. Sources répertoriées dans le <i>bofedal</i> sud (Campos Barron – DIREMAR, 2018).....	14
Figure 11. Sources répertoriées dans le <i>bofedal</i> nord (Campos Barron – DIREMAR, 2018).....	15
Figure 12. Séries de débits mensuels (l/s) – Stations de mesure C1 à C7 (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	16
Figure 13. Variation spatiale du débit dans le <i>bofedal</i> sud (pour la période comprise entre mai 2017 et mars 2018) (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	17
Figure 14. Variation spatiale du débit dans le <i>bofedal</i> nord (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	18
Figure 15. Variation spatiale du débit dans le tronçon de la confluence des <i>bofedales</i> nord et sud (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	19
Figure 16. Séries de débits mensuels moyens (l/s) – Stations de mesure simultanées – <i>Bofedal</i> sud (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	20
Figure 17. Séries de débits mensuels moyens (l/s) – Stations de mesure simultanées – <i>Bofedal</i> nord (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	21
Figure 18. Débits mensuels moyens (l/s) – Stations de mesure simultanées – Tronçon de la confluence (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	22
Figure 19. Carte de localisation des points de contrôle hydraulique des stations de mesure en continu des sources du Silala (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	23
Figure 20. Carte de localisation des points de contrôle hydraulique des stations de mesure en simultané des sources du Silala (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	24

Figure 21. Carte de localisation des sources du Silala (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018)).....	25
Figure 22. Disposition du réseau de canaux des sources du Silala .....	27
Figure 23. Sources 01 à 04.....	28
Figure 24. Barrage de retenue d'eau et sources en amont dans le <i>bofedal</i> sud .....	29
Figure 25. Ouvrage de captage d'eau et bassin de désensablement.....	30
Figure 26. Sédiments dans la zone supérieure des sources et des <i>bofedales</i> sud .....	31
Figure 27. Lit couvert de sédiments constitués de graviers angulaires.....	31
Figure 28. Chambre d'adduction et canalisation d'acheminement de l'eau .....	32
Figure 29. Canaux d'acheminement de l'eau des sources .....	32
Figure 30. Jonction artificielle ancienne des canaux et sortie actuelle pour mesurer le débit.....	33
Figure 31. <i>Bofedal</i> sud après le captage de l'eau au moyen d'actions de drainage .....	34
Figure 32. Secteurs secs du <i>bofedal</i> sud.....	35
Figure 33. Réservoir.....	36
Figure 34. Espèce indigène (crapaud).....	36
Figure 35. Caractéristiques du canal et du <i>bofedal</i> autour du déversoir 3 .....	37
Figure 36. Fossé permettant aux véhicules de franchir un tronçon canalisé du <i>bofedal</i> .....	37
Figure 37. Rétrécissement du <i>bofedal</i> et canal creusé par le <i>bofedal</i> .....	38
Figure 38. Canal couvert de broussailles très abondantes.....	38
Figure 39. Canal dans le tronçon de l'avant-poste militaire de Silala.....	39
Figure 40. Rétrécissement du tronçon du canal avec écoulement naturel.....	40
Figure 41. Tronçon avec canal naturel et canal modifié à proximité du déversoir 3 .....	40
Figure 42. Chute d'eau et <i>bofedal</i> dans la zone du canal ( <i>bofedal</i> sud).....	41
Figure 43. Tronçon situé dans la gorge et chenalisation à proximité de l'extrémité du <i>bofedal</i> sud.....	42
Figure 44. Tronçon situé dans la gorge et chenalisation à l'extrémité du <i>bofedal</i> sud .....	43
Figure 45. Localisation des tronçons avec revêtement de pierres dans le <i>bofedal</i> sud (création interne selon les données du DIREMAR et de Google Earth).....	44
Figure 46. Partie supérieure du <i>bofedal</i> nord .....	46

Figure 47. Pierres assemblées sur les pentes du <i>bofedal</i> nord .....	47
Figure 48. Secteur supérieur du <i>bofedal</i> nord .....	47
Figure 49. Tronçon supérieur du canal de drainage dans le <i>bofedal</i> nord.....	48
Figure 50. Fond et pente du canal dans le <i>bofedal</i> nord.....	49
Figure 51. Fossé pour le passage des véhicules et canalisation pour l'écoulement de l'eau .....	49
Figure 52. Tronçon de canalisations mineures (canaux secondaires) .....	50
Figure 53. Zone inondée dans le <i>bofedal</i> nord.....	51
Figure 54. Captage des sources au moyen de canalisations et de canaux recouverts de pierres.....	52
Figure 55. Protection d'une source et chenalisation en forme de dôme.....	52
Figure 56. Captage de l'eau des sources .....	53
Figure 57. Vue de la source 50 .....	53
Figure 58. Vue panoramique 1 du réseau de canaux dans le <i>bofedal</i> nord .....	54
Figure 59. Vue panoramique 2 du réseau de canaux dans le <i>bofedal</i> nord .....	55
Figure 60. Vue de la confluence des canaux des <i>bofedales</i> sud et nord.....	57
Figure 61. Vue du canal maçonné en direction de la frontière avec le Chili .....	57
Figure 62. Ouvrages de captage, bassin de désensablement et bassin de chargement à proximité de la frontière.....	58
Figure 63. Vue panoramique de la sortie du canal en direction de la frontière.....	58
Figure 64. Captage de l'eau provenant des sources .....	60
Figure 65. Canaux de captage longitudinal avec revêtement de pierres .....	61
Figure 66. Canaux types du <i>bofedal</i> nord .....	62
Figure 67. Masse d'eau de zone humide a) à l'état naturel et b) après intervention.....	62
Figure 68. Captage de l'eau dans les <i>bofedales</i> , a) avant la construction des canaux et b) après la construction des canaux.....	63
Figure 69. Disposition du canal principal et des canaux secondaires dans le <i>bofedal</i> nord.....	64
Figure 70. Canal principal et canaux secondaires dans le <i>bofedal</i> sud .....	64
Figure 71. Canal principal et canaux secondaires dans le <i>bofedal</i> nord.....	65
Figure 72. Vue panoramique où l'on distingue le canal principal du <i>bofedal</i> nord.....	65

Figure 73. Ouvrage de captage d'eau avec bassin de désensablement et bassin de chargement à proximité de la frontière .....	66
Figure 74. Ouvrage de captage d'eau (DIREMAR).....	67
Figure 75. Flanc de coteau du <i>bofedal</i> nord sans trace d'érosion .....	68
Figure 76. Sédiments dans les canaux et à flanc de coteau dans la partie supérieure des <i>bofedales</i> .....	69
Figure 77. Niveaux de l'eau dans les déversoirs C1 à C6 entre décembre 2017 et mars 2018.....	70
Figure 78. Carte de l'étude topographique avec courbes de niveau tous les mètres et tous les 20 cm (création interne selon la topographie fournie par le DIREMAR) .....	73
Figure 79. Carte du modèle de terrain numérique et génération du modèle géométrique dans ArcGIS (création interne selon la topographie fournie par le DIREMAR) .....	74
Figure 80. Géométrie dans le modèle HEC-RAS (modèle d'élévation numérique – Digital Elevation Model (DEM)), points d'emplacement des électrodes, sections transversales) (création interne selon la topographie fournie par le DIREMAR).....	75
Figure 81. Géométrie dans le modèle HEC-RAS (perspective, sections transversales) (création interne).....	76
Figure 82. Profil longitudinal du cours principal (création interne).....	77
Figure 83. Système hydraulique du Silala et points de mesure en continu surveillés par le SENAMHI .....	82
Figure 84. Présentation de la simulation hydraulique dans RAS Mapper (Silala).....	86

**LISTE DES TABLEAUX**

	<i>Page</i>
Tableau 1. Généralités sur les sources du Silala (SENAMHI-DIREMAR, 2018).....	14
Tableau 2. Catégorie et nombre de sources des <i>bofedales</i> sud et nord (SENAMHI-DIREMAR, 2018).....	15
Tableau 3. Classification des tronçons selon la pente. Caractéristiques physiques détaillées du tronçon avec affleurement rocheux, <i>bofedal</i> sud .....	43
Tableau 4. Longueurs des canaux du <i>bofedal</i> sud (mesures exprimées en mètres) .....	45
Tableau 5. Longueurs des canaux du <i>bofedal</i> nord (mesures exprimées en mètres) .....	56
Tableau 6. Longueurs des canaux dans le tronçon de la confluence (mesures exprimées en mètres) .....	59
Tableau 7. Valeurs de référence du coefficient de rugosité de Manning (Ven Te Chow).....	79
Tableau 8. Valeurs de référence du coefficient de rugosité de Manning (suite) (Ven Te Chow).....	80
Tableau 9. Ecoulements moyens incrémentiels mesurés aux points de mesure en continu «C» (création interne selon les données du SENAMHI) .....	81
Tableau 10. Ecoulements incrémentiels moyens mesurés aux points de mesure en continu «C» (création interne selon les données du SENAMHI) .....	81
Tableau 11. Caractéristiques hydrauliques aux points de mesure de la campagne d’avril 2018 .....	83
Tableau 12. Caractéristiques hydrauliques aux points de mesure pendant la campagne d’avril 2018.....	90

**LISTE DES ACRONYMES**

<b>ALC</b>	Amérique latine et Caraïbes
<b>DIREMAR</b>	Bureau stratégique de reconnaissance des prétentions maritimes, du Silala et des ressources hydriques internationales
<b>HAA</b>	High Andean Wetlands (zones humides des hauts plateaux andins)
<b>IHH</b>	Institut d'hydraulique et d'hydrologie
<b>UMSA</b>	Université supérieure de San Andrés
<b>IGM</b>	Institut géographique militaire
<b>MMAyA</b>	Ministère de l'environnement et de l'eau
<b>MPD</b>	Ministère de la planification du développement
<b>SENAMHI</b>	Service national de météorologie et d'hydrologie
<b>SERGEOMIN</b>	Service géologique et minier
<b>SNHN</b>	Service national d'hydrographie navale
<b>VIPFE</b>	Vice-ministère d'investissement public et de financement externe

## RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE

L'étude montre que le degré d'intervention dans les *bofedales* du Silala a été particulièrement élevé, comme en témoignent l'importance des ouvrages construits et la grande efficacité du captage et de la chenalisation de l'eau. La longueur des canaux construits dépasse 6 kilomètres et près d'une centaine d'ouvrages servent au captage des sources les plus productives. Par sa chenalisation dans les canaux construits, l'eau qui s'écoulait à très petite vitesse à l'état naturel a atteint des débits comparativement beaucoup plus élevés.

Les interventions ont non seulement eu un impact sur l'acheminement naturel de l'eau des sources aux *bofedales*, mais elles ont également transformé la structure même des *bofedales*, qui sont drainés grâce aux canaux perméables mis en place.

Les ouvrages hydrauliques ont eu une forte incidence sur le milieu naturel puisque la fonction initiale de ces masses d'eau agissant comme réservoirs naturels et régulateurs du système sol-eau-biotope n'a pas été respectée.

La préservation des masses d'eau a été subordonnée à une conception interventionniste visant essentiellement à augmenter le volume d'eau captée à des fins d'usage.

En bref, l'objectif principal a été de drainer les masses d'eau des sources et des *bofedales*.

# 1

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Contexte

Par le décret suprême n° 2760 du 11 mai 2016 a été créé le bureau stratégique de défense des sources du Silala et de toutes les ressources hydriques à la frontière avec la République du Chili (DIRENILALA) dont le rôle est d'étudier les solutions juridiques permettant d'assurer la défense des sources du Silala et autres ressources en eau devant les instances internationales compétentes.

Le 6 juin 2016, la République du Chili a saisi la Cour internationale de Justice d'une plainte contre l'Etat plurinational de Bolivie portant sur la question du statut et de l'utilisation des eaux du Silala (*Chili c. Bolivie*). Une date limite a été fixée pour la présentation d'un contre-mémoire par la Bolivie.

Dans ce contexte, le Gouvernement de l'Etat plurinational de Bolivie a publié le décret suprême n° 3131 du 29 mars 2017 qui fusionne le bureau stratégique de reconnaissance des prétentions maritimes (DIREMAR) avec le DIRENILALA, créant ainsi le bureau stratégique de reconnaissance des prétentions maritimes, du Silala et des ressources hydriques internationales dont l'acronyme reste DIREMAR.

En vue de structurer les aspects techniques de la défense procédurale des eaux des sources du Silala, et afin de connaître les caractéristiques des ouvrages construits ayant modifié l'écoulement de l'eau émergeant naturellement des sources, et apprécier l'efficacité hydraulique augmentée délibérément pour capter un plus grand volume d'eau, il a paru nécessaire d'entreprendre des études hydrauliques techniques. Dans le cadre de ses compétences, le DIREMAR a confié à l'IHH (institut d'hydraulique et d'hydrologie), sous l'égide de l'UMSA (Université supérieure de San Andrés), l'élaboration de l'étude «Caractéristiques et efficacité des ouvrages hydrauliques construits et installés dans le secteur du Silala».

# 2

### 1.2. Objectif

L'objectif général de l'étude est le suivant :

Réaliser une étude technique des caractéristiques et de l'efficacité des ouvrages hydrauliques construits et installés dans le secteur du Silala.

### 1.3. Structure du rapport

Le rapport examinera successivement les points suivants :

- 1) Examen de la documentation : analyse des documents précédents qui concernent les ouvrages hydrauliques construits dans le secteur des sources du Silala.
- 2) Conditions naturelles : caractéristiques de la circulation de l'eau dans les masses d'eau existantes, dans leur état naturel, avant toute intervention.
- 3) Recensement et description des matériaux utilisés : travaux réalisés sur le terrain pour analyser les ouvrages hydrauliques et autres infrastructures.
- 4) Quantification des ouvrages hydrauliques dans le secteur du Silala : recensement des interventions réalisées.

- 5) Caractéristiques physiques détaillées de tous les ouvrages hydrauliques (longueur, superficie, sections, diamètres, gradients, etc.).
- 6) Description et classification des ouvrages de captage d'eau construits dans les sources.
- 7) Caractéristiques physiques détaillées des sections sans chenalisation (longueur, superficie, sections, diamètres, gradients, etc.).
- 8) Evaluation du transport solide qui se produit dans le secteur.
- 9) Simulation du comportement hydrodynamique des écoulements dans le réseau de canaux principal à l'aide du modèle mathématique HEC-GeoRAS (Hydrologic Engineering Center, 2011) dans les conditions actuelles.
- 10) Conclusions.

#### 1.4. Emplacement

Les eaux du Silala sont situées dans le canton de Quetena Chico, municipalité de San Pablo de Lipez, province de Sud Lipez, département de Potosí (figure 1). Les masses d'eau sont classées comme suit en fonction de leur localisation :

- Tronçon nord correspondant au *bofedal* nord.
- Tronçon sud correspondant au *bofedal* sud.
- Tronçon de la confluence et continuation vers la frontière entre la Bolivie et le Chili.

3

Les dénominations seront utilisées pour décrire les conditions de circulation de l'eau en fonction des ouvrages hydrauliques existants et de leurs caractéristiques opérationnelles.

#### 1.5. Méthodologie

L'étude menée a consisté à examiner en détail le terrain et à analyser les informations bibliographiques disponibles, à la fois celles déjà publiées au cours des dernières années et celles retrouvées dans d'autres publications internationales datant de la période des interventions réalisées sur les sources du Silala. Tous les documents concernés sont recensés dans la bibliographie figurant à la fin de la présente étude.

Les inspections menées sur le terrain et les informations recueillies sur site ont permis à l'IHH-UMSA de réaliser un inventaire géographique, topographique, documentaire, scientifique et technique des ouvrages hydrauliques installés dans le secteur du Silala afin d'en décrire en détail le fonctionnement et les effets.

L'analyse des données, la recherche et les conclusions auxquelles sont parvenus les auteurs du présent document sont étayées par des travaux d'inspection technique réalisés sur le terrain. Il convient de mentionner également des travaux antérieurs : les mesures hydrométriques effectuées par le Service national de météorologie et d'hydrologie (SENAMHI) ainsi que par l'institut géographique militaire (IGM, 2016) et les études topographiques et les relevés de canaux réalisés en 2018 par le cabinet de conseil en ingénierie technique CB Engineering and Construction.

Les données recueillies sur le terrain ont été traitées et intégrées à une simulation hydraulique en vue de déterminer les conditions hydrodynamiques de l'écoulement dans les canaux.

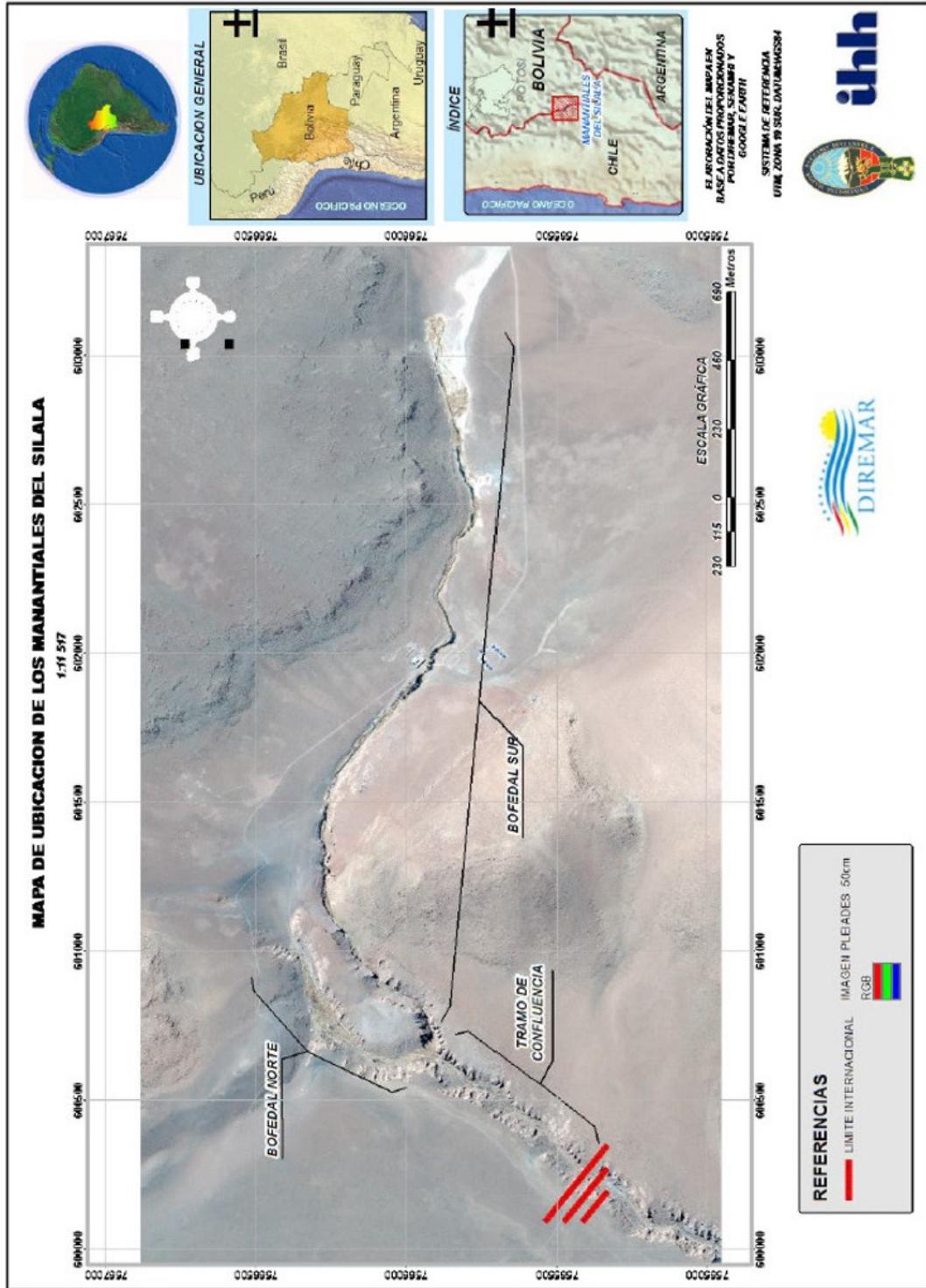


Figure 1  
Emplacement de la zone étudiée

5

**2. EXAMEN DE LA DOCUMENTATION ET RAPPORT D'ANALYSE**

**2.1. Concession pour la réalisation d'ouvrages hydrauliques**

**2.1.1. Rapport Fox (1922)**

Le rapport Fox (1922) est l'un des documents qui décrit les premières actions réalisées sur les masses d'eau du Silala. Ce document évoque l'existence de quatre sources d'alimentation dans lesquelles la compagnie a le droit de prélever de l'eau et fait référence à un «cours d'eau Siloli» situé à 14 154 pieds (4314 mètres) au-dessus du niveau de la mer, c'est-à-dire au-dessus de la frontière qui est elle-même à 4306 mètres au-dessus du niveau de la mer. La compagnie à laquelle il est fait référence est l'Antofagasta (Chili) and Bolivia Railway Company.

Les observations suivantes peuvent être faites au sujet de la description contenue dans le rapport Fox (1922) :

— Le document fait référence à un «cours d'eau Siloli». Sur ce point, il convient de noter que, selon le glossaire international d'hydrologie de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) (2012), le terme «cours d'eau» (*stream*) recouvre quatre notions :

- 1) Masse d'eau s'écoulant dans un canal naturel (chenal).
- 2) Eau s'écoulant dans une conduite ouverte ou fermée.
- 3) Jet d'eau sortant d'un orifice.
- 4) Rivière souterraine s'écoulant dans une formation karstique.

— Ainsi, dans le rapport Fox, le Silala est décrit comme un «cours d'eau», terme qui ne correspond pas au processus physique de circulation de l'eau qui se produit dans les masses d'eau du Silala, car à l'état naturel il n'existait pas de canal (chenal) naturel et la circulation de l'eau se produisait naturellement dans une interaction entre l'eau, le sol et le biotope, comme nous le verrons plus loin.

— Le rapport Fox fait référence à d'autres sources utilisées par la compagnie : «la rivière San Pedro», les «sources de Palpana» et les «sources de Polapi». Pour commencer, la description de la rivière San Pedro montre que celle-ci est clairement distinguée de la notion de cours d'eau appliquée au Silala, ce dernier n'étant pas qualifié de rivière mais d'écoulement, bien qu'en réalité sa masse d'eau ne corresponde pas à la définition d'écoulement (cours d'eau).

— Il faut également noter que le document de l'OMM (n° 385) définit le terme «rivière» comme un «cours d'eau important drainant naturellement un bassin», or le rapport Fox n'y fait jamais référence ou n'inclut pas dans la catégorie «rivière» les masses d'eau du Silala. De plus, dans le glossaire de l'OMM, le terme «source» est défini comme un «lieu d'où l'eau émerge naturellement du sol ou de la roche et s'écoule soit à la surface du sol soit dans une masse d'eau superficielle», ce qui correspond aux caractéristiques des masses d'eau du Silala, compte tenu du fait que celles-ci proviennent de sources.

6

— Fox indique qu'un petit barrage a été construit en travers du Siloli et qu'il produit un débit quotidien de 11 300 mètres cubes (avec des variations très faibles). Sur ce point, il est nécessaire d'apporter les précisions suivantes :

— Il n'y a aucune preuve sur le territoire bolivien de l'existence d'un petit barrage, mais plus loin, l'auteur indique que cet ouvrage serait «l'ouvrage de captage» (prise d'eau) dont l'emplacement est le plus élevé au monde, or l'ouvrage de captage qui existe actuellement

sur le territoire bolivien correspond à celui décrit par Fox. Fox précise aussi que, pour fournir une eau de bonne qualité, une conduite d'acheminement a été mise en place en 1900 sur plusieurs sources éloignées situées dans la cordillère des Andes.

- Il est indiqué que le débit présente de «très faibles variations». A ce sujet, il est pertinent de remarquer que les bassins hydrographiques «conventionnels», qui réagissent à un certain volume de précipitations, présentent d'importantes variations d'écoulement : en saison sèche, le débit est faible tandis qu'en saison humide il est élevé, ce qui est le régime type d'une rivière (qui correspond au rapport précipitations/ruissellement dans un bassin). Préciser que le débit présente de «très faibles variations» revient à établir les caractéristiques de ces eaux et à reconnaître que l'apport de la masse d'eau du Silala provient de la remontée des eaux souterraines qui se manifeste par l'apport des sources, un débit qui présente de «très faibles variations», c'est-à-dire qu'il est pratiquement constant tout au long de l'année. Cette affirmation corrobore le fait que les eaux du Silala ne correspondent pas au rapport précipitations/ruissellement dans son bassin (précipitations ne produisant pas de ruissellement).

## 2.2. Ouvrages de captage et de chenalisation des sources

En 1928, plus précisément par la lettre n° 143 du 27 janvier 1928, il a été proposé de construire des ouvrages de captage et de chenalisation des sources (commande n° 1441), à la demande de l'Antofagasta (Chili) & Bolivia Railway Company Ltd., qui estimait nécessaire de réaliser la construction de canaux ouverts à partir des sources de Siloli.

Ce document propose comme première possibilité d'implanter des canaux en terre depuis les sources supérieures jusqu'aux ouvrages de captage d'eau déjà existants. Il propose en deuxième possibilité de construire des canaux en béton et non en terre. Il est cependant précisé que, si nécessaire, la construction des canaux en terre sera préalable à celle des canaux en béton. En réalité, les canaux en béton n'ont pas été construits ; les canaux en terre ont été laissés en place, ou tout au plus protégés par des pierres jointoyées pour drainer les *bofedales*.

La nécessité d'assurer la qualité de l'eau est le principal argument invoqué pour justifier la construction de canaux dans les *bofedales*, et même s'il est dit dans le document que cela pose «un peu de difficulté» de garantir un haut niveau de pureté de l'eau dans la source, il est également fait mention de la présence d'«œufs de mouche» constatée au microscope.

7

Les observations suivantes peuvent être faites au sujet du document présenté par l'Antofagasta (Chili) & Bolivia Railway Company Ltd. :

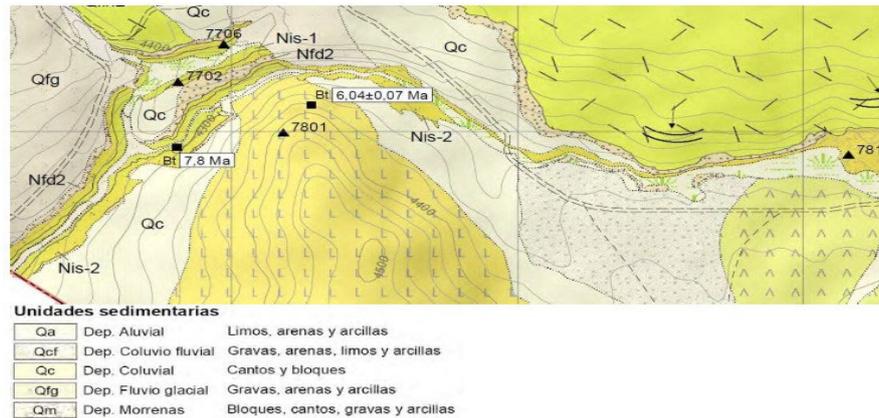
- Il est surprenant que les arguments justifiant la réalisation des travaux dans les *bofedales* soient liés à la qualité de l'eau, c'est-à-dire à des aspects sanitaires, car cela remet en question l'exécution de la concession accordée par le département du Potosí, dont l'objectif était de fournir de l'eau pour «l'approvisionnement ou l'alimentation des machines ferroviaires». S'il est indiqué que la qualité de la source n'est pas suffisante, cela signifie que les ressources en eau du Silala ont été expressément utilisées pour la fourniture d'eau destinée à la consommation humaine.
- Le document précise que «depuis quelque temps maintenir l'eau de cette source à un niveau de pureté élevé pose un peu de difficulté» : il est admis à juste titre que le problème ne pose qu'«un peu de difficulté» puisque la situation ainsi décrite se résout facilement en soumettant l'eau à un processus de désinfection qui élimine les pathogènes, les œufs de mouche dans ce cas. Or le problème de fond est que l'argument principalement invoqué pour justifier les travaux dans les *bofedales* passe sous silence la raison véritable, qui est explicitement d'améliorer l'efficacité du captage en augmentant le débit et non d'améliorer la qualité de l'eau.

### 3. CONDITIONS NATURELLES

#### 3.1. Masses d'eau du Silala

##### 3.1.1. Bofedales

Les dépôts quaternaires dans le Silala sont à l'origine de la formation des *bofedales*. La cartographie réalisée par SERGEOMIN en 2017 (voir figure 2) distingue les agents géologiques exogènes, principalement les processus glaciaires, éoliens, gravitationnels, fluviaux à un degré moindre, ainsi que le vieillissement, principalement physique, et l'érosion, et distingue les formes géologiques dues à l'accumulation et à l'érosion. L'activité glaciaire, volcanique et météorologique a modelé les structures géomorphologiques actuelles de la région.



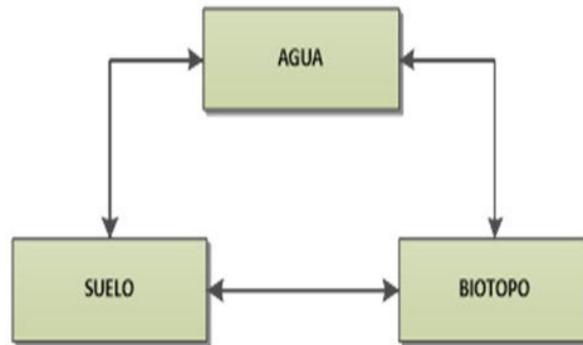
**Figure 2**  
**Dépôts quaternaires (SERGEOMIN, 2017)**

Les *bofedales* du Silala sont alimentés par la remontée d'eau au travers de roches fracturées, comme le sont les formations géologiques de la zone, telles que Silala Ignimbrite 1 (N1s1), Silala Ignimbrite 2 (N1s2) et Silala Ignimbrite 3 (N1s3) ; la variation de l'écoulement en fonction de la distance, qui est décrite dans un chapitre ultérieur, montre que l'apport souterrain se développe à mesure qu'il parcourt les *bofedales*.

Pour l'analyse de la circulation de l'eau dans les *bofedales* à l'état naturel, la masse d'eau est considérée comme une unité eau-sol-biotope (voir figure 3). Il existe entre ces éléments un «synapse physico-biologique», un «lien entre eux». Il est évident que le biotope comprend les deux autres éléments que sont l'eau et le sol, mais l'on cherche à lier l'eau et le sol comme éléments agissant sur l'éco-zone ou l'éco-région.

Les *bofedales* sont des zones humides des hauts plateaux andins (HAA). Ils appartiennent à un type d'écosystème caractérisé par une végétation pérenne dans le paysage semi-aride des Andes occidentales et jouent un rôle important dans l'apport et la régulation de l'eau dans le bassin (caractérisation écohydrologique des zones humides des hauts plateaux andins à partir d'images satellite multi-temporelles de la partie supérieure du bassin hydrographique de la rivière Santa, Ancash, Pérou, 2015). Les *bofedales* du Silala sont des masses d'eau pérennes, alimentés par des eaux souterraines.

Au sens de la convention Ramsar (2016), les zones humides sont en général des «étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée». Ce sont des «espaces où l'eau est le principal facteur déterminant l'environnement ainsi que la vie végétale et animale associées. Dans les zones humides, la nappe phréatique affleure ou est proche de la surface du sol, la terre est recouverte d'eaux peu profondes.»



**Figure 3**  
Masse d'eau en tant qu'unité

Le terme «*bofedal*», très couramment utilisé en Bolivie, au Chili et au Pérou, désigne une zone humide de type prairie humide naturelle, dans laquelle prospère un type de végétation naturelle toujours verte et des plantes grasses offrant un potentiel de forage élevé. Le sol est humide en permanence (saturé). Le terme «*bofedal*» provient de «*bofe*», la matière organique molle qui le compose. Ce sont des systèmes hydrologiques fragiles.

### 3.1.2. Caractéristiques des *bofedales* du Silala

Les principales caractéristiques des *bofedales* du Silala sont décrites ci-après :

- Les *bofedales* dépendent complètement des sources. Les *bofedales* et les sources sont liés par des mécanismes souterrains (voir figure 4). L'apport d'eau est d'origine entièrement souterraine, aucune trace de ruissellement superficiel éventuel causé par les précipitations n'est observée le long du bassin d'approvisionnement.
- Les études sur le terrain confirment l'absence de ruissellement superficiel causé par les précipitations. Une visite complète du bassin permet de constater qu'il n'y a aucune trace de circulation d'eau en surface et aucun écoulement laminaire visible, comme le montrent les photographies présentées à la figure 5.



**Figure 4**  
Origine souterraine des eaux du Silala, a) *bofedal* nord, b) *bofedal* sud

10



a) Slope in the upper zone of North Bofedal. b) Slope in the middle zone of the North Bofedal.

**Figure 5**

**Absence de trace de ruissellement en surface**

Légende :

- |  |   |   |
|--|---|---|
| a) Slope in the upper zone of North Bofedal  | = | a) Pente dans la zone supérieure du <i>bofedal</i> nord |
| b) Slope in the middle zone of North Bofedal | = | b) Pente dans la zone centrale du <i>bofedal</i> nord   |

- Le couvert végétal est permanent. Les *bofedales* étant inondés en saison sèche et en saison humide, la végétation de ces réservoirs naturels est toujours verte. On observe en général la présence de tourbe d'altitude.
- Selon le DIREMAR (2017), les *bofedales* (nord et sud) du Silala se sont formés sur des terrains plats, dans le fond de vallées où leur végétation contraste fortement avec la végétation environnante qui manque d'humidité ou dont la profondeur diffère. Le couvert dépend principalement de la quantité et de la disponibilité de l'eau au cours de l'année dans ces zones humides de haute montagne, désignées sous le nom de tourbières andines ou tourbières couvertes d'une végétation toujours verte et associées à une alimentation permanente en eau, principalement souterraine (voir figure 6).
- Le couvert végétal observé dans le *bofedal* sud se caractérise par une végétation typique des *bofedales* telle que *Distichia sp*, *Andean Oxychloe* et/ou *Plantago tubulosa* à certains endroits. Dans les zones présentant un degré d'humidité inférieur, il existe des espèces basses où prédominent *Plantago sp*, *Gentiana sp*, et autres, qui colonisent les *bofedales* en l'absence de submersion et de nappe phréatique superficielle (DIREMAR, 2017).

11



a)

b)

**Figure 6**

**Couvert végétal, a) *bofedal* nord, b) *bofedal* sud**

- Le tronçon de la confluence du *bofedal* nord et du *bofedal* sud, malgré une pente plus forte qu'en amont, se distingue par la présence de tourbe qui a prospéré dans des conditions naturelles (voir figure 7a), mais qui, sous l'effet des actions opérées, du captage de l'eau et des canaux d'acheminement, a entraîné la prédominance d'espèces envahissantes comme c'est le cas dans les prairies. La construction de routes d'accès a aussi modifié sensiblement la nature d'origine des *bofedales* (voir figure 7b).



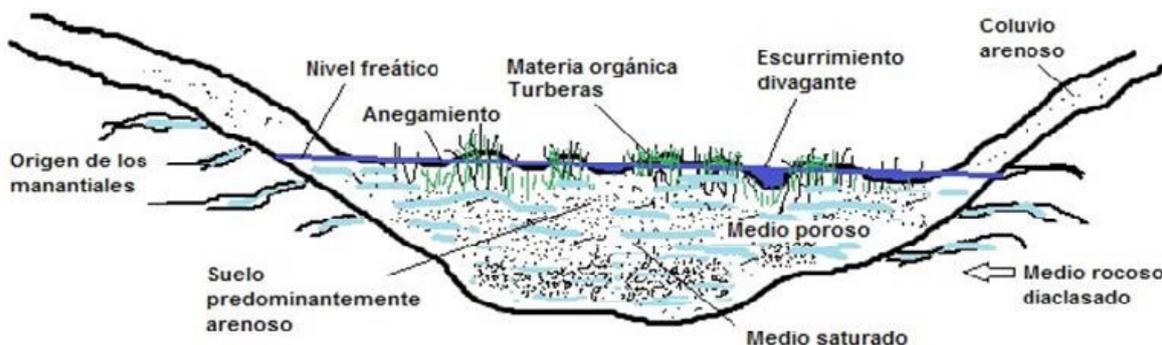
**Figure 7**  
**Tronçon de la confluence, a) présence de tourbe, b) route d'accès**

## 12

- **Sols saturés.** On observe que les sols sont complètement saturés aussi bien dans le *bofedal* nord que dans le *bofedal* sud.
- ***Bofedal nord.*** D'après les profils étudiés par le DIREMAR (2017) dans le *bofedal* nord, la profondeur des sols varie entre 0,55 m et 1,4 m ; en-dessous, on trouve la roche primaire où la nappe phréatique atteint des profondeurs comprises entre 0,4 m et 0,1 m. Les sols sont sableux-limoneux et limoneux-sableux avec, en général, une prédominance de sable, 90 % en moyenne, et 6 % de limon et 4 % d'argile. La matière organique atteint entre 30 cm et 48 cm de profondeur, jusqu'à 80 cm dans certains cas. Le sable se trouve de 0,4 m à 1,0 m de profondeur environ.
- ***Bofedal sud.*** La profondeur du *bofedal* sud varie de 0,40 m à 1,20 m ; en dessous on trouve la roche primaire. La couche organique atteint entre 0,13 m et 0,24 m de profondeur et la nappe phréatique, entre 0,45 m et 0,15 m. Le sol est plus sableux, moins sableux-limoneux. Le sol est constitué en moyenne de 91 % de sable, avec 5 % de limon et 3 % d'argile.
- On constate que le *bofedal* nord renferme plus de matière organique que le *bofedal* sud, qui est plus sableux. Dans le *bofedal* nord, la saturation des sols atteint 100 % tandis qu'elle est de 76 % dans le *bofedal* sud.
- **Ils régulent le réseau hydrologique.** Du point de vue hydrologique, les *bofedales* sont de type hydromorphe ou réductique parce qu'ils sont inondés en permanence.
- En conditions naturelles, le régime hydrologique s'organise de la façon suivante :
  - L'eau est apportée au *bofedal* par les sources.
  - Le sol est saturé d'eau en permanence.
  - Cela produit un processus de stockage.

- L'eau s'évapore et évapotranspire selon les conditions météorologiques, notamment la température.
- L'eau est introduite dans un milieu organique.
- L'eau circule lentement.

Les *bofedales* nord et sud du Silala reçoivent l'eau apportée par les sources, comme illustré par le schéma de la figure 8. Ils ne sont pas alimentés par l'eau de ruissellement issue de précipitations, comme le montrent les débits mesurés qui illustrent la variabilité du régime annuel, examiné au chapitre suivant.



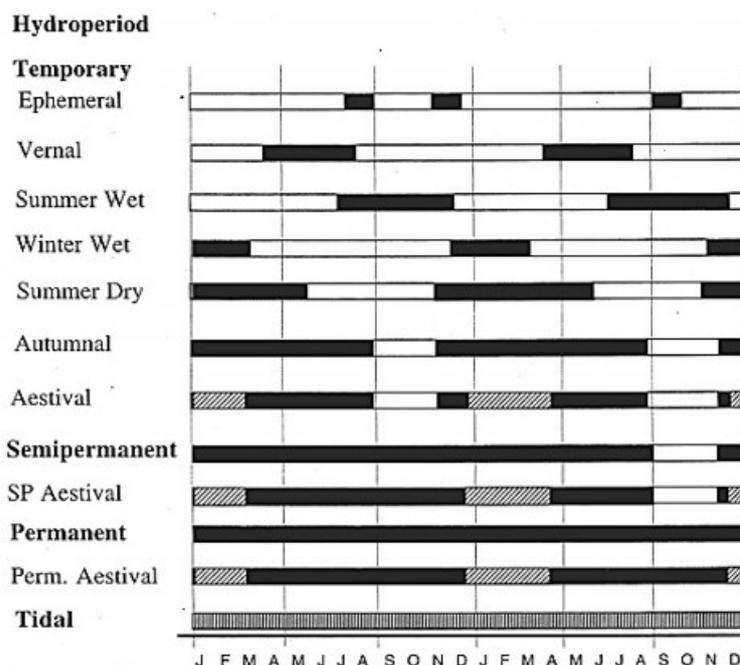
**Figure 8**  
**Schéma de section transversale du bofedal du Silala**

**13**

Les *bofedales* sont constitués de sols saturés ; les nappes phréatiques sont très proches de la surface (voir figure 8). Du fait des interventions de drainage réalisées sur les masses d'eau, une partie de la zone couverte par les *bofedales* a graduellement perdu son état naturel, laissant la place à des *bofedales* dégradés (voir figure 9) et permettant la prolifération d'espèces envahissantes qui n'ont pas besoin de sols saturés, comme dans les prairies.

Les *bofedales* assurent le stockage de l'eau mais aussi d'autres processus liés au sol, notamment l'interface avec l'atmosphère telle que l'évaporation et l'évapotranspiration de ces masses d'eau dont les mécanismes sont liés aux conditions météorologiques et aux matières organiques présentes. Dans tous les cas, il est possible d'observer que sous l'effet des basses températures, l'eau en surface gèle.

L'eau provenant des aquifères remonte aux points identifiés comme des sources et pénètre le milieu poreux et organique du *bofedal*, créant une interaction forte entre l'eau, le sol et le biotope.



**Figure 9**  
 Catégorie du *bofedal* du Silala selon l'hydropériode (Jackson, *et al.*, 2014)

Légende :

Hydroperiod	=	Hydropériode
Temporary	=	Temporaire
Ephemeral	=	Ephémère
Vernal	=	Printemps
Summer wet	=	Été humide
Winter wet	=	Hiver humide
Summer dry	=	Été sec
Autumnal	=	Automne
Aestival	=	Été
Semipermanent	=	Semi-permanent
SP Aestival	=	Été semi-permanent
Permanent	=	Permanent
Perm. Aestival	=	Été permanent
Tidal	=	Marée

Les études géophysiques menées dans le secteur du *bofedal* nord ont permis d'identifier une grande quantité d'eau souterraine stockée dans les ignimbrites fracturées. Dans la partie inférieure de la vallée, nous pouvons voir des roches très fracturées et jointes, dont la porosité secondaire renferme de l'eau (Sanguenza, 2016) qui émerge à la surface par différence de pression.

Dans le *bofedal* sud, on voit que l'eau qui émerge provient de faibles profondeurs. Selon Sanguenza (2016), le *bofedal* a perdu sa capacité de stockage naturel à cause des travaux réalisés.

## 14 3.1.3. Circulation de l'eau dans les *bofedales*

### 3.1.3.1. Débit de Darcy

Dans les *bofedales*, l'eau circule par gravité, dans le milieu poreux et en surface. Dans le milieu poreux, l'eau circule entre les espaces intergranulaires tandis que, en surface, elle se subdivise généralement en petits cours d'eau dispersés et espacés.

Les conditions de circulation de l'eau dans un milieu poreux, généralement dans le cas d'un écoulement non saturé et libre, sont étudiées à partir des forces de gravité, de frottement et d'aspiration, cette dernière correspondant à la force qui unit l'eau aux particules du sol par la tension de surface. Lorsque les espaces intergranulaires sont remplis d'eau, la force d'aspiration est réduite. Dans un milieu saturé, elle est pratiquement inexistante.

La circulation de l'eau dans le milieu poreux peut s'illustrer par la loi de Darcy :

$$v = k(\psi) \frac{dH}{dL}$$

Où :

$v$  est la vitesse de circulation de l'eau dans le milieu

$k(\psi)$  est un tenseur de perméabilité qui dépend en général de la charge d'aspiration  $\psi$

$dH/dL$  est le gradient hydraulique

En conditions naturelles, les masses d'eau du Silala circulent dans un milieu saturé et la charge d'aspiration  $\psi$  est donc nulle ; la vitesse d'écoulement dépend du tenseur de perméabilité et du gradient hydraulique.

Le tenseur de perméabilité  $k = k(x,y,z)$  peut varier dans différentes directions, limitées par la roche primaire dans le cas des *bofedales* du Silala. Par conséquent, la perméabilité est un élément prédominant du développement du *bofedal* dans la vallée.

Une analyse globale de la circulation de l'eau dans les *bofedales* nord et sud permet de constater que le gradient hydraulique est pratiquement égal à la pente du terrain parce que le milieu est saturé.

Selon les résultats de l'étude des sols (DIREMAR, 2017), la perméabilité dans le *bofedal* nord atteint  $2,6 \times 10^{-7}$  cm/s avec une porosité de 0,47, tandis que, dans le *bofedal* sud, la perméabilité moyenne est de  $1,15 \times 10^{-7}$  cm/s avec une porosité moyenne de 0,46. Le débit ou loi de Darcy pour le *bofedal* nord est de  $2,32 \times 10^{-9}$  cm/s avec une vitesse linéaire de  $4,95 \times 10^{-9}$  cm/s. Le débit ou loi de Darcy pour le *bofedal* sud est de  $6,54 \times 10^{-9}$  cm/s avec une vitesse linéaire de  $1,42 \times 10^{-8}$  cm/s.

Aux vitesses indiquées ci-dessus vient s'ajouter l'effet de l'action de la matière organique dans les espaces intergranulaires, ce qui crée des obstacles encore plus importants à la circulation.

### 15 3.1.3.2. Ecoulement de surface non concentré

En général, dans les *bofedales* qui présentent un régime intermittent, ou temporaire, la circulation de l'eau est définie par deux scénarios. Pendant la saison des pluies, les précipitations produisent un excédent qui inonde les zones humides : le niveau d'eau est suffisamment élevé pour contourner les irrégularités du terrain et permettre à l'eau de trouver des «petits canaux» dans lesquels elle peut circuler par gravité vers des zones inférieures, créant ainsi un réseau d'écoulement à plusieurs branches à la surface du *bofedal*. Dans ces conditions et selon l'ampleur de l'excédent pluviométrique, le ruissellement peut même provoquer des phénomènes d'érosion localisés favorisant le transport solide (transport de sédiments).

Le processus de ruissellement de surface décrit ci-dessus ne correspond pas à la circulation de l'eau dans les *bofedales* du Silala pour deux raisons spécifiques :

- Les précipitations qui alimentent le bassin du Silala ne sont pas suffisamment efficaces pour produire un ruissellement.
- Les précipitations sont solides, de sorte qu'elles recouvrent la surface ; deux possibilités se présentent alors : soit les précipitations se subliment, dégèlent et s'infiltrant, soit les précipitations à l'état liquide ne parviennent pas à produire de ruissellement.

Compte tenu de ce qui précède, les *bofedales* du Silala ne reçoivent pas de ruissellement de surface provenant des précipitations. Par conséquent, aucun processus physique ne permet de former ou d'atteindre des niveaux d'eau ayant la capacité de créer un canal ou un réseau de drainage défini. Par contraste, l'écoulement prend la forme d'une nappe dispersée (Jackson, *et al.*, 2014) dans un environnement où la microtopographie joue un rôle très important, comme le montre la croissance irrégulière de la tourbe et de la végétation.

En conditions naturelles, lorsque la zone des *bofedales* était plus étendue que la surface actuelle, l'écoulement en surface se développait de manière «dispersée, non concentrée» dans des directions définies par la croissance de la masse végétale de surface, en particulier la tourbe. Ainsi, il n'y avait en réalité aucun chenal prédominant<sup>1</sup>, défini comme tel, mais une circulation diffuse avec des composantes de vitesse dans différentes directions.

### 3.2. Apports d'origine souterraine — sources

L'inventaire des sources effectué par le SENAMHI et le DIREMAR en 2018 ainsi que l'étude géophysique réalisée par prospection électrique en 2017 par la COFADENA montrent que l'alimentation en eau des *bofedales* du Silala provient des sources qui émergent tout le long de la masse d'eau.

16

Le SENAMHI a identifié 138 sources, divisées en trois catégories en fonction du débit entrant (voir tableau 1) (majeur ou mineur), qui émergent principalement dans le *bofedal* sud et dans le *bofedal* nord ; les sources répertoriées sont celles qui revêtent la plus grande importance du point de vue de l'apport en eau et des ouvrages de captage et de chenalisation réalisés. L'étude des sources menée à bien par le SENAMHI s'arrête à la confluence des branches sud et nord avec les sources les plus importantes.

Dans la partie supérieure du *bofedal* sud (figure 10), 49 sources très productives ont été répertoriées (voir tableau 2) ; la pente moyenne du terrain est de 0,9 %. On peut préciser que c'est l'endroit où la pente est la plus faible et où la masse d'eau est la plus éloignée de la frontière.

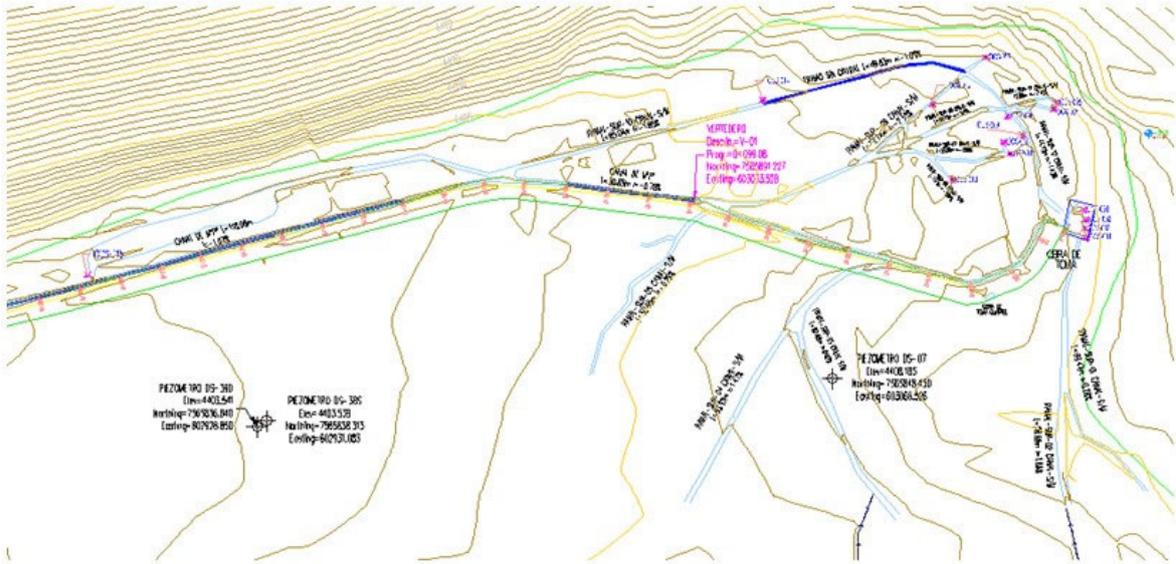
Dix de ces sources importantes sont situées entre la partie supérieure du *bofedal* sud et la confluence (figure 10) (voir tableau 2).

---

<sup>1</sup> Selon le glossaire international d'hydrologie de l'OMM (2012), le terme «chenal» est défini comme suit :

- 1) Cours d'eau nettement identifiable contenant de l'eau courante en permanence ou périodiquement.
- 2) Cours d'eau établissant une communication entre deux masses d'eau.
- 3) Partie la plus profonde d'un cours d'eau où passe le courant principal.

17



**Figure 10**  
Sources répertoriées dans le *bofedal* sud (Campos Barron – DIREMAR, 2018)

Les mesures hydrométéorologiques effectuées par le SENAMHI-DIREMAR (2018) ont permis d’identifier 45 sources très productives dans la partie supérieure du *bofedal* nord (voir tableau 2) où la pente est de 5,7 %.

Les *bofedales* situés dans le secteur des sources du Silala sont interconnectés au plan hydrogéologique à des masses d’eaux souterraines adjacentes, mais le degré d’interaction varie d’un *bofedal* à l’autre. En d’autres termes, les *bofedales* nord et sud sont complètement dépendants du mécanisme de transfert de l’eau et du type d’émergence des eaux souterraines dans toutes les conditions climatiques.

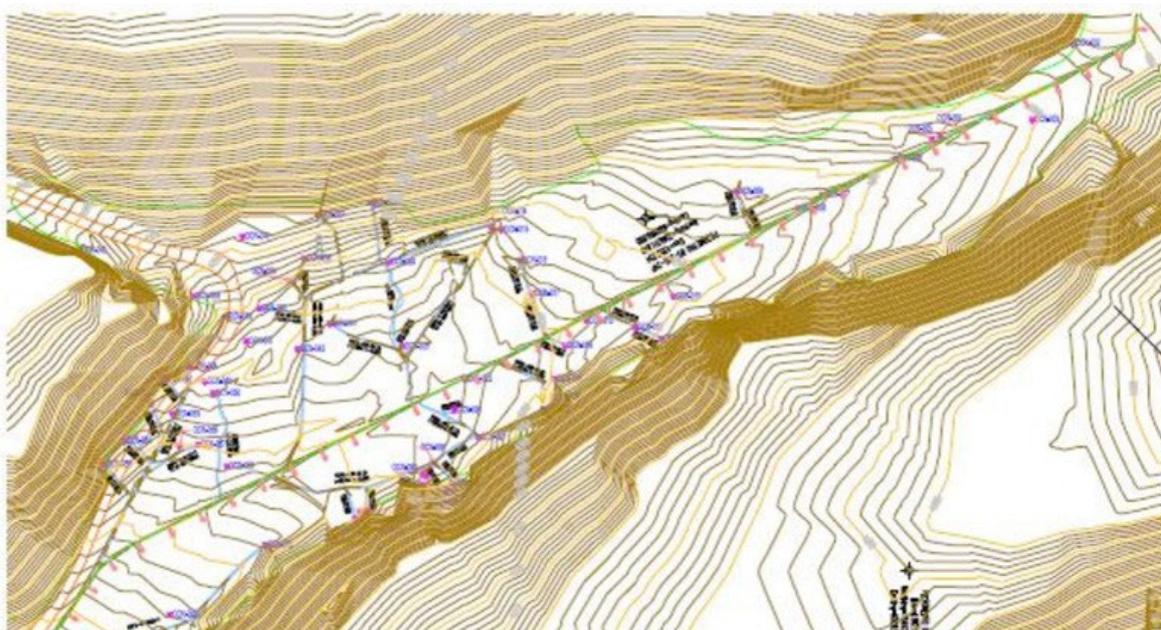
SILALA SPRINGS		
CATEGORY	NO.	DESCRIPTION
1	21	With greater surface inflows (measurable with micro-propeller).
2	80	With minor surface inflows (not measurable with micro-propeller).
3	37	With sub-superficial and perceptible flows due to the soil wetting.
Total	138	

**Tableau 1**  
Généralités sur les sources du Silala (SENAMHI-DIREMAR, 2018)

Légende :

- Silala springs = Sources du Silala
- Category = Catégorie
- No. = N°
- Description = Description
- With greater surface inflows (measurable with micro-propeller) = Avec apports de surface majeurs (mesurable avec une petite hélice)
- With minor surface inflows (not measurable with micro-propeller) = Avec apports de surface mineurs (non mesurable avec une petite hélice)
- With sub-superficial and perceptible flows due to the soil wetting = Avec écoulements sous-superficiels et perceptibles en raison de l’humidification du sol

18



**Figure 11**  
Sources répertoriées dans le *bofedal* nord (Campos Barron – DIREMAR, 2018)

RAVINE	1 <sup>ST</sup> CATEGORY	2 <sup>ND</sup> CATEGORY	3 <sup>RD</sup> CATEGORY	No.
South	10	39	12	61
North	11	34	32	77

**Tableau 2**  
Catégorie et nombre de sources des *bofedales* sud et nord (SENAMHI-DIREMAR, 2018)

Légende :

Ravine	=	Gorge
1st category	=	1 <sup>re</sup> catégorie
2nd category	=	2 <sup>e</sup> catégorie
3rd category	=	3 <sup>e</sup> catégorie
South	=	Sud
North	=	Nord
No.	=	N°

19

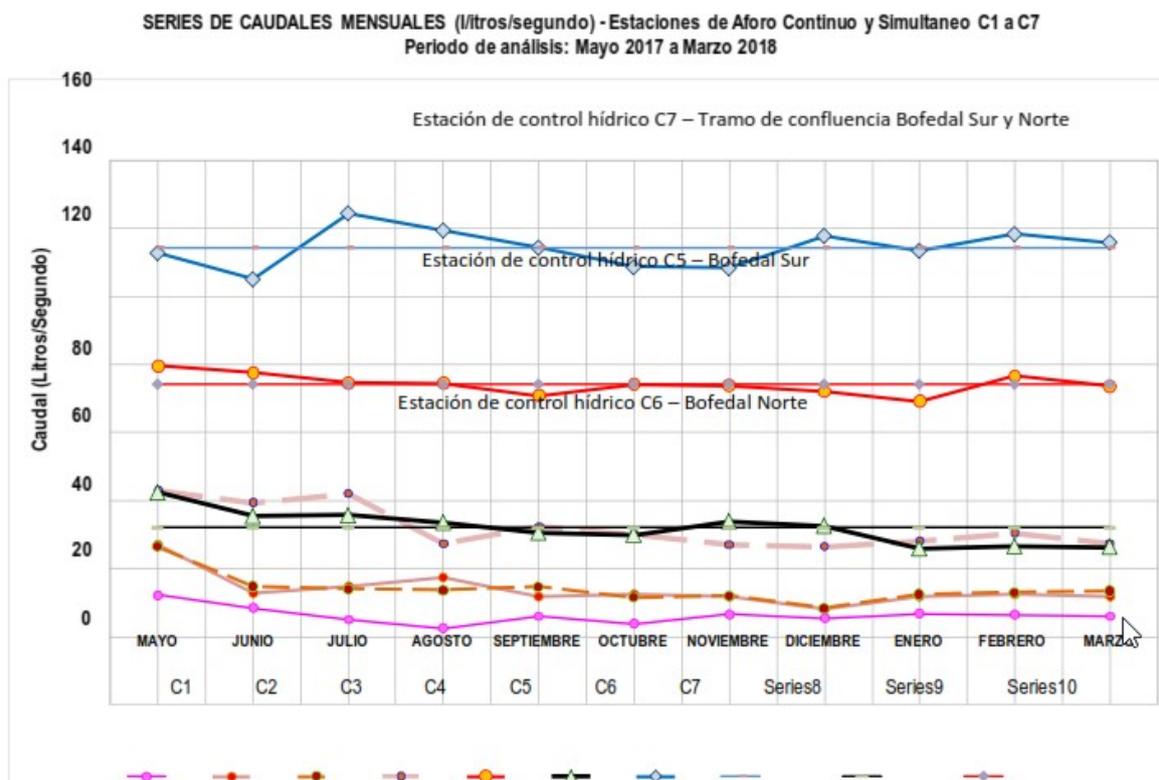
#### 4. RÉGIME D'ÉCOULEMENT

Les valeurs de débit mensuelles estimées à tous les points de contrôle (figure 12) indiquent que le régime hydrologique du bassin ne présente pas de variation mensuelle ou saisonnière marquée sur une année. Les premières analyses de débit dans les stations de mesure indiquent qu'il n'y a pas de comportement saisonnier clairement différent au cours de l'année et que, par conséquent, un régime hydrologique de type fluvial ne peut pas être établi pour ce bassin, même s'il y a un écoulement vers la frontière chilienne et même si cet écoulement se fait dans un canal artificiel. Le régime hydrologique montre des caractéristiques similaires à celles de la production d'un aquifère.

Le suivi du débit dans le secteur des sources du Silala a été réalisé par le SENAMHI avec des mesures en continu désignées par la lettre C et des mesures simultanées symbolisées par la lettre S. Dans les deux cas, la numérotation est faite en direction de la frontière.

##### 4.1. Débits dans le *bofedal* sud

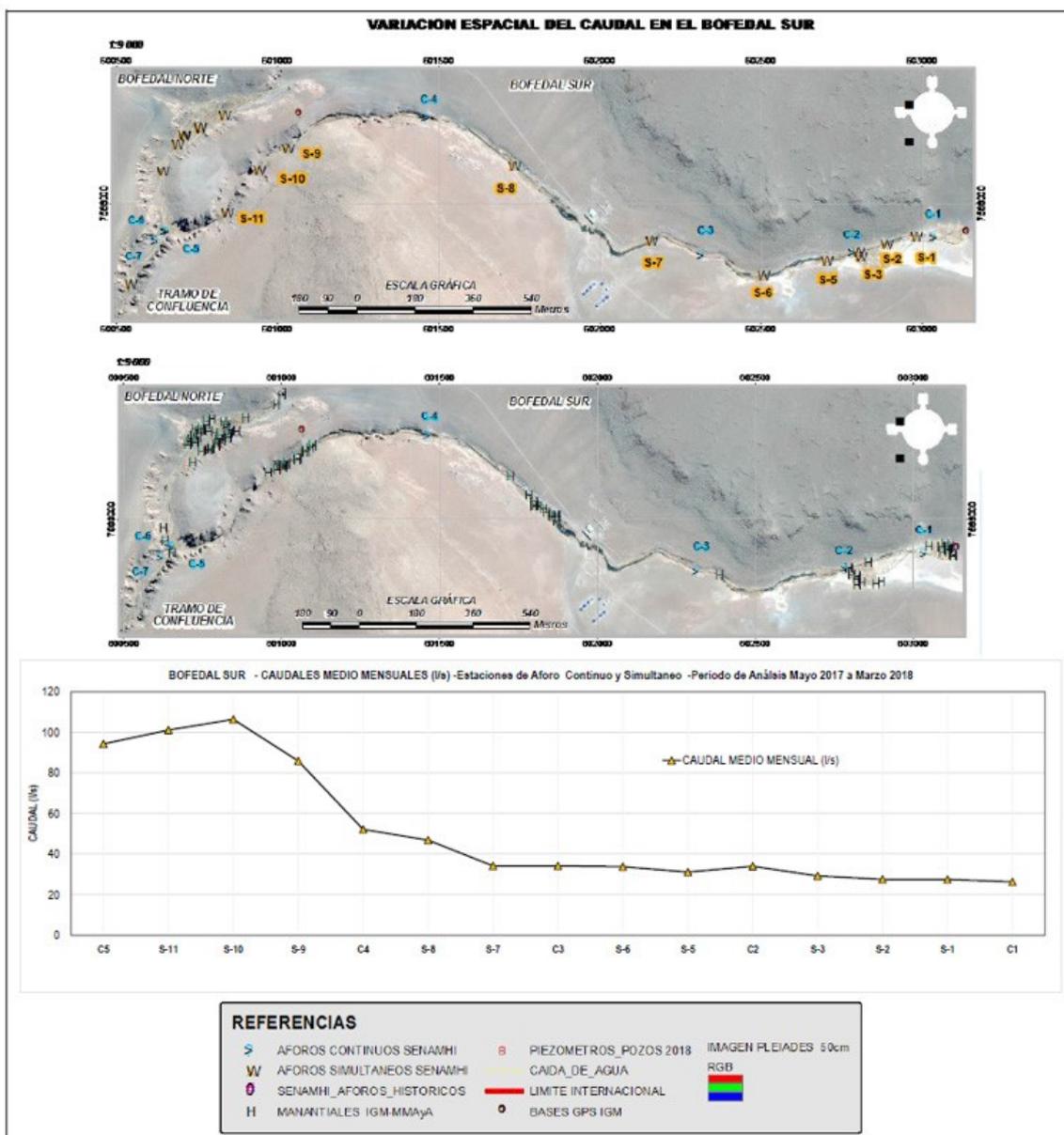
La variation spatiale du débit du *bofedal* sud du Silala présente généralement un schéma croissant en fonction de la longueur et du développement des différences topographiques, allant de la station de mesure dans le déversoir triangulaire C1 jusqu'à C5, voir figure 12.



**Figure 12**  
 Séries de débits mensuels (l/s) – Stations de mesure C1 à C7 (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018))

20

A la station C1 (figure 13), les débits sont enregistrés à partir des sources de la partie supérieure du *bofedal* sud. Depuis ce point de contrôle jusqu'au point de contrôle S-7, une légère augmentation du débit est observée en raison de quelques sources d'apport le long du tronçon. A partir de ce point de contrôle jusqu'au point de contrôle S-10, le débit augmente de façon significative en raison d'une plus grande concentration de sources.

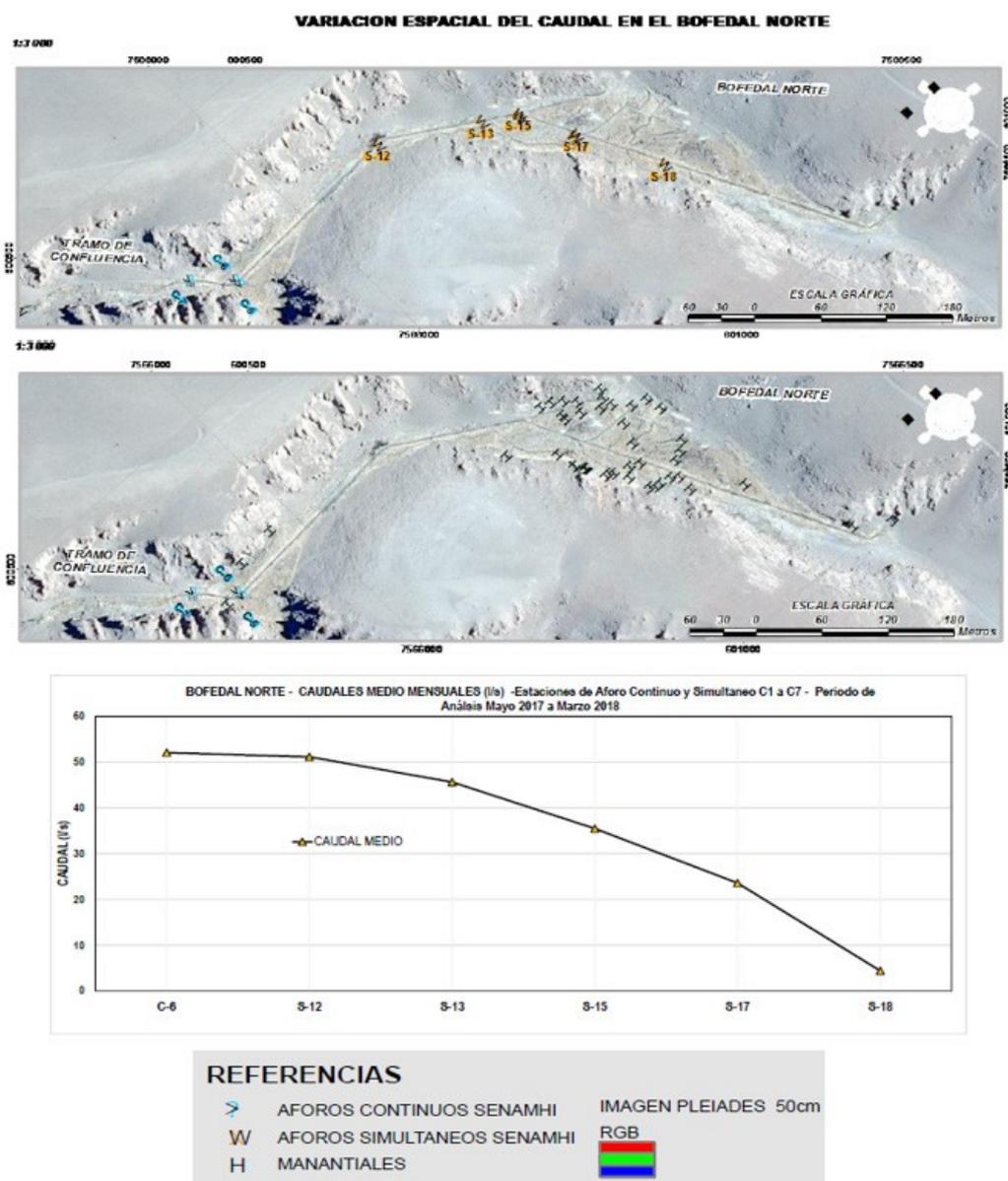


**Figure 13**  
**Variation spatiale du débit dans le bofedal sud (pour la période comprise entre mai 2017 et mars 2018) (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (SENAMHI-DIREMAR, 2018))**

21

#### 4.2. Débits dans le bofedal nord

La variation spatiale du débit du bofedal nord du Silala présente généralement un schéma croissant en fonction de la longueur et du développement des différences topographiques, allant du point de contrôle S-18 jusqu'à C6 (voir figure 14).



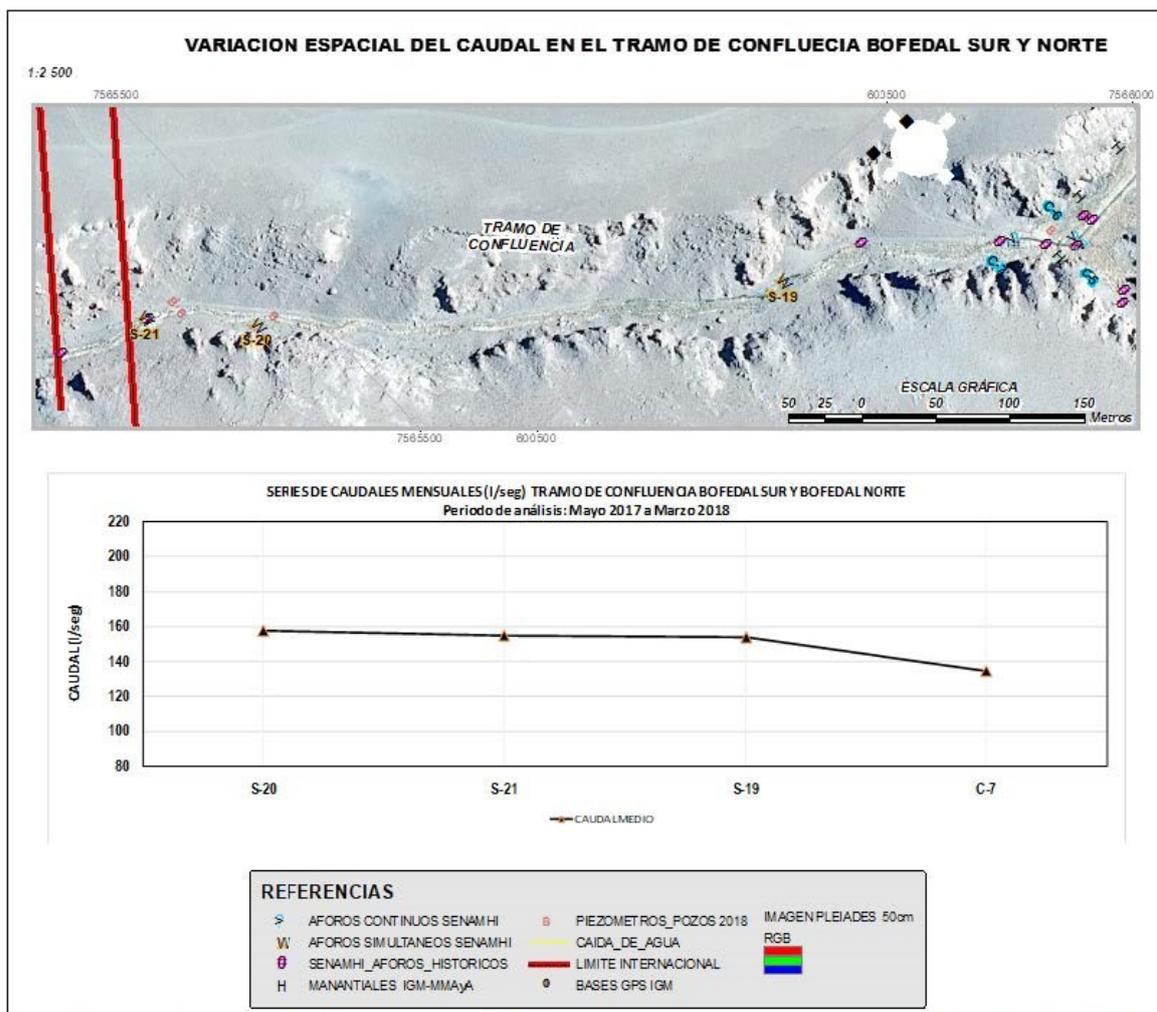
**Figure 14**  
**Variation spatiale du débit dans le bofedal nord (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018))**

Au point de contrôle S-18, les débits sont enregistrés à partir des sources du secteur. A partir de ce point de contrôle jusqu'à la station C6, on observe une augmentation graduelle du débit en raison d'une plus grande concentration de sources qui sont drainées vers le canal du bofedal nord.

22

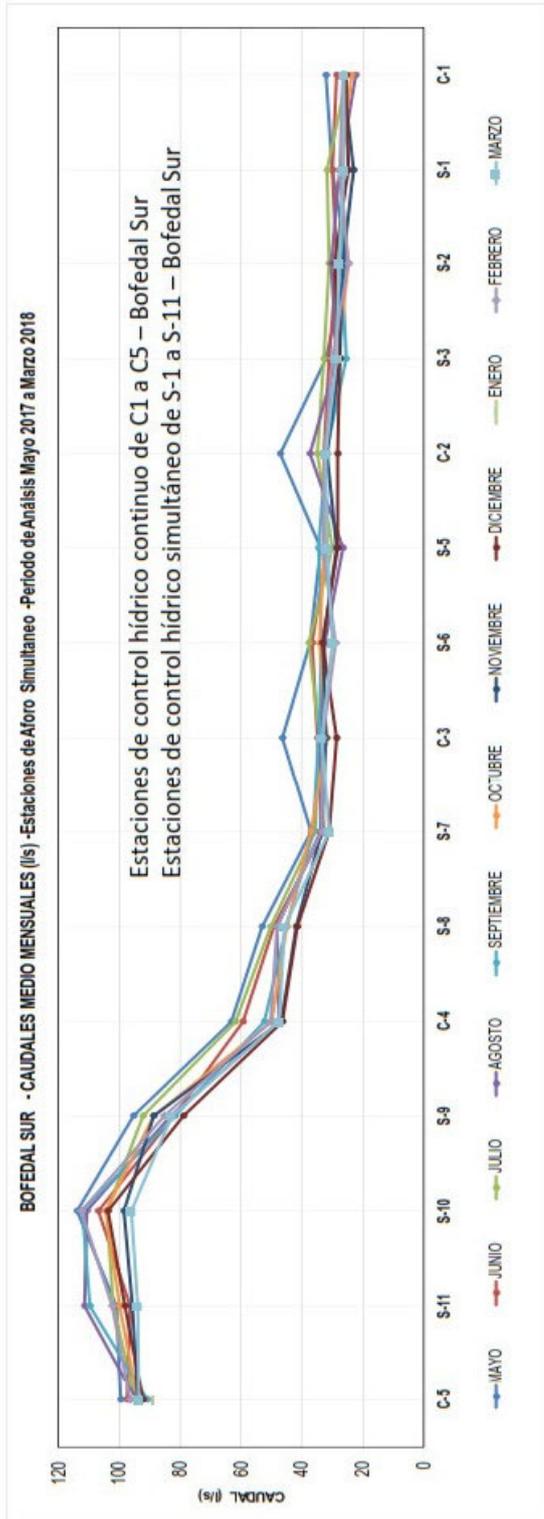
### 4.3. Tronçon de la confluence du bofedal sud et du bofedal nord

Dans le tronçon de la confluence, le débit augmente lentement depuis la station de contrôle C7 jusqu'à S-19. A partir de ce point, le débit reste presque constant jusqu'au point S-21 parce que dans ce tronçon aucune source ne vient accroître le débit.



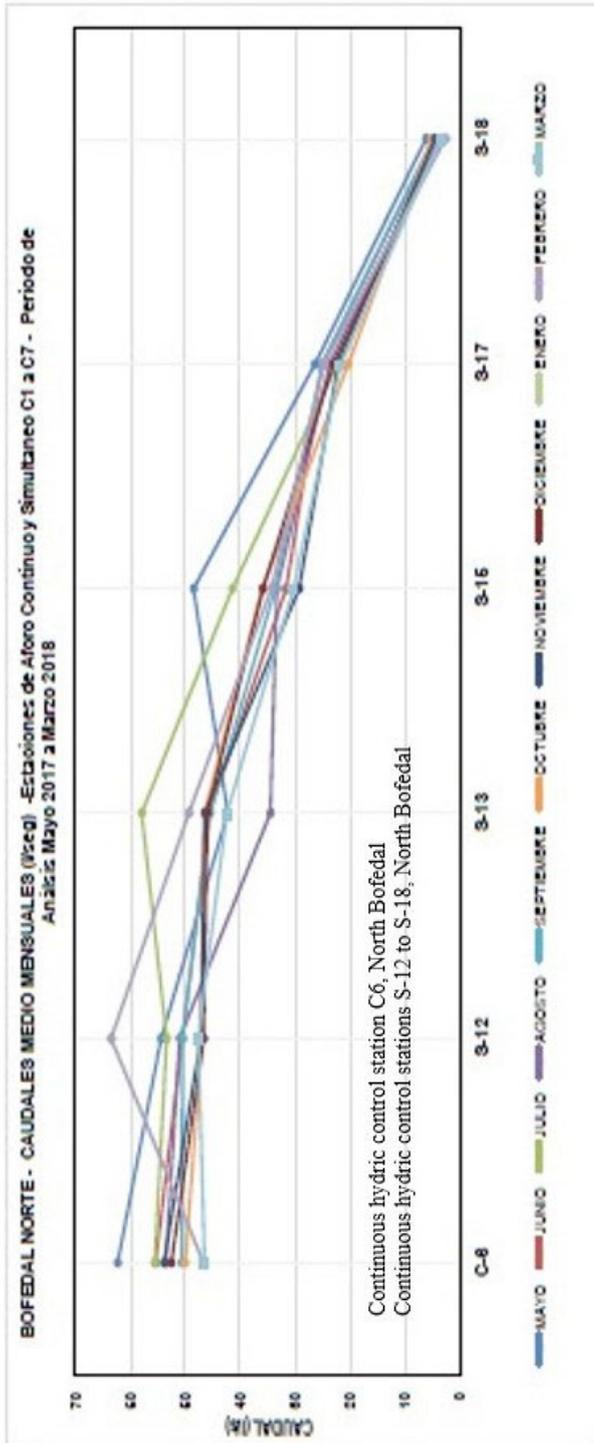
**Figure 15**  
**Variation spatiale du débit dans le tronçon de la confluence des *bofedales* nord et sud**  
**(création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018))**

Bien qu'il y ait un écoulement d'eau acheminé par un canal, il n'y a pas d'écoulements significatifs dans le tronçon de la confluence parce que la variation de débit aux derniers points de contrôle (stations de mesure) reste presque constante (voir figure 15).



	C-5	S-11	S-10	S-9	C-4	S-8	S-7	C-3	S-6	S-5	C-2	S-3	S-2	S-1	C-1
2017															
MAYO	99.57	100.91	113.95	95.24	63.03	53.15	36.81	46.52	37.49	33.79	46.97	32.10	25.20	30.09	32.22
JUNIO	97.47	96.25	106.85	82.02	59.44	49.30	32.62	34.94	36.63	31.60	32.76	31.15	28.58	29.93	28.45
JULIO	94.55	102.10	104.00	92.30	61.95	50.15	35.50	34.05	37.75	29.90	34.80	32.85	30.90	31.75	24.95
AGOSTO	94.43	111.25	110.60	83.00	47.30	48.27	33.90	33.78	32.55	26.40	37.48	28.50	30.45	27.45	22.43
SEPTIEMBRE	90.93	109.80	112.15	81.70	52.28	45.00	36.15	34.70	33.45	34.45	31.95	25.35	26.95	26.45	26.00
OCTUBRE	94.10	100.00	104.50	88.70	50.05	44.90	36.85	31.68	34.05	32.90	32.63	28.35	24.85	27.70	23.70
NOVIEMBRE	93.85	95.60	98.65	88.75	46.93	41.80	33.45	32.10	33.10	28.60	31.85	27.45	26.60	23.05	26.55
DICIEMBRE	92.05	98.25	103.60	78.75	46.40	41.65	31.15	28.53	33.20	28.25	28.28	27.50	23.35	24.85	25.35
ENERO	89.15				48.00	32.55					32.00				26.65
FEBRERO	96.50	102.35	112.40	85.20	50.33	48.20	33.65	33.15	29.05	33.05	32.60	30.00	24.75	27.65	26.63
MARZO	93.58	93.88	96.18	82.75	47.30	45.55	30.95	33.55	30.03	31.75	32.03	28.55	27.88	26.08	25.98
CAUDAL MEDIO MENSUAL (l/s)	94.20	101.04	106.29	85.84	52.09	46.80	34.10	34.14	33.73	31.07	33.94	29.18	27.55	27.50	26.26
2018															

**Figure 16**  
**Séries de débits mensuels moyens (l/s) – Stations de mesure simultanées – Bofedal sud**  
**(création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018))**



	C-6	S-12	S-13	S-15	S-17	S-18
2017						
MAYO	62.26	54.39	62.31	48.64	26.50	6.26
JUNIO	55.37	90.45	65.57	31.70	25.17	4.80
JULIO	55.58	53.85	57.86	41.50	22.40	4.55
AGOSTO	53.50	51.05	34.55	33.30	23.80	3.80
SEPTIEMBRE	50.60	90.45	65.90	33.05	25.20	4.90
OCTUBRE	49.98	46.90	66.50	36.05	20.45	5.20
NOVIEMBRE	53.90	47.20	66.50	29.25	22.80	4.60
DICIEMBRE	52.55	46.65	66.00	35.95	23.15	3.60
ENERO	45.95					
FEBRERO	46.58	63.40	69.30	34.25	34.80	2.70
MARZO	46.42	47.73	42.38	30.33	21.80	3.68
CAUDAL MEDIO MENSUAL (l/s)	52.06	55.16	65.94	35.96	23.16	4.39

Figure 17  
Séries de débits mensuels moyens (l/s) – Stations de mesure simultanées – Bofedal nord (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018))

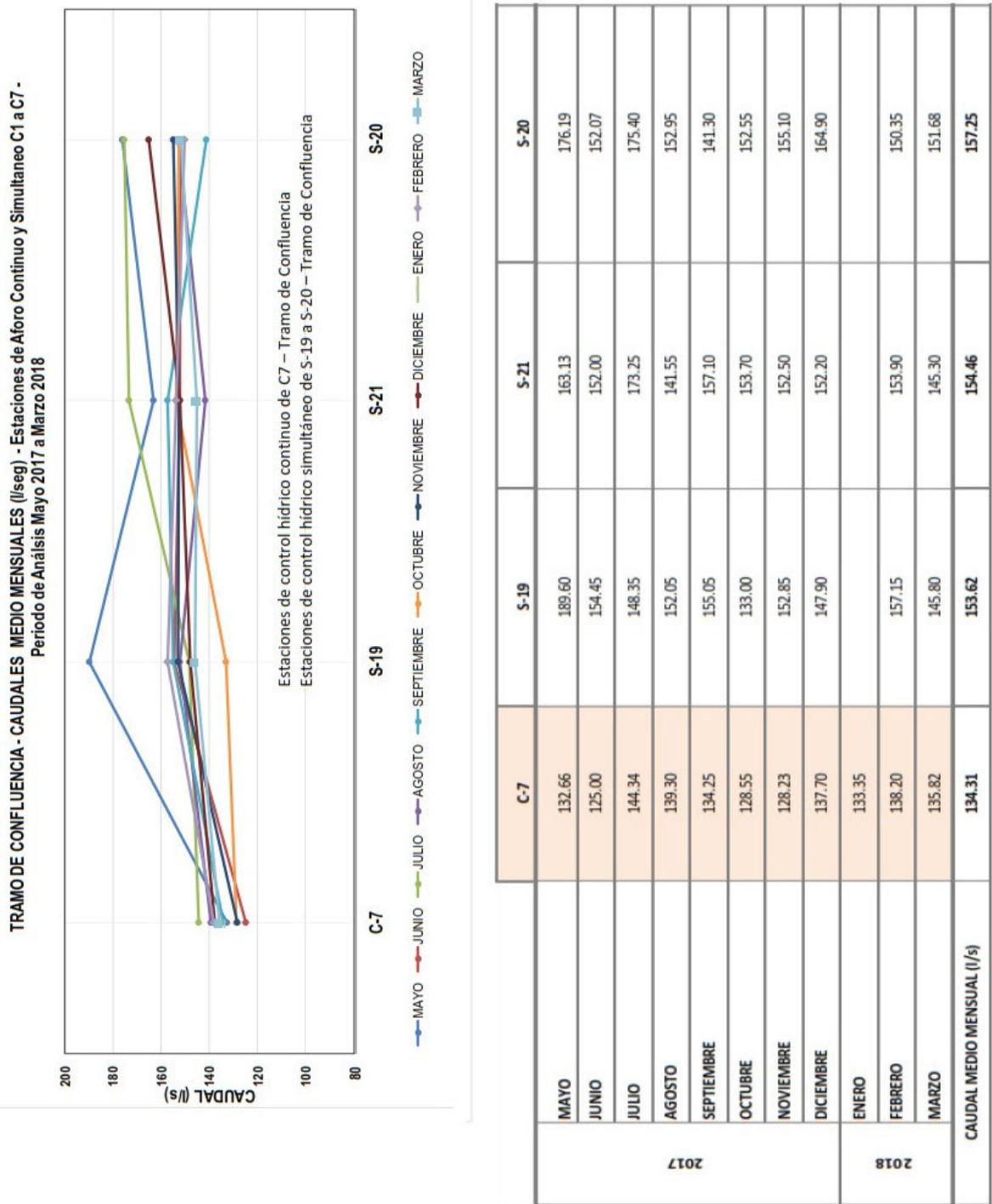


Figure 18

Débits mensuels moyens (l/s) – Stations de mesure simultanées – Tronçon de la confluence (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018))

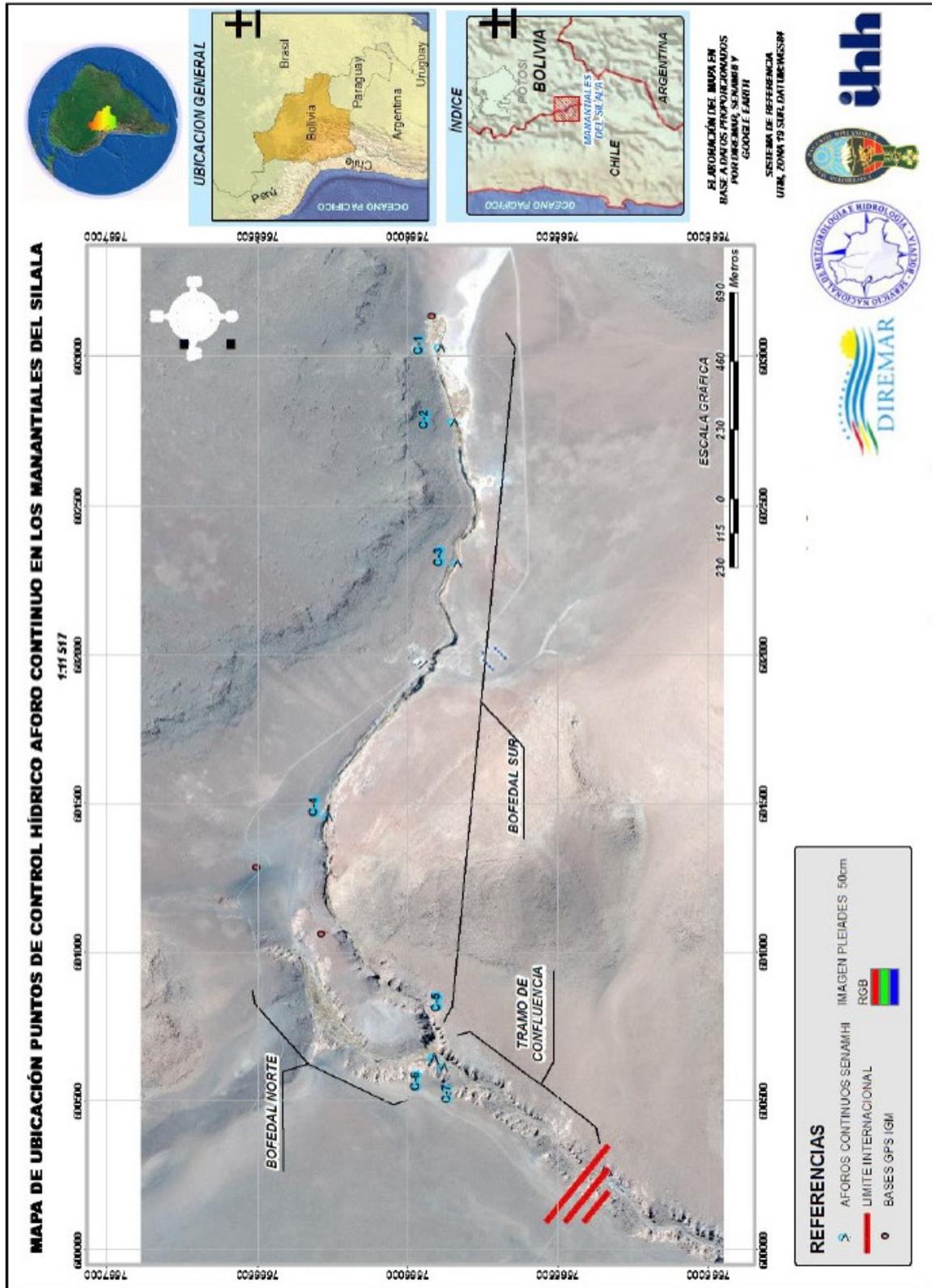


Figure 19

Carte de localisation des points de contrôle hydraulique des stations de mesure en continu des sources du Silala (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018))

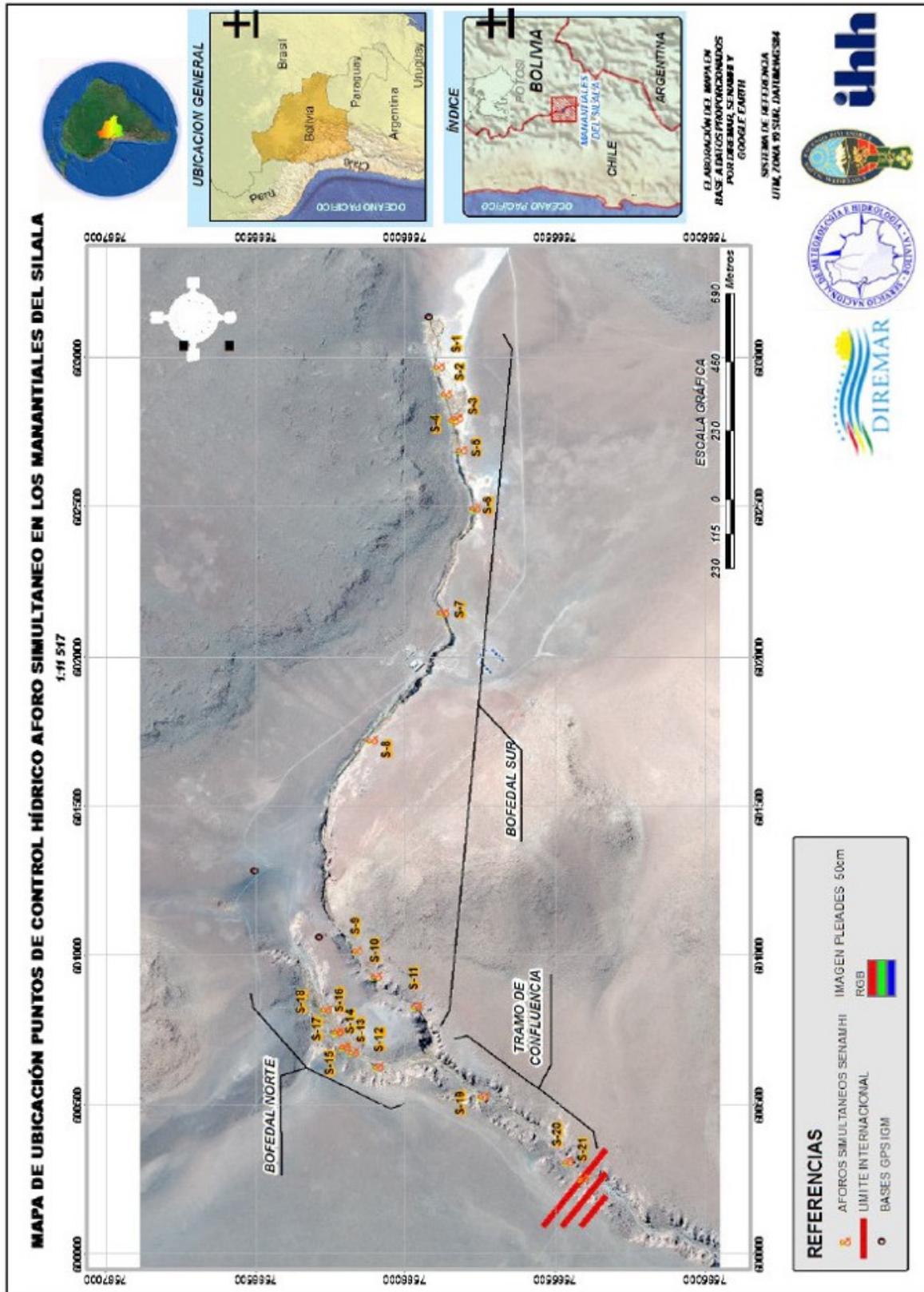


Figure 20

Carte de localisation des points de contrôle hydraulique des stations de mesure en simultané des sources du Silala (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018))

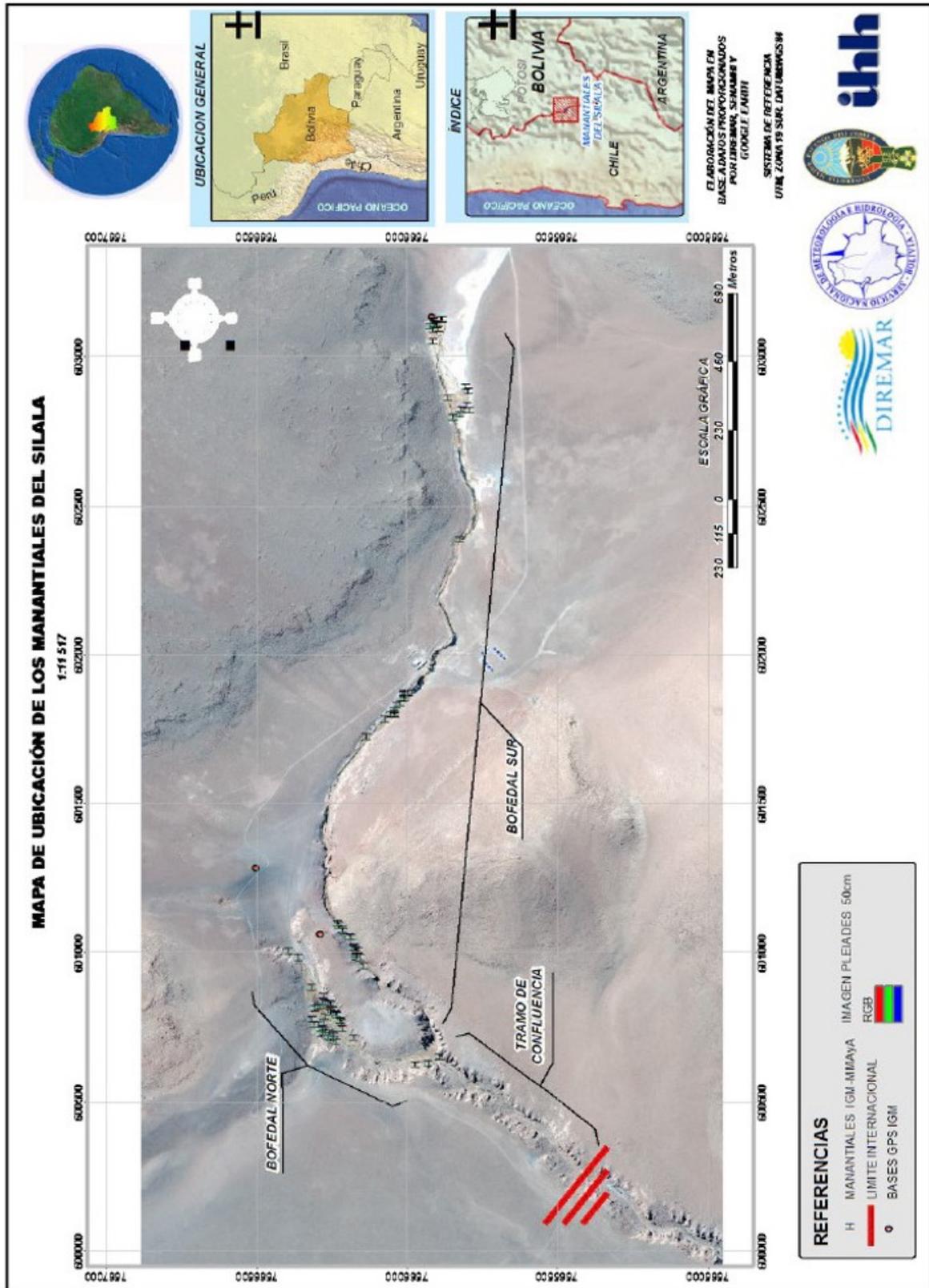


Figure 21  
Carte de localisation des sources du Silala (création interne selon les données du SENAMHI-DIREMAR (2018))

## 5. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES OUVRAGES HYDRAULIQUES

### 5.1. Généralités

Afin d'être en mesure de qualifier les ouvrages hydrauliques, nous décrirons en détail les aspects principaux des canaux existants dans la région des sources du Silala, notamment leurs dimensions, leur forme ainsi que leur fonction dans le réseau hydraulique. Ces canaux sont divisés en :

- Canaux principaux et
- Canaux secondaires.

Les ouvrages seront décrits en trois groupes selon leur localisation géographique :

- Ouvrages du *bofedal* sud.
- Ouvrages du *bofedal* nord.
- Ouvrages du tronçon de la confluence.

Dans chaque catégorie, la description comprendra les éléments suivants :

- Les matériaux employés.
- Les caractéristiques géométriques du réseau de canaux.

On distingue quatre sortes de canaux selon les types de matériaux utilisés pour leur construction :

- Les canaux sans revêtement creusés dans le sol naturel.
- Les canaux avec revêtement en maçonnerie à sec<sup>2</sup> (revêtement de pierres assemblées sans liant).
- Les canaux avec revêtement en maçonnerie de pierre (revêtement de pierres assemblées avec du mortier).
- Les canaux creusés dans la roche.

La carte reproduite à la figure 22 montre l'emplacement des sites décrits. Les sites 1 à 26 sont situés dans le *bofedal* sud, les sites 27 à 43 dans le *bofedal* nord, et les sites 44 à 45 se trouvent dans le tronçon de la confluence.

---

<sup>2</sup> On entend par maçonnerie à sec tout type d'ouvrage où les pierres sont assemblées sans liant tel que le mortier, la chaux ou le ciment.

30

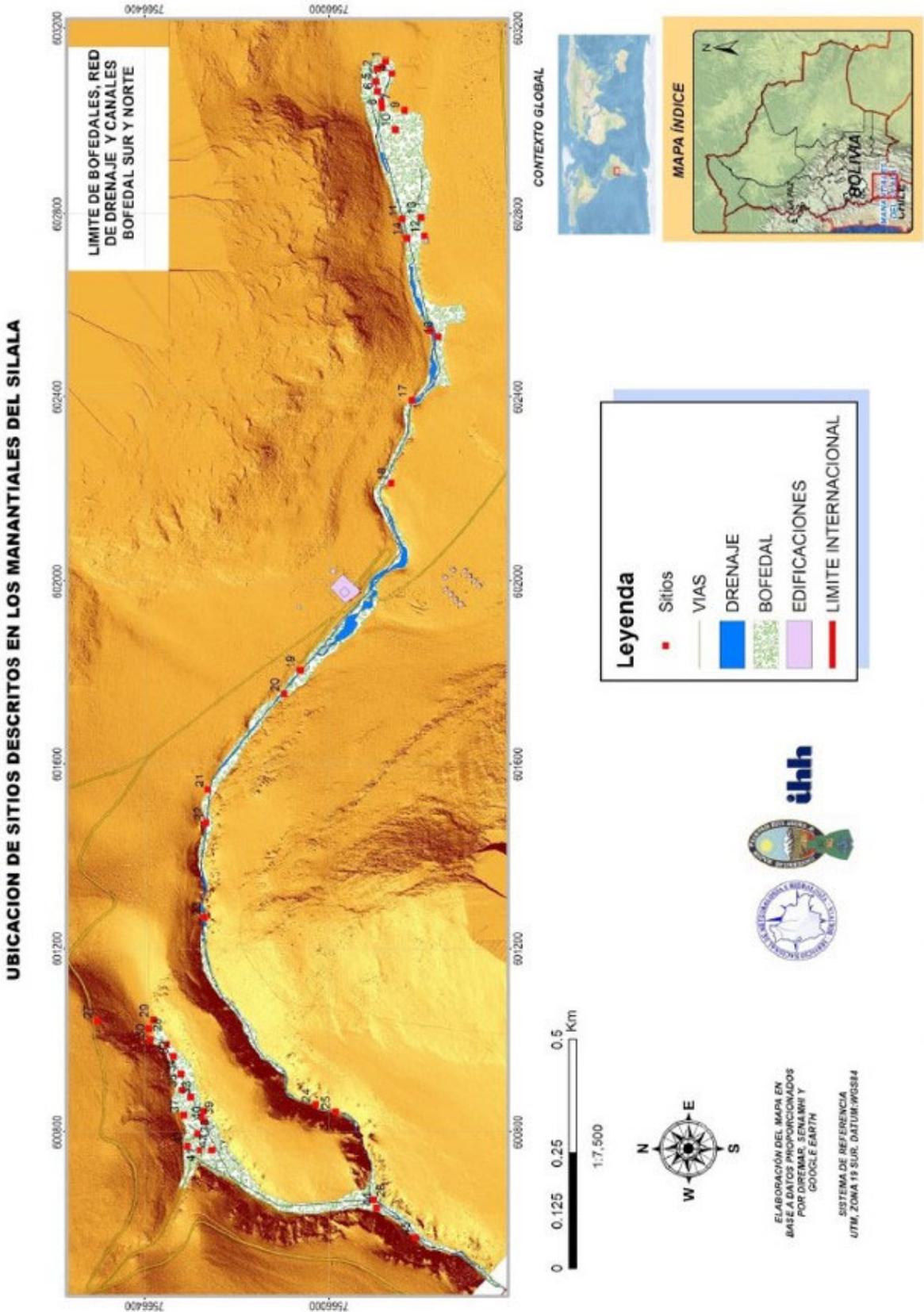


Figure 22

Disposition du réseau de canaux des sources du Silala

31

La méthode utilisée pour évaluer les ouvrages est la suivante :

- Etude topographique détaillée de la localisation des canaux.

- Etude de la géométrie des canaux.
- Description détaillée des matériaux utilisés pour la construction des canaux.
- Configuration géométrique et hydraulique des canaux.

Aux sections suivantes seront donc décrits en détail les ouvrages hydrauliques construits le long des canaux des *bofedales* sud et nord et du *bofedal* du tronçon de la confluence. La configuration géométrique des canaux a été mesurée avec précision ainsi que la longueur de chaque canal.

## 5.2. Ouvrages dans le *bofedal* sud

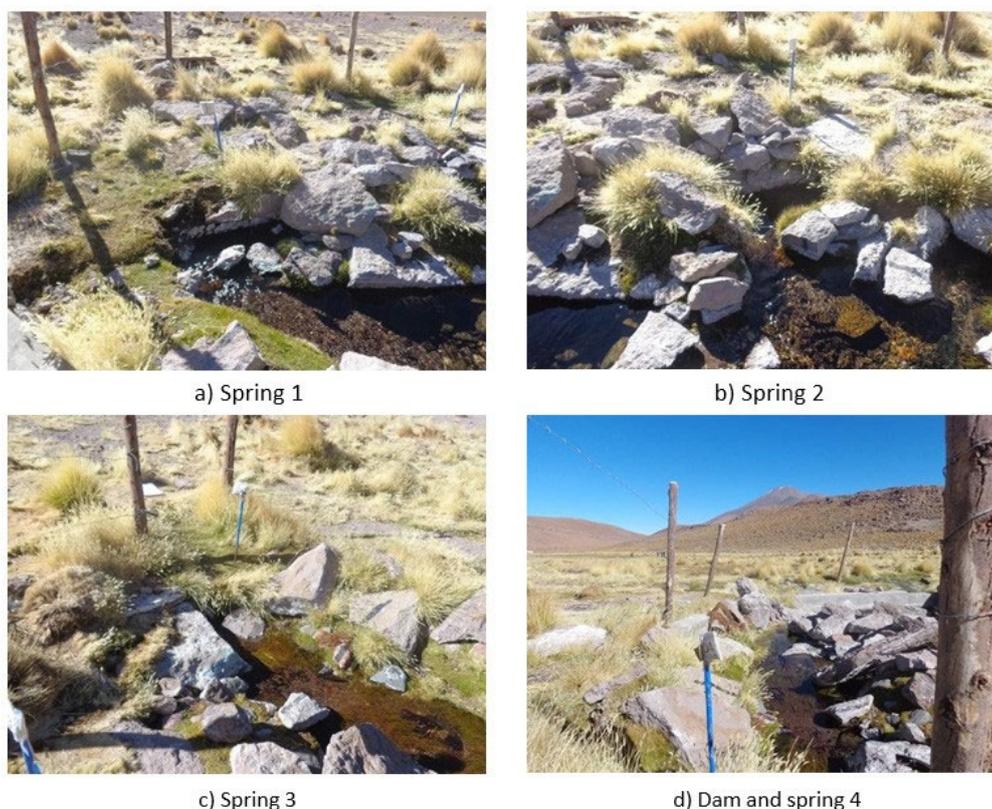
### 5.2.1. Description détaillée

**Site 1 :** les sources de ce site sont situées dans la partie supérieure du *bofedal* sud (voir figure 22), aux coordonnées suivantes : E 603130 m, N 7565881 m, à 4414 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984). Sur ce site, on constate que les sources sont protégées : l'ouvrage est composé d'un ancien petit barrage mesurant 10 mètres de longueur, 0,5 mètre de hauteur et 0,24 mètre de largeur pour former un petit bassin de rétention. L'ouvrage de captage d'eau est encerclé d'une clôture composée de pieux (*callapos*) et de fil barbelé pour empêcher l'intrusion d'animaux ou de personnes (voir figure 23).

Les photographies de la figure 23 montrent l'emplacement de quatre sources avec des débits faibles et constants (environ 2 l/s au total). Il n'y avait pas d'eau gelée lors de la visite sur le site (avril 2018). Le barrage comprend des constructions plus anciennes (figure 24a).

32

CHARACTERIZATION AND EFFICIENCY OF THE HYDRAULIC WORKS BUILT AND INSTALLED IN THE SILALA SECTOR



**Figure 23**  
Sources 01 à 04

Légende :

- |             |   |                        |
|-------------|---|------------------------|
| a) Spring 1 | = | a) Source 1            |
| b) Spring 2 | = | b) Source 2            |
| c) Spring 3 | = | c) Source 3            |
| d) Spring 4 | = | d) Barrage et source 4 |

**Site 2 :** sortie de l'ouvrage de captage. On observe que deux branches de canal artificielles ont été construites (canaux excavés dans le sol naturel, tourbe du *bofedal*) comme montré sur la figure 24a. De plus, on peut voir que la zone des sources et des canaux à ce point de sortie faisait partie du *bofedal* (voir figure 24b) : on observe un terrain irrégulier et la présence de petits graviers qui sont le produit d'une désintégration fluvio-glaciaire.

La disposition ordonnée des pierres indique que celles-ci ont été placées artificiellement comme ouvrage de maçonnerie à sec, mis en place après l'excavation (figure 24b), et qu'elles avaient pour fonction de retenir l'eau, sur une profondeur maximale de 25 centimètres.

33



a) Dam and spring protected with rock



b) Springs protected by a dam of old rocks and recent masonry.

**Figure 24**

**Barrage de retenue d'eau et sources en amont dans le *bofedal* sud**

Légende :

- |   |   |  |
|---|---|--|
| a) Dam and spring protected with rock                         | = | a) Barrage et source protégée par des pierres  |
| b) Springs protected by a dam of old rocks and recent masonry | = | b) Sources protégées par un barrage constitué de pierres anciennes et d'une maçonnerie récente |

**Site 3 :** on distingue un tube en PVC d'un diamètre de 4 pouces, avec des perforations de 1 cm tous les 5 cm (figure 25a). L'eau captée sur ce site est acheminée vers un petit bassin en ciment protégé par deux couvercles amovibles (figure 25b). A partir de ce point, l'eau est chenalisée vers l'avant-poste militaire de Silala des forces armées de Bolivie, pour la consommation des militaires qui séjournent à cet endroit (le débit est d'environ 0,5 l/s).



a) Pipe to divert water to the pond.



b) Recent small pond.

**Figure 25**

**Ouvrage de captage d'eau et bassin de désensablement**

Légende :

- |                                     |   |  |
|-------------------------------------|---|--|
| a) Pipe to divert water to the pond | = | a) Tuyau pour diriger l'eau vers le bassin |
| b) Recent small pond                | = | b) Petit bassin de construction récente    |

**Site 4 :** le bassin est construit en pierres et ses parois, de construction soignée, sont en bon état. Il mesure  $1,35 \times 1,35$  m dans le sol et 0,24 m d'épaisseur.

**34**

Sur la partie supérieure est installée une conduite de ventilation (voir figure 25b). Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 603104 m, N 7565867 m, à 4411 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).

En aval, des cours d'eau dessinent des gorges naturelles aux rives typiques des zones humides des hauts plateaux andins (les *bofedales*)<sup>3</sup>, comme le montre la figure 26b. Cependant, le fond de certains tronçons du canal naturel a été recouvert de pierres (lit du canal).

**Transport solide :** à un mètre du barrage des cours d'eau 01 à 04, le lit est formé de rochers et de gravier lourd. En général, le fond des canaux est recouvert de dépôts sédimentaires dont le déplacement dans le fond n'est pas visible. Seules des particules caractéristiques du gravier et du sable angulaire reposent de manière statique dans le fond du canal. Sur le tronçon initial, aucun mouvement de particule n'est visible. Les rives du canal se composent essentiellement de sédiments granulaires et de tourbe, voir figure 26.

La figure 26a montre le flanc droit du canal présenté à la figure 26b ; dans la partie supérieure de ce canal, des sédiments sableux et un petit canal proviennent de l'amont (comme le montre la figure 26c). Dans les zones supérieures, il est possible d'observer des traces d'anciennes sources sans végétation ; on n'aperçoit que du sable meuble ainsi que des pierres éparpillées et de la végétation constituée de paille et d'*Azorella compacta* (localement désignée sous le nom de *yareta*).

---

<sup>3</sup> Selon la classification établie par la convention Ramsar, il existe différents types de zones humides, le *bofedal* étant une zone humide des hauts plateaux andins qui présente des caractéristiques spécifiques et produit des sols tourbeux d'épaisseur et de pente variables. Le sol est composé d'un mélange de gravier et de sable résultant de l'érosion fluvio-glaciaire.



a) Sediments of sand and gravel.



b) Peat sediments and rocks lining canals.



c) Groove and old bofedal without water.

**Figure 26**

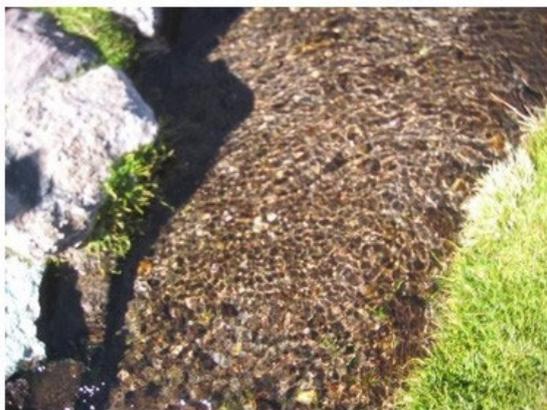
**Sédiments dans la zone supérieure des sources et des *bofedales* sud**

Légende :

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a) Sediments of sand and gravel           | = | a) Sédiments sableux et graviers                          |
| b) Peat sediments and rocks lining canals | = | b) Sédiments tourbeux et pierres de revêtement des canaux |
| c) Groove and old bofedal without water   | = | c) Gorge et ancien <i>bofedal</i> sans eau                |

**Site 5 :** les photographies de la figure 27 montrent les sédiments qui reposent dans le lit du canal excavé à la sortie des sources 01 à 04. On observe également une granulométrie peu dispersée bien installée dans le lit ; cependant, sous le lit on trouve de la tourbe. Les sédiments trouvés dans le lit des canaux proviennent en général des rives du canal. Lors de l'inspection sur le terrain à cet endroit, il a été constaté que l'écoulement de l'eau ne produit pas de mouvement de particules, pas même des particules de plus petit diamètre, ce qui confirme le fait que les débits sont pratiquement constants.

35



a) Artificial canal bed formed by sands and small gravels.



b) Artificial canal bed formed by angular gravels.

**Figure 27**

**Lit couvert de sédiments constitués de graviers angulaires**

Légende :

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a) Artificial canal bed formed by sands and small gravels | = | a) Lit de canal artificiel constitué de sable et de petits graviers |
| b) Artificial canal bed formed by angular gravels         | = | b) Lit de canal artificiel constitué de graviers angulaires         |

L'eau qui approvisionne l'avant-poste militaire est acheminée au moyen d'un tube en PVC de 3 pouces de diamètre (figure 28a) ; celui-ci est raccordé ensuite à un poly-tube de même diamètre et longe un des canaux artificiels (figure 28b) jusqu'au point où l'eau est déversée dans un réservoir situé à l'arrière de l'avant-poste militaire.



a) Interior of the masonry chamber with pipes and gate valves.

b) Pipe that extends towards the military outpost and passes by a side of the canal excavated by the bofedal.

**Figure 28**

**Chambre d'adduction et canalisation d'acheminement de l'eau**

Légende :

- |  |   |   |
|--|---|---|
| a) Interior of the masonry chamber with pipes and valves   | = | a) Intérieur de la chambre maçonnée avec canalisations et vannes  |
| b) Pipe that extends towards the military outpost and passes by a side of the canal excavated by the bofedal | = | b) Canalisation qui s'étend vers l'avant-poste militaire et longe le canal creusé par le <i>bofedal</i> |

36

**Site 6 :** en aval des quatre premières sources se trouvent d'autres sources. La source 06 (figure 29a) rejoint la branche de droite qui vient du petit barrage. La source 07 (figure 29b) fournit moins d'eau. Les deux sources sont chenalisées dans de petits canaux recouverts de pierres qui présentent des traces et des sections peu définies en forme de fossé. Le revêtement du fond et des parois des canaux est endommagé parce qu'il a été retiré manuellement sur les côtés ou parce que les pierres ont été retournées et obstruent l'écoulement. D'autres pierres ont été fracturées par les changements répétitifs de température. Il n'y a pas de transport ou de déplacement de sédiments puisque les écoulements et les pentes sont très faibles. Par conséquent, les forces exercées par le courant sur le fond ne sont pas supérieures à la capacité de résistance au déplacement des sédiments.



a) Collector canal of springs 01 to 06.



b) Collector canal of spring 07.

**Figure 29**

**Canaux d'acheminement de l'eau des sources**

Légende :

- |  |   |   |
|--|---|---|
| a) Collector canal of springs 01 to 06 | = | a) Canal collecteur des sources 01 à 06 |
| b) Collector canal of spring 07        | = | b) Canal collecteur de la source 07     |

**Site 7 :** la jonction des principaux canaux collecteurs des sources 01 à 07 se produit à la confluence montrée sur la photographie de la figure 30a : nous y voyons des canaux construits, avec revêtement de pierres et protégés pour éviter l'effondrement des parois.



a) Union of collector canals of springs 01 to 07.

b) Weir 1 in the South Bofedal.

**Figure 30**

**Jonction artificielle ancienne des canaux et sortie actuelle pour mesurer le débit**

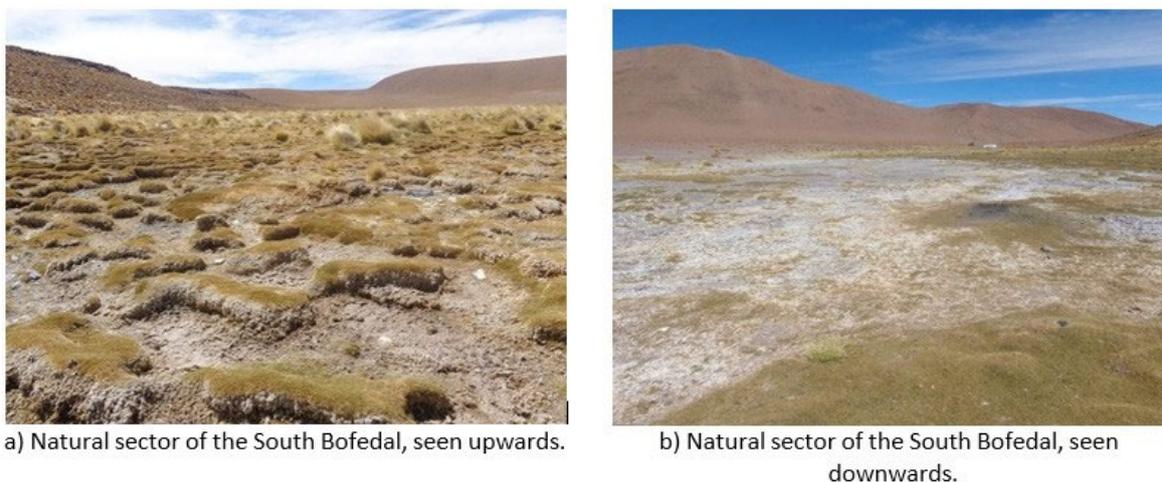
Légende :

- |  |   |  |
|--|---|--|
| a) Union of collector canals of springs 01 to 07 | = | a) Jonction des canaux collecteurs des sources 01 à 07 |
| b) Weir 1 in the South Bofedal                   | = | b) Déversoir 1 dans le <i>bofedal</i> sud              |

**Site 8 :** sur ce site, se trouve un déversoir triangulaire (figure 30b) dans lequel pénètrent deux canaux principaux, excavés artificiellement puisqu'on y observe des coupes presque verticales sur leurs parois ; l'alignement et la pente sont constants, sans bifurcations, inondations ou débordements. Ce déversoir est situé aux coordonnées suivantes : E 0603030 m, N 7565889 m, à 4412 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).

**37**

Du déversoir 1 vers l'aval, on peut distinguer un ruissellement concentré dans un canal principal qui présente une large section excavée dans le sol, typique du *bofedal*, comme le montrent les figures 29 à 30b. Les berges et les sols à proximité du canal restent humides, avec des zones vertes et des cours d'eau végétalisés. Par contraste, ces zones élevées des berges du *bofedal*, qui étaient probablement humides, ont été drainées par des canalisations artificielles. Ces zones drainées étaient sèches et sont maintenant des sols sableux où la paille prédomine en touffes irrégulières (voir figure 31). Le sable est le produit d'une désintégration due aux changements brusques de température, puisqu'il n'y a pas de processus de déplacement de sédiments.



**Figure 31**

***Bofedal sud après le captage de l'eau au moyen d'actions de drainage***

Légende :

- |  |   |   |
|--|---|---|
| a) Natural sector of the South Bofedal, seen upwards   | = | Secteur naturel du <i>bofedal</i> sud, vue vers l'amont |
| b) Natural sector of the South Bofedal, seen downwards | = | Secteur naturel du <i>bofedal</i> sud, vue vers l'aval  |

La description qui précède indique que de l'eau s'est accumulée dans ces secteurs à certaines périodes, comme lors d'une inondation ou par saturation du sol. Cependant, aujourd'hui seules des zones de *bofedal* réduites sont observées, comme le montre la figure 32.

**Site 9 :** dans la partie supérieure du *bofedal* sud, on a trouvé plusieurs tronçons de canaux excavés dans le sol naturel sans écoulement d'eau (figure 32a) ; ils sont rectilignes et dirigés vers un canal principal plus large. A l'origine, ces canaux pouvaient être utilisés pour ne recueillir que les eaux des zones humides puisque du côté sud du même *bofedal* il n'existe pas de sources superficielles.

**Site 10 :** sur le côté droit de la zone centrale du *bofedal* sud, on trouve d'importantes zones humides alors que, du côté gauche, on ne voit pas d'eau (figure 32b), même si sur certaines sections on trouve des sols très secs, recouvert de *paja brava* (*Stipa ichu* — herbe haute de l'Altiplano) (voir figure 32).

**Site 11 :** le déversoir 2 est situé aux coordonnées suivantes : E 602792 m, N 7565804 m, à 4440 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984). Ces structures hydrauliques ont été installées en août 2017 pour mesurer les débits aux points installés. Les eaux d'une grande partie du *bofedal* sud supérieur convergent ici et leur écoulement, avant de continuer vers la zone centrale du *bofedal*, se rétrécit ; dans ce secteur est mesuré le débit des sources 01 à 20 ainsi que l'eau recueillie dans les *bofedales* le long des canaux collecteurs (figure 34b), même si certains tronçons sont secs et que l'on trouve à leur place de la *paja brava* (*Stipa ichu*) (voir figure 32).



a) Margin of the South Bofedal without vegetation.

b) Natural sector of the South Bofedal without water with a view towards the southwest. |

**Figure 32**  
**Secteurs secs du *bofedal* sud**

Légende :

- |  |   |  |
|--|---|--|
| a) Margin of the South Bofedal without vegetation                                      | = | a) Rive du <i>bofedal</i> sud sans végétation                                    |
| b) Natural sector of the South Bofedal without water with a view towards the southwest | = | b) Secteur naturel du <i>bofedal</i> sud sans eau, vue en direction du sud-ouest |

**Site 12 :** il y a ici un réservoir d'eau (voir figure 33) situé aux coordonnées suivantes : E 602752 m et N 7565797 m (système UTM WGS 1984). La photographie montre qu'une canalisation de transport de l'eau alimente ce réservoir qui a été construit récemment pour apporter de l'eau à dix maisons (à ce jour, ce réservoir n'est plus en service puisqu'il n'y a plus d'habitants dans lesdites maisons). La configuration du terrain montre qu'il a été inondé par de l'eau et/ou de la neige et aujourd'hui c'est un *bofedal* complètement sec que l'on peut observer. Voir le côté gauche sur la figure 33.



**Figure 33**  
**Réservoir**

**Site 13** : on a trouvé en aval du déversoir triangulaire n° 2, une espèce indigène du *bofedal*. Voir figure 34.

39

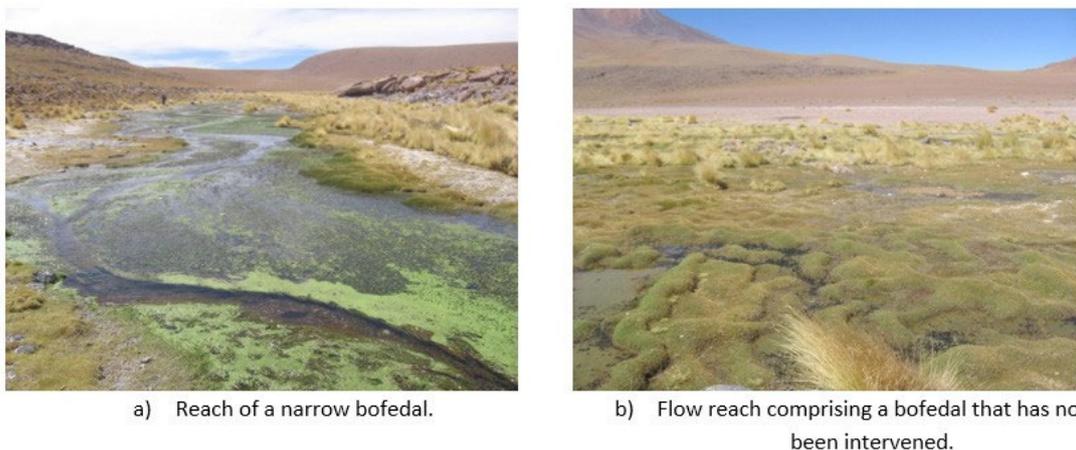


**Figure 34**  
**Espèce indigène (crapaud)**

**Site 14** : on observe dans ce secteur un recul important du *bofedal* sud : le sol se rétrécit et se transforme en formation rocheuse, et la pente augmente, comme nous le verrons au chapitre traitant de la modélisation hydraulique. Entre les pentes se trouve un espace d'environ 20 mètres : sur la pente gauche on observe des formations rocheuses et sur l'autre pente le sable couvre toute la surface.

Par conséquent, l'eau poursuit son cheminement dans un tronçon de canal artificiel jusqu'au rétrécissement où elle s'écoule naturellement dans un autre tronçon court non chenalisé, voir la figure 35a.

Le lit est composé d'un mélange de sable et de graviers, et dans certains tronçons on observe une végétation aquatique typique des zones humides des hauts plateaux andins (figure 35b). On observe sur les berges du *bofedal* de la tourbe (voir figure 35a). Cependant, sur certains tronçons, on trouve des parois protégées par des pierres disposées avec soin et jointoyées pour constituer un revêtement.



**Figure 35**  
**Caractéristiques du canal et du *bofedal* autour du déversoir 3**

Légende :

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a) Reach of a narrow bofedal                                    | = | a) Tronçon d'un <i>bofedal</i> étroit   |
| b) Flow reach comprising a bofedal that has not been intervened | = | b) Tronçon d'écoulement avec un <i>bofedal</i> n'ayant subi aucune intervention |

40

**Site 15 :** sur le site présenté à la figure [36], nous pouvons voir les traces d'une route ; un accès en forme de fossé se trouve à l'extrémité du *bofedal*. L'eau qui s'écoule par ce point a un très petit tirant et, en aval, nous pouvons observer plus de végétation sur 8 mètres de largeur environ et sur une courte longueur ; puis l'écoulement se rétrécit et passe dans le canal artificiel. Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 602543 m, N 7565784 m, à 4408 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).



**Figure 36**  
**Fossé permettant aux véhicules de franchir un tronçon canalisé du *bofedal***

**Site 16 :** le canal est restauré sur le flanc droit après le passage du fossé (voir figure 37a) et sur sa rive gauche les surfaces de *bofedales* ont diminué (voir figure 37b). De plus, le revêtement en pierre ne protège que partiellement le tronçon chenalisé (voir figure 37a).

41



a) Canal with view upstream.



b) Left flank with reduced bofedal.

**Figure 37**

**Rétrécissement du *bofedal* et canal creusé par le *bofedal***

Légende :

- |                                    |   |   |
|------------------------------------|---|---|
| a) Canal with view upstream        | = | a) Vue amont du canal                     |
| b) Left flank with reduced bofedal | = | b) Rive gauche avec <i>bofedal</i> réduit |

**Site 17 :** à cet endroit, nous trouvons une source (voir figure 38a) sur la rive droite du canal, sur un tronçon situé dans une gorge et avec un apport d'eau très faible. Sur ce tronçon l'écoulement semble se produire dans des conditions naturelles, bien que l'importance des prairies empêche de l'observer aisément (voir figure 38b). Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 602392 m, 7565824 m, à 4399 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).

CHARACTERIZATION AND EFFICIENCY OF THE HYDRAULIC WORKS BUILT AND INSTALLED IN THE SILALA SECTOR



a) Spring 21.



b) Scrubland on the left flank.

**Figure 38**

**Canal couvert de broussailles très abondantes**

Légende :

- |                               |   |                                    |
|-------------------------------|---|------------------------------------|
| a) Spring 21                  | = | a) Source 21                       |
| b) Scrubland on the left bank | = | b) Broussailles sur la rive gauche |

**Site 18 :** dans cette zone nous trouvons un tronçon de canal sans revêtement (une protection partielle est visible, comme le montre la figure 39a) ; bien que le canal fasse partie d'un drainage artificiel, ce cours d'eau est chenalisé et l'écoulement présente des remontées d'eau sur le flanc droit. Nous observons également des pierres aux bords légèrement usés, ce qui indique qu'à certaines périodes il y a eu un déplacement de sédiments qui est à l'origine de l'usure des pierres en bordure du canal (figure 39b). Il y a également une circulation d'eau dans la zone qui se rétrécit, la pente est modifiée, ce qui augmente la vitesse et produit une légère turbulence. Cependant, les zones humides

qui le recouvrent s'étendent d'une extrémité à l'autre de la pente. Ces pentes sont composées de pierres et présentent des coupes presque verticales. Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 602212 m, N 7565869 m, à 4398 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).

**Site 19 :** cette zone se trouve devant l'avant-poste militaire de Silala en Bolivie. Une autre source se trouve dans ce tronçon. Dans le secteur du canal, on constate qu'il y a eu une intervention avec protection des remblais et des parois en pierre. Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 601804 m, N 7566061 m, à 4390 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984). Le tronçon est inondé, ce qui prouve que le *bofedal* est gorgé d'eau, principalement sur la rive gauche (figure 39a).

Sur ce même tronçon, il existe un projet d'élevage de poisson avec deux types de bassin, l'un construit en pierres et l'autre en béton armé. Les deux bassins à poissons sont abandonnés.

**Site 20 :** de la zone des bassins à poissons vers l'aval, la chenalisation de l'eau est rectiligne, ce qui montre que ce tronçon a fait l'objet d'interventions artificielles puisqu'on observe aussi que les parois du canal ont été protégées de manière irrégulière par quelques pierres (figure 39a et b).

42



a) Intervened canal with a view upstream.

b) Canal with flow, seen from upstream.

**Figure 39**

**Canal dans le tronçon de l'avant-poste militaire de Silala**

Légende :

- |  |   |  |
|--|---|--|
| a) Intervened canal with a view upstream | = | a) Canal ayant subi une intervention, vue vers l'amont |
| b) Canal with flow, seen from upstream   | = | b) Canal avec écoulement, vue de l'amont               |

**Site 21 :** on observe un tronçon avec une courte chenalisation naturelle, où l'eau s'écoule à travers une ouverture rocheuse (figure 40a). Cependant, dans un autre tronçon, l'eau s'écoule à travers une zone humide saturée (figure 40b).



a) Canal reach with a flow seen from downstream. b) Canal narrowing down, seen from downstream

**Figure 40**

**Rétrécissement du tronçon du canal avec écoulement naturel**

Légende :

- |   |   |  |
|---|---|--|
| a) Canal reach with a flow seen from downstream | = | a) Tronçon de canal avec écoulement vu de l'aval |
| b) Canal narrowing down, seen from downstream   | = | b) Rétrécissement du canal, vu de l'aval         |

**Site 22 :** le déversoir 3 (voir figure 41a) est situé aux coordonnées suivantes : E 601473 m, N 7566264 m, à 4378 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984). Le tronçon aval du déversoir a fait l'objet d'une intervention sous la forme d'un canal excavé dans le sol naturel (tourbe du *bofedal*), voir figure 41b. Il y a également des protections sur les côtés du canal.

43



a) Location of Weir 3. b) Reach canalized after Weir 3.

**Figure 41**

**Tronçon avec canal naturel et canal modifié à proximité du déversoir 3**

Légende :

- |                                 |   |   |
|---------------------------------|---|---|
| a) Location of Weir 3           | = | a) Emplacement du déversoir 3             |
| b) Reach canalized after Weir 3 | = | b) Tronçon chenalisé après le déversoir 3 |

**Site 23 :** dans ce secteur, il y a une ouverture dans le tronçon qui se trouve dans la gorge et il y a aussi une modification du profil du terrain qui crée une chute d'eau d'environ 5 mètres de haut. Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 601267 m, N 7566267 m, à 4383 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984), voir figure 42a. Dans la partie la plus étroite, il y a une modification de pente très prononcée.

En aval, l'eau s'écoule au travers du *bofedal* où les conditions humides sont maintenues. Cependant, on peut visualiser un cheminement où l'eau s'écoule des deux côtés puis se répartit dans le cours d'eau pour occuper toute la largeur du tronçon dans la gorge (voir figure 42b). Le tronçon n'a pas un parcours défini mais s'écoule de façon dispersée dans les *bofedales*.



a) Water fall at the end of the narrow reach.

b) Reach of the bofedal after the waterfall

Figure 42

**Chute d'eau et bofedal dans la zone du canal (bofedal sud)**

Légende :

- |  |   |  |
|--|---|--|
| a) Water fall at the end of the narrow reach | = | a) Chute d'eau à l'extrémité du tronçon étroit |
| b) Reach of the bofedal after the waterfall  | = | b) Bofedal après la chute d'eau                |

44

En présence des ouvrages de drainage observés dans la partie supérieure du *bofedal* sud, on note que l'écoulement a été chenalisé ; à l'état naturel, l'écoulement dans les *bofedales* est bien moindre. Cette affirmation se base sur l'observation des sections dotées d'ouvrages de drainage artificiels, les tronçons modifiés étant ceux où des canaux ont été creusés et où des pierres de protection ont été posées. A l'inverse, sur d'autres tronçons, le milieu poreux des *bofedales* conservant leurs caractéristiques naturelles présente un écoulement faible ou est inondé. Le tronçon ne présente pas une section type avec des terrasses naturelles mais il y a au milieu un canal creusé avec un écoulement excédentaire ou dévié qui en couvre toute la largeur.

**Site 24 :** le tronçon de ce site (figure 43a) se trouve au fond d'une gorge aux parois semi-verticales. Sur ce tronçon, l'écoulement est naturel.

Les figures 43b et 43c montrent qu'un tronçon de l'écoulement a fait l'objet d'une intervention : il a été creusé dans le *bofedal* et protégé par des pierres. Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 600859 m, N 7566029 m, à 4350 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).

**Site 25 :** sur ce tronçon se trouve un canal construit en pierres (figure 43c). C'est un tronçon rectangulaire bien que l'on y observe une géomorphologie rocheuse étroite comme le montre la figure 43d. Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 600843 m, N 7565986 m, à 4347 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).



**Figure 43**

**Tronçon situé dans la gorge et chenalisation à proximité de l'extrémité du bofedal sud**

Légende :

- |  |   |   |
|--|---|---|
| a) Reach found within a ravine of the South Bofedal                            | = | a) Tronçon situé dans une gorge du bofedal sud  |
| b) Reach canalized in the South Bofedal  | = | b) Tronçon chenalisé dans le bofedal sud  |
| c) Canal protection at the beginning of the reach found within the ravine      | = | c) Canal protégé au début du tronçon situé dans la gorge  |
| d) The bofedal and canal ends and starts a fall through rock with natural flow | = | d) Fin du bofedal et du canal et début d'une chute d'eau dans les rochers avec écoulement naturel |

**45**

**Site 26 :** ce tronçon se trouve entièrement dans la gorge, en amont de la confluence des canaux des bofedales nord et sud (figure 44), qui est située aux coordonnées suivantes : E 600652 m, N 7565908 m, à 4323 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).

Ce tronçon situé dans le fond de la gorge présente les caractéristiques suivantes :

- La pente est plus forte dans le tronçon rocheux, ce qui explique le ruissellement naturel entre les parois rocheuses qui enserrant l'écoulement.
- Une remontée d'eau a été observée dans les affleurements rocheux. Cette situation n'est pas visible dans les tronçons supérieurs. Les pentes présentent des coupes verticales et à leur base on peut observer des formations produites par des chutes d'eau abruptes.
- A la sortie du tronçon qui se trouve dans le fond de la gorge, la pente devient douce et l'écoulement reprend dans un canal excavé et recouvert.



a) The South Bofedal ends and a fall begins along an uneven reach found within the ravine.

b) Fall through rock with flow and a canalized reach after it.

**Figure 44**

**Tronçon situé dans la gorge et chenalisation à l'extrémité du *bofedal* sud**

Légende :

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a) The South Bofedal ends and fall begins along an uneven reach found within the ravine | = | a) Fin du <i>bofedal</i> sud et début d'une chute d'eau le long d'un tronçon irrégulier situé dans la gorge |
| b) Fall through rock with flow and a canalized reach after it                           | = | b) Chute d'eau dans les rochers avec écoulement et tronçon chenalisé à la suite                             |

**46 5.2.2. Tronçons de canaux creusés dans la roche**

Selon l'étude topographique, entre les stations 2+060 à 2+462 et 2+618 à 2+800, le tronçon est essentiellement rocheux et l'on peut observer des sections de forme géométrique presque régulière et des sections de forme rectangulaire ou trapézoïdale. Bien qu'il n'existe aucun document attestant de travaux de creusement de la roche sur ce tronçon, la disposition géométrique régulière observée montre clairement que la roche a été creusée pour former les canaux de ce tronçon. Le tableau 3 détaille la longueur des canaux creusés dans la roche.

Les caractéristiques physiques précises des tronçons de canaux creusés dans la roche sont présentées dans l'annexe 1. La figure 45 montre le tronçon concerné. Il convient de préciser que la catégorie «canaux creusés dans la roche» couvre deux cas : les canaux creusés dans la roche avec présence de tourbe et les canaux creusés seulement dans la roche.

REACH	PROGRESSIVE		LONGITUDE (m)	SLOPE (%)
	START	END		
REACH 1	2+060	2+092	32	5.5-6.6
REACH 2	2+092	2+310	218	2.5-4.5
REACH 3	2+310	2+377	67	9.09
REACH 4	2+377	2+462	85	4.95
REACH 5	2+618	2+710	92	1-33
REACH 6	2+710	2+800	90	1-30
TOTAL =			584	

**Tableau 3**

**Classification des tronçons selon la pente. Caractéristiques physiques détaillées du tronçon avec affleurement rocheux, *bofedal* sud**

Légende :

- |              |   |              |
|--------------|---|--------------|
| Reach        | = | Tronçon      |
| Progressive  | = | Station      |
| Start        | = | Début        |
| End          | = | Fin          |
| Longitude(m) | = | Longueur (m) |
| Slope (%)    | = | Pente (%)    |

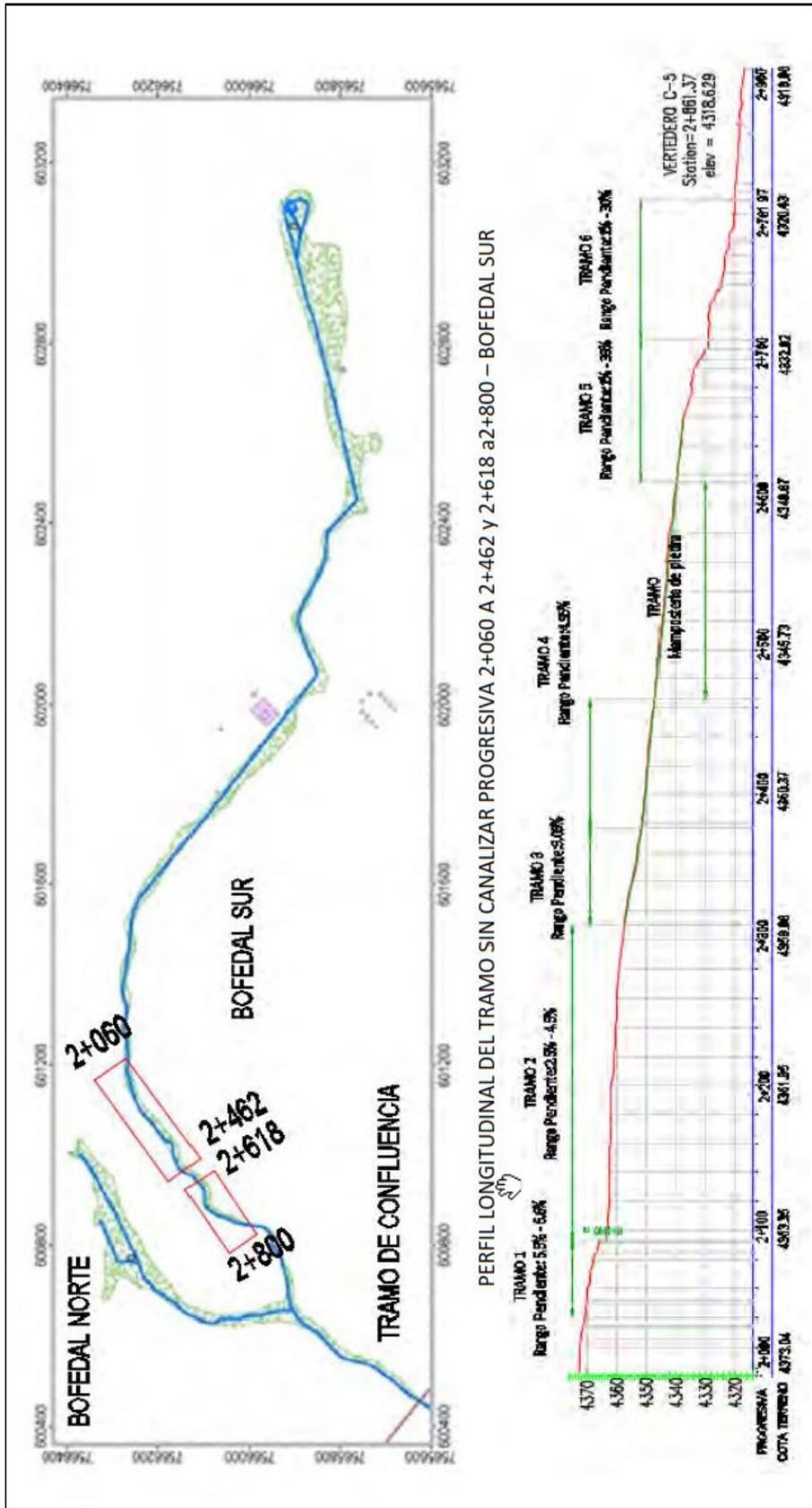


Figure 45  
 Localisation des tronçons avec revêtement de pierres dans le *bofedal sud*  
 (création interne selon les données du DIREMAR et de Google Earth)

## 48 5.2.3. Synthèse des ouvrages du *bofedal* sud

Le *bofedal* sud présente les caractéristiques suivantes :

- Les canaux de drainage partent des ouvrages de collecte de l'eau construits sur les remontées des sources.
- Les canaux construits sans revêtement sont les plus nombreux, creusés dans le sol naturel, étant entendu que le «sol naturel» est ici la matière du *bofedal*, c'est-à-dire une combinaison de terre, d'eau et de matière organique.
- Dans la partie supérieure du *bofedal*, il y a un canal principal et des canaux secondaires, qui sont très longs, avec des petits canaux de raccordement.
- Par leur disposition géométrique, les canaux sans revêtement prennent une forme rectangulaire trapézoïdale. Il n'y a pas de chute de matière latérale, de sorte que la forme est presque régulière.
- A mesure que l'on va vers l'aval, le canal principal est recouvert d'une maçonnerie de pierres jusqu'au point où l'eau s'écoule sur des rochers.
- Dans le tronçon supérieur, les pentes sont faibles et augmentent à l'approche du tronçon chenalisé jusqu'à la sortie du secteur rocheux.
- Le tracé horizontal des canaux est principalement rectiligne. Les changements de direction ne sont pas graduels, il n'y a pas de courbes de transition.
- Le canal principal du *bofedal* sud présente une pente moyenne de 3,1 % depuis la partie supérieure de la gorge jusqu'à la confluence avec le canal du *bofedal* nord.
- Pour ce qui est des dimensions des largeurs des canaux du tronçon du *bofedal* sud, les largeurs varient de 0,71 m à 3,2 m et les profondeurs, de 0,19 m à 0,50 m.

Le tableau 4 ci-après présente les caractéristiques des canaux : longueurs, types de matériaux et longueur totale. On peut constater que les canaux construits sont en majorité des canaux principaux, sans revêtement.

TYPE OF CANAL	WITHOUT COATING EXCAVATED IN NATURAL SOIL	WITH MASONRY COATING	CANALS IN ROCK	TOTALS
MAIN	1826.0	461.0	584.0	2871.0
SECONDARY	764.67	49.8	—	814.5

**Tableau 4**  
**Longueurs des canaux du *bofedal* sud (mesures exprimées en mètres)**

Légende :

Type of canal	=	Type de canal
Main	=	Principal
Secondary	=	Secondaire
Without coating excavated in natural soil	=	Non recouvert, creusé dans le sol naturel
With masonry coating	=	Recouvert d'une maçonnerie de pierres
Canals in rock	=	Canaux creusés dans la roche
Totals	=	Totaux

### 5.3. Ouvrages dans le *bofedal* nord

**Site 27 :** la figure 46 offre une vue panoramique de la partie supérieure du *bofedal* nord. Le sol est constitué de sable fin avec des fragments de pierres déposés et désintégrés par les intempéries et l'effet d'érosion du vent.

Il n'y a pas d'eau ni de trace d'érosion sur la pente ou de lavage du sol par le ruissellement en surface (érosion laminaire), encore moins de graviers, ce qui montre qu'il n'y a pas d'inondations dans le secteur, comme cela se produit dans les bassins hydrographiques.

La figure 46 présente également une vue générale du type de sol des flancs de coteau et des pentes à proximité des *bofedales* et de l'eau qui s'y écoule. En général, la pente présente de nombreuses zones de sol nu, typiques des bassins arides. Par ailleurs, les sédiments en surface sont granulaires et proviennent des changements de température brusques et de l'érosion par le vent, mais pas de l'érosion par l'eau.

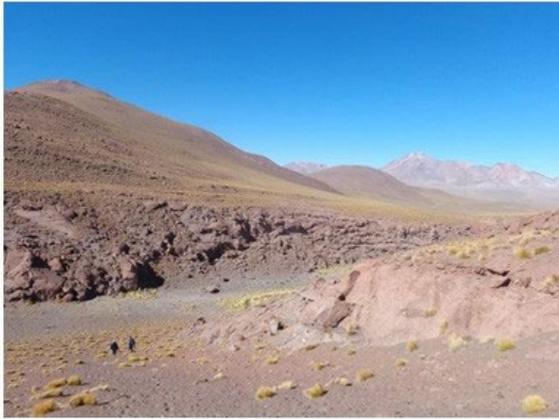


**Figure 46**  
**Partie supérieure du *bofedal* nord**

De plus, à des altitudes inférieures, on peut observer une dépression de la topographie du terrain ainsi qu'un affleurement de rochers fissurés sur chaque flanc. Encore plus bas, on observe des accumulations de sédiments sous forme de grains fins provenant du *bofedal* ainsi que l'émergence de sources chenalisées dans de petits canaux vers un canal collecteur principal.

**Site 28 :** la figure 47 montre des pierres assemblées ainsi que des blocs de pierre et des pierres cassées. Parmi d'autres configurations, on observe des fragments de pierres désagrégés sur le massif rocheux. Le sol est en général nu, parsemé de frêles touffes de *paja brava* (*Stipa ichu*) à la surface des pentes (couverture clairsemée).

50



a) Upper reach of the North Bofedal



b) Right slope in the South Bofedal

**Figure 47**

**Pierres assemblées sur les pentes du *bofedal* nord**

Légende :

- a) Upper reach of the North Bofedal
- b) Right slope in the South Bofedal

- = a) Tronçon supérieur du *bofedal* nord
- = b) Pente à droite du *bofedal* sud

**Site 29 :** on observe la présence d'un puits d'observation ou piézomètre sur ce site qui se trouve aux coordonnées suivantes : E 601045 m, N 7566380 m, à 4390 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984) (figure 49a). La figure 49b montre qu'il n'y a pas d'érosion sur ce site.



a) Observation well in the North Bofedal.



b) Surface without erosion.



c) First spring in the North Bofedal.



d) First water upwelling in the North Bofedal.

**Figure 48**

**Secteur supérieur du *bofedal* nord**

Légende :

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a) Observation well in the North Bofedal      | = | a) Puits d'observation dans le <i>bofedal</i> nord      |
| b) Surface without erosion                    | = | b) Surface sans érosion                                 |
| c) First spring in the North Bofedal          | = | c) Première source dans le <i>bofedal</i> nord          |
| d) First water upwelling in the North Bofedal | = | d) Première émergence d'eau dans le <i>bofedal</i> nord |

51

**Site 30 :** la première source du *bofedal* nord se trouve au pied d'un massif rocheux. La figure 48c montre que le sol est humide et que l'écoulement est faible. La figure 4[8]d montre que l'eau remontant du sous-sol s'écoule à un débit réduit.

**Site 31 :** le premier canal est observé dans la partie supérieure du *bofedal* (figure 50a).

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Son tracé est rectiligne, ce qui implique qu'il est le produit d'une intervention.
- Le matériau du canal a été creusé dans le sol naturel (*bofedal*) et les sédiments collectés lors de l'excavation ont été déposés sur la rive droite.
- Le canal n'a pas de revêtement.

**Site 32 :** la figure 49b montre que l'écoulement émane d'une source puis est chenalisé dans un canal creusé dans le sol naturel, protégé par des pierres qui forment un dôme. L'eau est ensuite dirigée dans un autre canal principal de plus grandes [dimensions].



a) Channeling of water from the first spring through the artificial canalization at the North Bofedal.



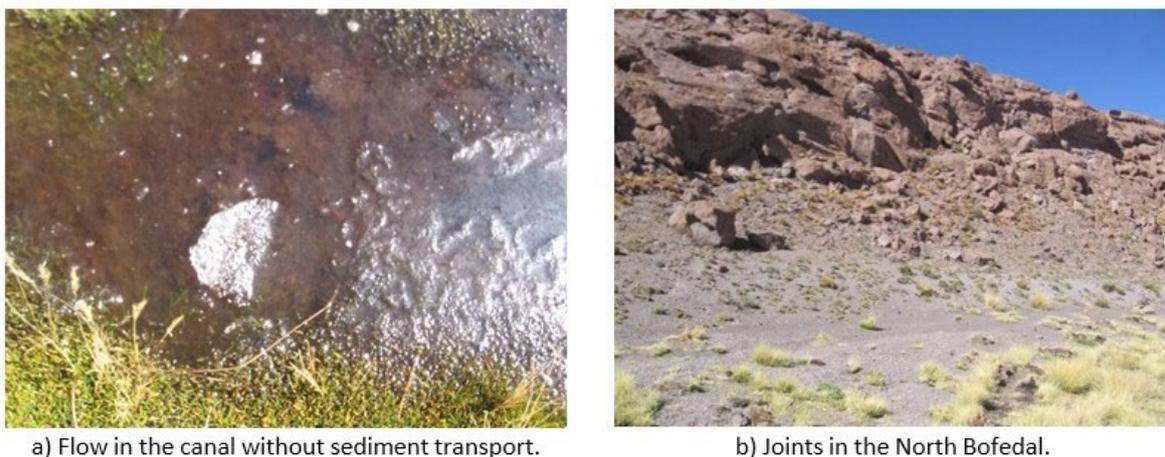
b) Union of canals (confluence) for the channeling of water from springs.

**Figure 49**

**Tronçon supérieur du canal de drainage dans le *bofedal* nord**

Légende :

- |   |   |  |
|---|---|--|
| a) Channeling of water from the first spring through the artificial canalization at the North Bofedal | = | a) Chenalisation de l'eau à partir de la première source dans le canal artificiel du <i>bofedal</i> nord |
| b) Union of canals (confluence) for the channeling of water from springs                              | = | b) Jonction des canaux (confluence) pour la chenalisation de l'eau issue des sources                     |



**Figure 50**  
**Fond et pente du canal dans le *bofedal* nord**

Légende :

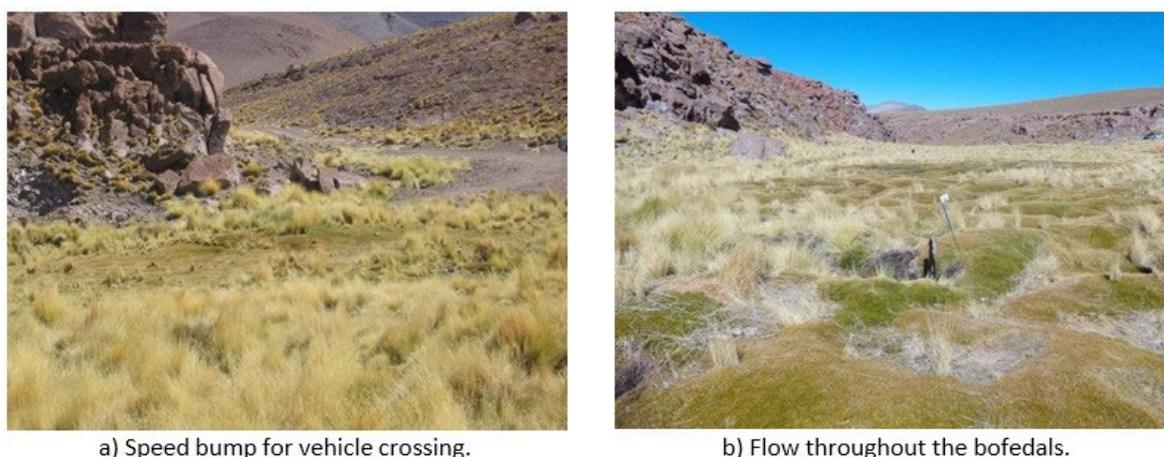
- |   |   |   |
|---|---|---|
| a) Flow in the canal without sediment transport | = | a) Ecoulement dans le canal sans transport solide |
| b) Joints in the North Bofedal                  | = | b) Pierres assemblées dans le <i>bofedal</i> nord |

52

**Site 33 :** la figure 50a montre un canal caractéristique des conduits artificiels, dans lequel n'apparaît aucune trace de transport solide tels que rochers et galets. La figure 50b montre une formation de pierres assemblées sur la pente nord.

**Site 34 :** la photographie de la figure 51 montre un bas-côté aménagé pour la circulation de véhicules, ce qui indique qu'une route d'accès aux sources existait déjà, certainement pour permettre les opérations de maintenance et d'inspection des ouvrages hydrauliques de captage d'eau. Cet ouvrage est situé aux coordonnées suivantes : E 600925 m, N 7566322 m, à 4367 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).

On trouve également une canalisation installée sous le dos d'âne, perpendiculairement à la route. Cet ouvrage a pour fonction d'acheminer l'eau des sources situées en amont et de capter l'eau du *bofedal* puisque la canalisation est perforée sur son côté supérieur. La canalisation étant recouverte de tourbe, sa longueur ne peut pas être estimée.



**Figure 51**  
**Fossé pour le passage des véhicules et canalisation pour l'écoulement de l'eau**

Légende :

- |                                    |   |  |
|------------------------------------|---|--|
| a) Speed bump for vehicle crossing | = | a) Dos d'âne pour le passage de véhicules    |
| b) Flow throughout the bofedals    | = | b) Ecoulement à travers les <i>bofedales</i> |

**Site 35 :** le *bofedal* présenté sur la photographie de la figure 51a est proche des sources et situé aux coordonnées suivantes : E 600890 m, N 7566319 m, à 4361 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984). Ce secteur est typique des *bofedales* : la surface du sol n'est pas régulière, des bosses et des creux sont visibles sur les bords du canal (voir figure 51b). Les bosses sont constituées d'une matière de couleur verte provenant du *bofedal* (tourbe limoneuse et sableuse) et par de la végétation. Au contraire, les creux sont des terrains sableux constitués de zones humides et de retenues d'eau. Il y a des différences de hauteur entre les zones inondées.

**Site 36 :** les photographies de la figure 52 montrent des monticules de sédiment dont les caractéristiques sont similaires à celles de la tourbe des *bofedales* ; nous pouvons même observer des touffes de végétation à la surface alentour. Il est probable que cette matière provienne de l'excavation réalisée pour créer les canaux artificiels. Les monticules sont visibles sur les deux bords des canaux et en suivent le tracé en parallèle.

53

Ce site se caractérise notamment par un tracé en réseau des canaux dotés de branches latérales qui acheminent l'eau collectée dans les sources vers des canaux secondaires presque parallèles. L'apport d'eau des sources se fait successivement, c'est-à-dire que plus on avance vers la frontière, plus l'écoulement collecté dans le canal principal est important. A la fin, les eaux collectées de chaque source viennent s'ajouter de manière longitudinale et convergent jusqu'à atteindre un canal de la confluence dans le canal du *bofedal* sud.



a) Collector canal with accumulated sediments on the sides.



b) Secondary canal with sediment clusters on the sides.



a) Canal lined with rocks.



b) Spring with rock protection.

**Figure 52**

**Tronçon de canalisations mineures (canaux secondaires)**

Légende :

- |  |   |   |
|--|---|---|
| a) Collector canal with accumulated sediments on the sides | = | a) Canal collecteur avec sédiments accumulés sur les côtés  |
| b) Secondary canal with sediment clusters on the sides     | = | b) Canal secondaire avec groupes de sédiments sur les côtés |
| a) Canal lined with rocks                                  | = | a) Canal recouvert de pierres                               |
| b) Spring with rock protection                             | = | b) Source protégée par des pierres                          |

**Site 37 :** la photo de la figure 53a montre une importante rétention d'humidité dans les *bofedales* ; le sens de l'écoulement n'étant pas visible, on considère qu'il s'agit d'une zone inondée. Cette configuration de *bofedal* est visible dans le secteur centre-ouest du *bofedal* nord. On peut également constater l'absence d'ouvrages de chenalisation dans ce secteur, ce qui explique l'accumulation d'eau au milieu des touffes de végétation. On pense que cette configuration de *bofedal* est l'état naturel d'un *bofedal* dans le secteur, ainsi qu'on peut le voir sur d'autres photographies décrites dans le chapitre relatif aux zones humides en conditions naturelles.

54

La figure 53b présente une vue du canal principal orientée vers le nord, sur laquelle on peut observer que le tracé du canal suit la pente naturelle du *bofedal* : cela indique que le canal principal a été tracé de manière à épouser les niveaux topographiques les plus bas, afin de capter facilement l'eau des sources et drainer celle des *bofedales* pour la chenaliser par les canaux secondaires.



a) North Bofedal with a downward view.



b) North Bofedal and drainage canals with an upward view.

**Figure 53**  
**Zone inondée dans le *bofedal* nord**

Légende :

- |  |   |  |
|--|---|--|
| a) North Bofedal with a downward view                    | = | a) Vue vers l'aval du <i>bofedal</i> nord                            |
| b) North Bofedal and drainage canals with an upward view | = | b) Vue vers l'amont du <i>bofedal</i> nord et des canaux de drainage |

**Site 38 :** la figure 54a montre une canalisation percée transversale dont la fonction est de chenaliser l'eau de la source située en amont pour ensuite l'acheminer dans un canal secondaire qui collecte l'eau d'autres sources. On voit également que la canalisation est recouverte de terre naturelle et protégée par des pierres, ce qui est justifié puisque cet espace a été construit pour permettre la circulation de véhicules au-dessus d'une telle chenalisation.

**Site 39 :** les photographies présentées à la figure 54b montrent une source dans le *bofedal* nord. Elle est située aux coordonnées suivantes : E 600831 m, N 7566275 m, à 4359 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984), à proximité de la route d'accès à la zone. Des pierres entourent et protègent la source dont l'eau en sortie remonte au travers d'un petit canal recouvert de pierres. L'écoulement de cette source est légèrement supérieur à celui des autres sources situées à des altitudes plus élevées, probablement parce qu'à cet endroit le gradient hydraulique est supérieur ou parce que les fissures dans les pierres assemblées sont plus nombreuses ou de plus grande taille.



**Figure 54**  
**Captage des sources au moyen de canalisations et de canaux recouverts de pierres**

Légende :

- |                    |   |                          |
|--------------------|---|--------------------------|
| a) Perforated pipe | = | a) Canalisation perforée |
| b) Spring          | = | b) Source                |

55

**Site 40 :** sur la photographie de la figure 55a, orientée vers l'amont, nous voyons un canal latéral qui longe le flanc gauche. Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 600821 m, N 7566267 m, à 4361 mètres au-dessus du niveau de la mer (système UTM WGS 1984).



a) Spring Protection. b) Confluence of secondary canals.

**Figure 55**  
**Protection d'une source et chenalisation en forme de dôme**

Légende :

- |                                   |   |                                     |
|-----------------------------------|---|-------------------------------------|
| a) Spring Protection              | = | a) Protection d'une source          |
| b) Confluence of secondary canals | = | b) Confluence de canaux secondaires |

**Site 41 :** sur la photographie de la figure 57b, nous voyons un autre canal qui longe le flanc droit et dont le faible écoulement passe à travers une canalisation et rejoint un canal secondaire, juste à la confluence avec un autre canal. On observe par ailleurs que ce canal a été protégé en amont par des pierres, ce qui lui donne la forme d'un bassin.

**Site 42 :** la figure 56 montre l'eau qui est acheminée dans des petits canaux creusés dans le sol du *bofedal* qui, ensuite, rejoignent le canal collecteur principal.



**Figure 56**  
**Captage de l'eau des sources**

Légende :

- |  |   |   |
|--|---|---|
| a) Input of collector canal              | = | a) Entrée du canal collecteur                     |
| b) Flow in the secondary collector canal | = | b) Ecoulement dans le canal collecteur secondaire |

**56**

**Site 43 :** la photographie de la figure 57 montre l'émergence d'une source à un niveau relativement élevé par rapport au canal collecteur principal. L'écoulement est visible dès sa sortie. L'intervention ici est très évidente puisque des canaux creusés dans la roche ont été judicieusement placés, de sorte que l'écoulement suive une paroi régulière. Dans sa partie inférieure, l'écoulement pénètre dans un autre canal qui suit la pente ; de plus, sa section reste plus ou moins constante et comprend des canaux qui collectent l'eau provenant d'autres sources. Ce site se trouve aux coordonnées suivantes : E 600768 m, N 7566308 m (système UTM WGS 1984).



**Figure 57**  
**Vue de la source 50**

Légende :

- |  |   |  |
|--|---|--|
| a) Spring of the north bofedal         | = | a) Source du <i>bofedal</i> nord                 |
| b) Channeling of water from the spring | = | b) Chenalisation de l'eau provenant de la source |

Sur la vue panoramique du *bofedal* nord, (figure 58 et figure 59), on peut observer les éléments suivants :

- a) Du point de vue géomorphologique, on distingue deux vallées profondes formées par des phénomènes fluvio-glaciaires ayant abouti à une configuration géologique caractéristique pentue dans les deux *bofedales* du Silala.

- b) La rive nord présente une pente modérée et un sol souple qui lui donnent la forme d'une vallée à flanc de coteau, recouverte d'une végétation très éparse, de la paille essentiellement. La rive opposée est une falaise rocheuse très abrupte. Aucune des deux rives ne présente de trace de ruissellement superficiel ni d'effet d'une érosion laminaire.
- c) Le *bofedal* s'étend vers le sud : vus de haut, une série de canaux artificiels, aux tracés et pentes soigneusement définis, rejoint un canal collecteur principal plus important.
- d) Les remontées d'eau qui se produisent dans la vallée sont liées au processus de dépôt de matières souples et désintégrées qui ont permis le développement du *bofedal* dans toute la vallée, mais plus particulièrement sur la rive nord.

57

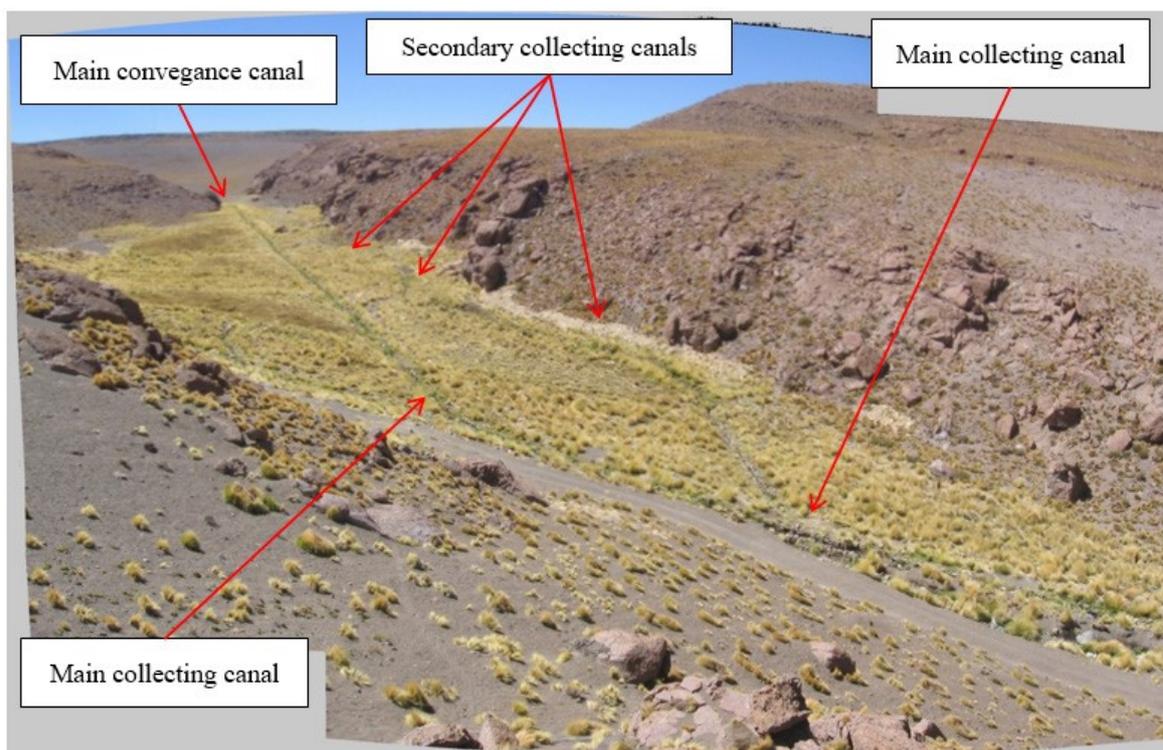


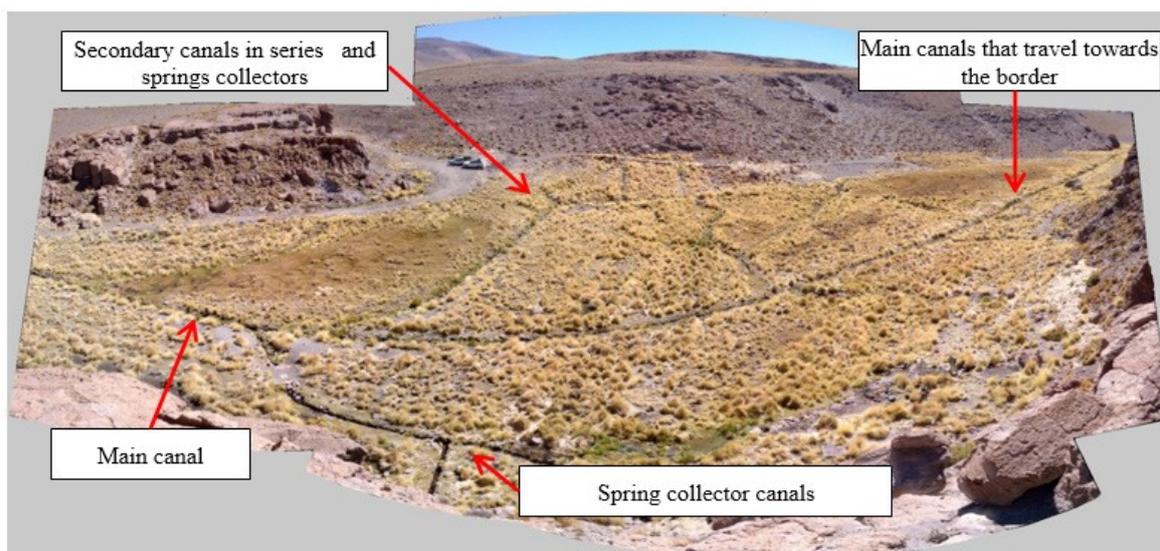
Figure 58

Vue panoramique 1 du réseau de canaux dans le *bofedal* nord

Légende :

Main conveyance canal	=	Canal d'acheminement principal
Secondary collecting canals	=	Canaux collecteurs secondaires
Main collecting canal	=	Canal collecteur principal

Les canaux collecteurs secondaires ont la forme d'une arête de poisson, constitués d'une série de canaux construits presque parallèles qui rejoignent tous un canal d'acheminement principal. Cette forme de drainage montre clairement que les sources sont chenalisées dans un canal plus important depuis leur émergence jusqu'à la confluence. Par ailleurs, une autre quantité d'eau est captée dans les *bofedales*, ces derniers étant drainés longitudinalement jusqu'à ce que l'eau atteigne le canal principal.



**Figure 59**  
**Vue panoramique 2 du réseau de canaux dans le bofedal nord**

Légende :

Main canal	=	Canal principal
Secondary canals in series and springs collectors	=	Canaux secondaires en série et collecteurs de sources
Main canals that travel towards the border	=	Canaux principaux s'acheminant vers la frontière
Spring collector canals	=	Canaux collecteurs de sources

## 58 5.3.1. Synthèse des ouvrages du bofedal nord

Le bofedal nord présente les caractéristiques suivantes :

- Sa disposition géométrique est différente de celle du bofedal sud. Dans le bofedal nord, l'eau chenalisée circule dans les bofedales et non sur un lit de pierre chenalisé comme cela a été observé dans le bofedal sud.
- Les sources sont plus nombreuses dans le bofedal nord que dans le bofedal sud. Il s'ensuit que chacune compte un plus grand nombre de captages et que le nombre de canaux secondaires est plus élevé. Le réseau de drainage, c'est-à-dire le réseau de canaux du bofedal nord, se compose d'un canal principal et de canaux secondaires dont la disposition lui donne la forme d'une arête de poisson.
- Seule une partie du canal principal — la partie supérieure — n'est pas recouverte sur le sol naturel. Si l'on omet ce tronçon, pratiquement tous les canaux (le canal principal et les canaux secondaires) sont recouverts de pierres assemblées sans liant. Dans certains secteurs, l'utilisation des pierres est plus «intense», comme c'est le cas sur le canal principal.
- Dans le bofedal nord, on observe la présence de canalisations faisant office de canaux secondaires. L'écoulement dans les canaux est libre, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas sous pression.
- La densité de drainage des canaux secondaires est supérieure à celle du bofedal sud, ce qui indique un degré d'intervention très supérieur.
- Le recours à une maçonnerie en pierre sans liant facilite grandement le drainage latéral le long des canaux. Ainsi, le processus de collecte de l'eau ne se réalise pas seulement à l'émergence des sources mais également sur toute la longueur du canal.

- Des pierres assemblées à sec protègent les parois et la partie supérieure des canaux secondaires, leur donnant la forme d'un dôme.
- Dans le tronçon situé avant la confluence avec le canal en provenance du *bofedal* sud, on observe que la présence d'une maçonnerie en pierre mais aussi de pierres percées au fond (lit) du canal.
- Les canaux primaires et secondaires suivent un plan rectiligne. Le tracé horizontal des canaux est rectiligne, sans courbure graduelle dans les changements de direction.
- Le canal principal du *bofedal* nord présente une pente moyenne de 6,4 % entre sa partie supérieure et la confluence avec le canal du *bofedal* sud.
- Les dimensions du canal du *bofedal* nord varient de 0,40 m à 0,48 m pour la largeur et de 0,22 m à 0,55 m pour la profondeur.

Le tableau 5 présente les caractéristiques des canaux du tronçon du *bofedal* nord : longueurs, types et matériaux de construction. On observe qu'il y a une majorité de canaux secondaires, une situation qui s'explique de toute évidence par l'existence d'un plus grand nombre de sources.

59

TYPE OF CANAL	WITHOUT COATING EXCAVATED IN NATURAL SOIL	WITH MASONRY COATING	CANALS IN ROCK	TOTALS
MAIN	170.0	518.0	–	688.0
SECONDARY	–	1112.0	–	1112.0

**Tableau 5**  
**Longueurs des canaux du *bofedal* nord (mesures exprimées en mètres)**

Légende :

Type of canal	=	Type de canal
Without coating excavated in natural soil	=	Non recouvert, creusé dans le sol naturel
With masonry coating	=	Recouvert d'une maçonnerie de pierres
Canals in rock	=	Canaux creusés dans la roche
Totals	=	Totaux

## 5.4. Canal du tronçon de la confluence

### 5.4.1. Description détaillée

**Site 44 :** la confluence des canaux de drainage des *bofedales* sud et nord du Silala se situe aux coordonnées E 600650 m, N 7565900 m. Les canaux d'entrée sont rectilignes et leurs parois sont complètement recouvertes de pierres, voir figure 60. Il n'y a pas de transport solide et l'écoulement est turbulent.

Avant la confluence, deux déversoirs triangulaires métalliques contrôlent le débit grâce à des capteurs de niveau.

La confluence des canaux des *bofedales* sud et nord se caractérise principalement par une maçonnerie en pierres assemblées avec un certain type de liant qui recouvrent les deux côtés du canal (à première vue, il n'a pas été possible d'établir avec antériorité le type de liant qui aurait pu être employé dans cette section). La maçonnerie présente une résistance élevée aux vitesses de l'écoulement (les magnitudes de vitesse sont présentées dans le chapitre relatif à la modélisation hydraulique).



**Figure 60**  
**Vue de la confluence des canaux des *bofedales* sud et nord**

**60**

**Site 45 :** après la confluence des canaux sud et nord, l'eau collectée est acheminée dans un canal collecteur principal de construction complètement artificielle en pierre, qui dirige l'eau provenant de l'ensemble des sources et du drainage des *bofedales*, comme montré sur la figure 61.

Ce tronçon chenalisé allant des ouvrages de captage et de désensablement à la frontière (voir figure 62) se caractérise principalement par son tracé artificiel qui est le produit d'un projet de drainage typique.



a) Straight reach.

b) Curved reach.

**Figure 61**  
**Vue du canal maçonné en direction de la frontière avec le Chili**

Légende :

- a) Straight reach
- b) Curved reach

- = a) Tronçon rectiligne
- = b) Tronçon en courbe

D'abord, la figure 61a montre un tronçon de canal rectiligne. Puis, dans le même alignement que le canal, on distingue dans le fond une faille rocheuse découpée presque verticalement. Le drainage a donc été dévié, comme le montre la figure 61b.

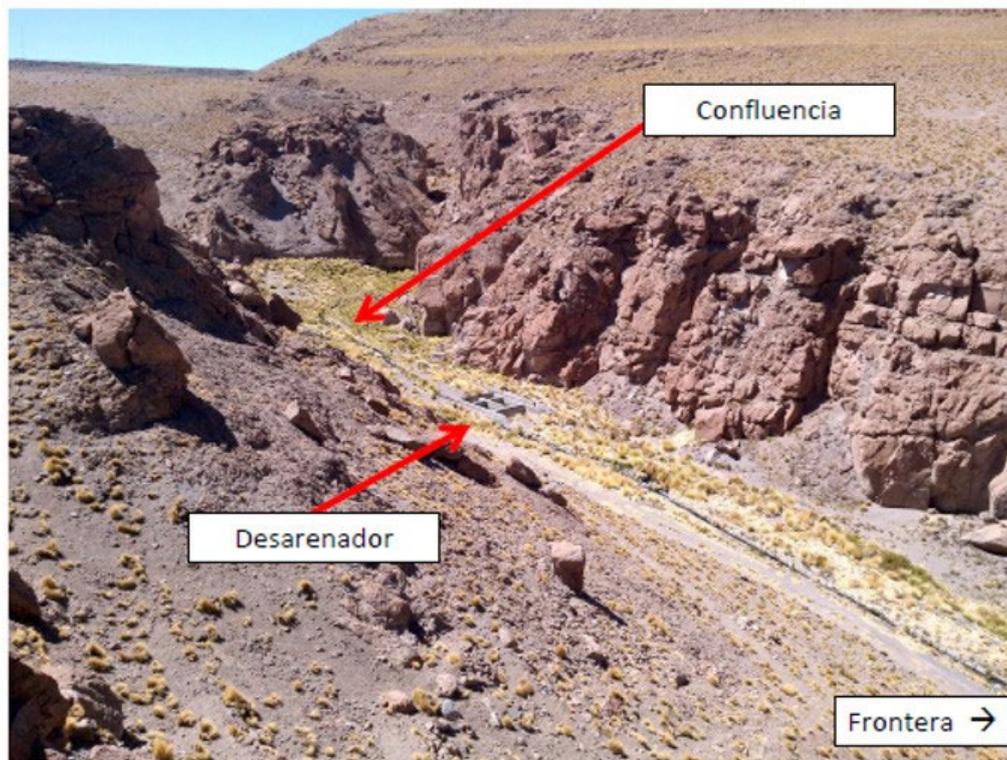


Figure 62

Ouvrages de captage, bassin de désensablement et bassin de chargement à proximité de la frontière

61

Site 46 : enfin, la figure 63 montre une vue de la sortie du canal en direction de la frontière chilienne. On peut observer que le tracé des canaux a été aligné sur la topographie du terrain.



Figure 63

Vue panoramique de la sortie du canal en direction de la frontière

#### 5.4.2. Synthèse des ouvrages du tronçon de la confluence

Le tronçon de la confluence présente les caractéristiques suivantes :

- Au point de convergence des canaux des *bofedales* nord et sud, le canal de chenalisation achemine les deux masses d'eau vers la frontière.
- Le canal a une capacité plus élevée et son tracé suit la configuration de la gorge. Le canal a été construit dans la partie centrale de la gorge où il est démontré qu'une intervention a eu lieu sur un élément naturel.
- Les parois du canal sont recouvertes de pierres assemblées tandis que le fond est constitué de pierres posées à plat.
- Sur ce tronçon se trouve l'ouvrage de captage d'eau le plus important du secteur, comprenant un bassin de désensablement et un bassin de chargement. Actuellement, cet ouvrage n'est plus utilisé.
- Le tracé horizontal du canal principal du tronçon de la confluence est presque droit et les courbes dans les changements de direction ne sont pas graduelles.
- La pente est uniforme, de 5,6 % en moyenne.
- La section transversale du canal est presque constante. Les dimensions moyennes sont de 0,80 m pour la largeur et de 0,65 m pour la profondeur.

62

Ci-après, le tableau 6 indique les longueurs des canaux dans le tronçon de la confluence. Il précise également les caractéristiques des canaux ainsi que les matériaux utilisés pour leur construction.

TYPE OF CANAL	WITHOUT COATING EXCAVATED IN NATURAL SOIL	WITH MASONRY COATING	CANALS IN ROCK	TOTALS
MAIN	0.0	706.0	—	706.0
SECONDARY	—	238.0	—	238.0

**Tableau 6**  
**Longueurs des canaux dans le tronçon de la confluence (mesures exprimées en mètres)**

Légende :

Type of canal	=	Type de canal
Without coating excavated in natural soil	=	Non recouvert creusé dans le sol naturel
With masonry coating	=	Recouvert d'une maçonnerie de pierres
Canals in rock	=	Canaux creusés dans la roche
Totals	=	Totaux

## 6. DESCRIPTION ET CLASSIFICATION DES OUVRAGES DE CAPTAGE D'EAU

### 6.1. Ouvrages de captage d'eau

#### 6.1.1. Classification

Pour des raisons de précision, il est nécessaire de différencier deux types de captage de l'eau, tels qu'ils sont traités dans le présent document :

- Captage spécifique ;
- Captage longitudinal.

On entend par captage spécifique la collecte de l'eau à la sortie de chaque source, et par captage longitudinal la capture de l'eau dans les canaux de drainage.

Dans le captage spécifique, on distingue les captages mineurs et les captages majeurs. Les captages mineurs sont ceux qui, en raison du volume à traiter, sont installés à la sortie de chaque source. Les captages majeurs sont ceux du tronçon de la confluence où les ouvrages sont plus importants, l'objectif étant de collecter l'eau qui s'écoule vers ce point en provenance des canaux nord et sud.

#### 6.1.2. Captages spécifiques mineurs

Selon la méthode utilisée dans la présente étude, 138 sources ont été recensées (SENAMHI-DIREMAR, 2018).

Afin d'optimiser la collecte de la totalité de l'écoulement de chaque source, en particulier des sources les plus productives, on a construit des structures hydrauliques de petites dimensions composées de parois en béton ou en pierres assemblées. A la sortie de ces petits captages se trouvent les canaux secondaires du réseau de drainage. Ces ouvrages de captage d'eau remplissent également la fonction de chenalisation de l'eau qui émerge.



a) Catchment work without protection to collect water from the spring.



b) Catchment work with protection to collect water from the spring.

**Figure 64**  
**Captage de l'eau provenant des sources**

#### Légende :

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a) Catchment work without protection to collect water from the spring | = | a) Ouvrage de captage sans protection pour collecter l'eau provenant de la source |
| b) Catchment work with protection to collect water from the spring    | = | b) Ouvrage de captage avec protection pour collecter l'eau provenant de la source |

64

Les inspections menées sur le terrain montrent qu'il y a un ouvrage de collecte ou de captage d'eau pour presque chacun des trous d'eau les plus productifs, et que ces ouvrages sont correctement protégés. La photographie de la figure 64a montre un ouvrage de captage non protégé sur la source 47, tandis que la figure 64b montre une protection plus élaborée. La différence s'explique par le fait qu'une protection plus importante est prévue pour les sources d'où émerge un écoulement plus important.

### 6.1.3. Ouvrages de captage longitudinal

Les canaux ont été construits en pierres sèches ou simplement creusés dans le sol naturel afin de former des sections transversales de forme presque rectangulaire. Comme on l'a vu précédemment, les dimensions des canaux varient.

Il est possible de qualifier les canaux selon leur mode de construction et leurs dimensions, leur largeur et leur profondeur étant très variables tant dans le *bofedal* sud que dans le *bofedal* nord (voir la figure 65a et les figures 66a et 66b respectivement).



a) Average canal without lining in the South Bofedal.      b) Average Canal with lining in the North Bofedal.

**Figure 65**

### Canaux de captage longitudinal avec revêtement de pierres

Légende :

- |  |   |   |
|--|---|---|
| a) Average canal without lining in the South Bofedal | = | a) Canal type sans revêtement dans le <i>bofedal</i> sud  |
| b) Average canal with lining in the North Bofedal    | = | b) Canal type avec revêtement dans le <i>bofedal</i> nord |

Les canaux des *bofedales* nord et sud ont des caractéristiques différentes, la principale étant que certains tronçons sont recouverts tandis que d'autres ne le sont pas. Les figures 65 et 66 présentent un canal de chaque *bofedal* ayant subi une intervention similaire. Celui de la figure 65 n'a pas de revêtement tandis que celui de la figure 66 est recouvert de pierres sèches. Il n'y a sur les canaux ni béton ni liant qui rendrait imperméable l'assemblage de pierres.

65



a) Average canal without lining in the North Bofedal.      b) Average canal with lining in the North Bofedal.

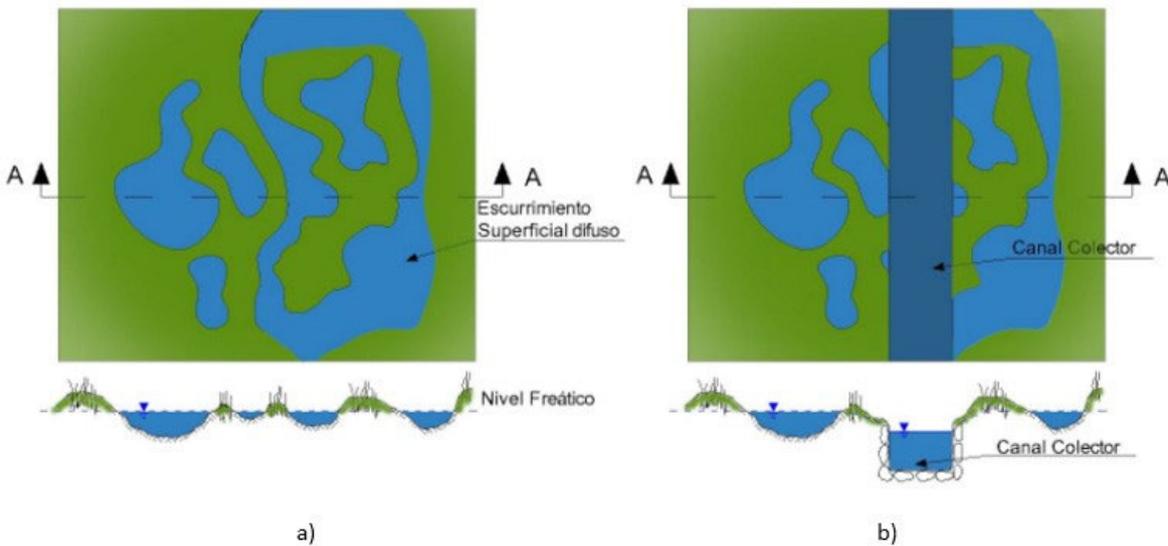
**Figure 66**

**Canaux types du *bofedal* nord**

Légende :

- a) Average canal without lining in the North Bofedal      =      a) Canal type sans revêtement dans le *bofedal* nord
- b) Average canal with lining in the North Bofedal      =      b) Canal type avec revêtement dans le *bofedal* nord

Ainsi qu'il a été dit, il est attesté que les ouvrages de captage longitudinal collectent sur toute leur longueur l'eau de manière longitudinale, comme illustré à la figure 67, à mesure que celle-ci coule à travers les parois perméables. Cela a pour effet d'abaisser le niveau de l'eau auparavant émergente (voir figure 68). Cette déclivité dirige l'écoulement des *bofedales* vers les canaux ; de cette manière, il est possible de drainer les masses d'eau situées dans les *bofedales* (voir canaux similaires de la figure 70 à la figure 72).

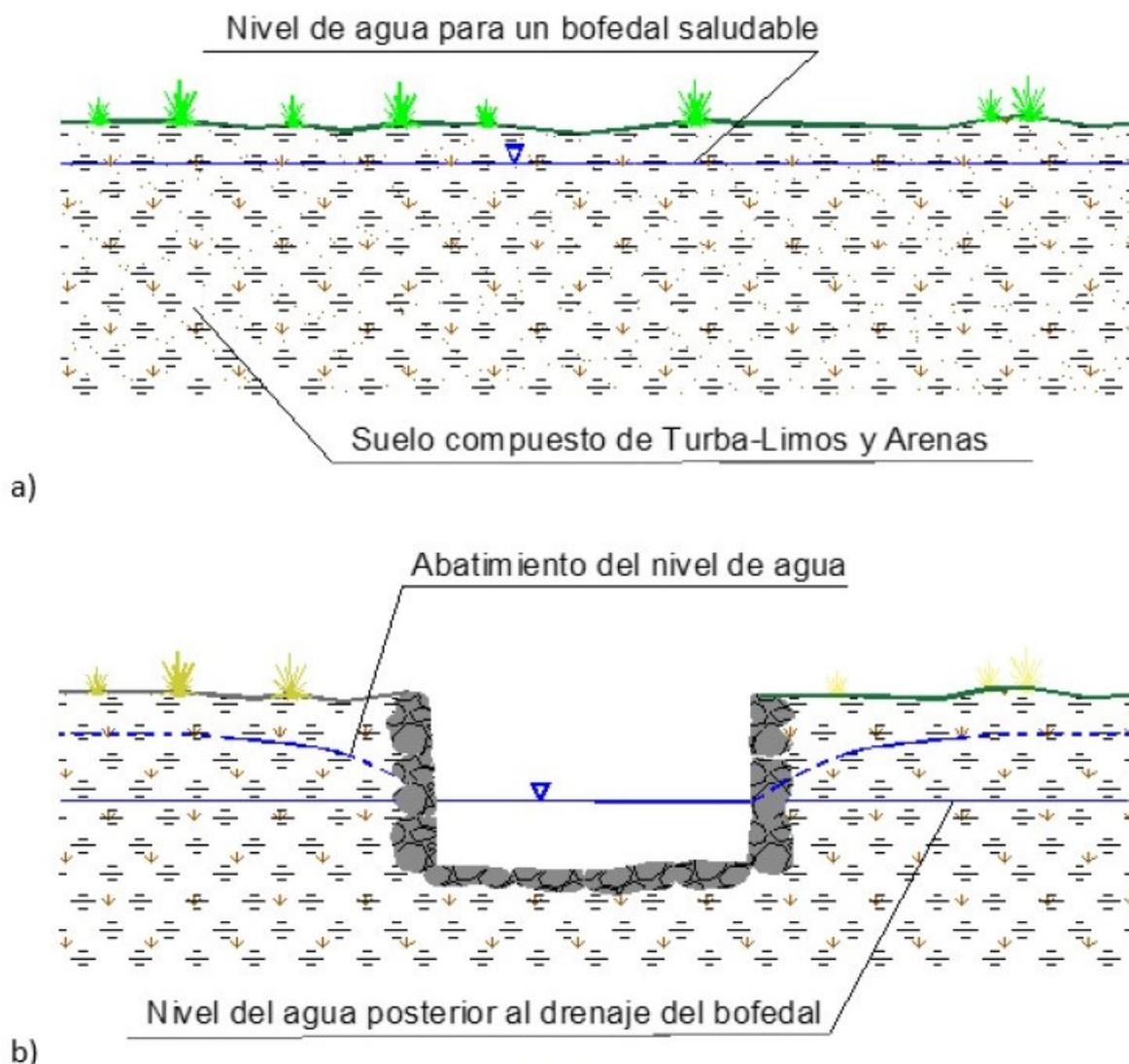


**Figure 67**

**Masse d'eau de zone humide a) à l'état naturel et b) après intervention**

Le drainage des masses d'eau se fait à la fois dans les canaux principaux et dans les canaux secondaires.

66



**Figure 68**  
**Captage de l'eau dans les bofedales, a) avant la construction des canaux**  
**et b) après la construction des canaux**

Les canaux principaux collectent l'eau que leur apportent les canaux secondaires. Le tracé de ces canaux passe par les points les plus bas du terrain : en le superposant à la topographie, on constate qu'il est linéaire et qu'il suit les pentes mêmes du terrain, les projets de drainage étant réalisés sur des routes ou des terrains agricoles. Cela a été observé et vérifié sur les plans topographiques ; la construction montre que non seulement les sources ont été drainées, mais également les *bofedales*.

67

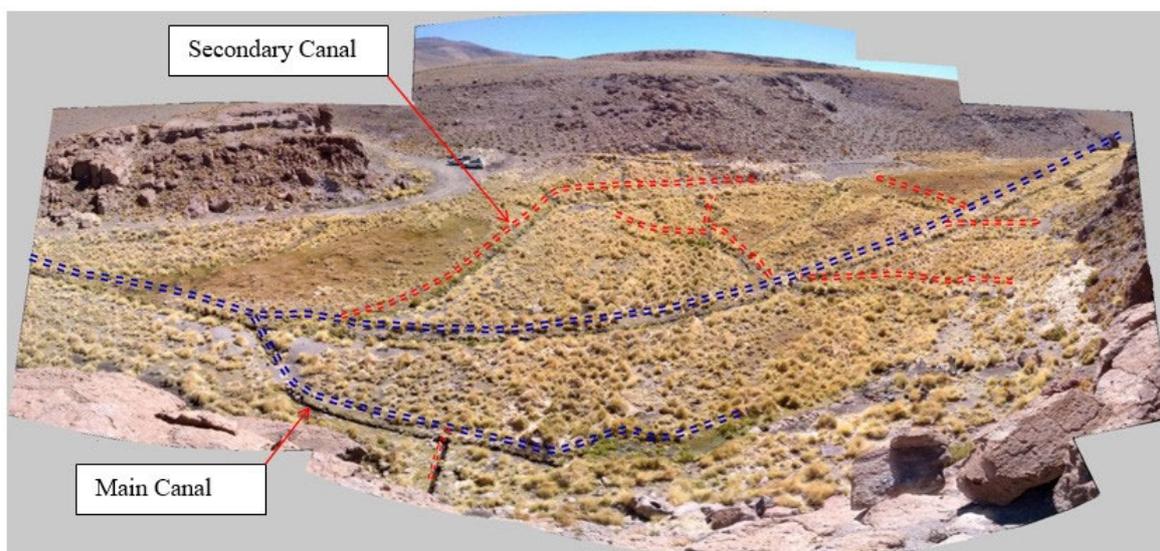


Figure 69

**Disposition du canal principal et des canaux secondaires dans le *bofedal* nord**

Légende :

Secondary canal

= Canal secondaire

Main canal

= Canal principal



a) Main canal in the South Bofedal.



b) Secondary canal in the South Bofedal.

Figure 70

**Canal principal et canaux secondaires dans le *bofedal* sud**

Légende :

a) Main canal in the South Bofedal

= a) Canal principal du *bofedal* sud

b) Secondary canal in the South Bofedal

= b) Canal secondaire du *bofedal* sud

68



a) Main canal in the North Bofedal.



b) Secondary canal in the North Bofedal.

**Figure 71**

**Canal principal et canaux secondaires dans le *bofedal* nord**

Légende :

a) Main canal in the North Bofedal

b) Secondary canal in the North Bofedal

= a) Canal principal du *bofedal* nord

= b) Canal secondaire du *bofedal* nord



**Figure 72**

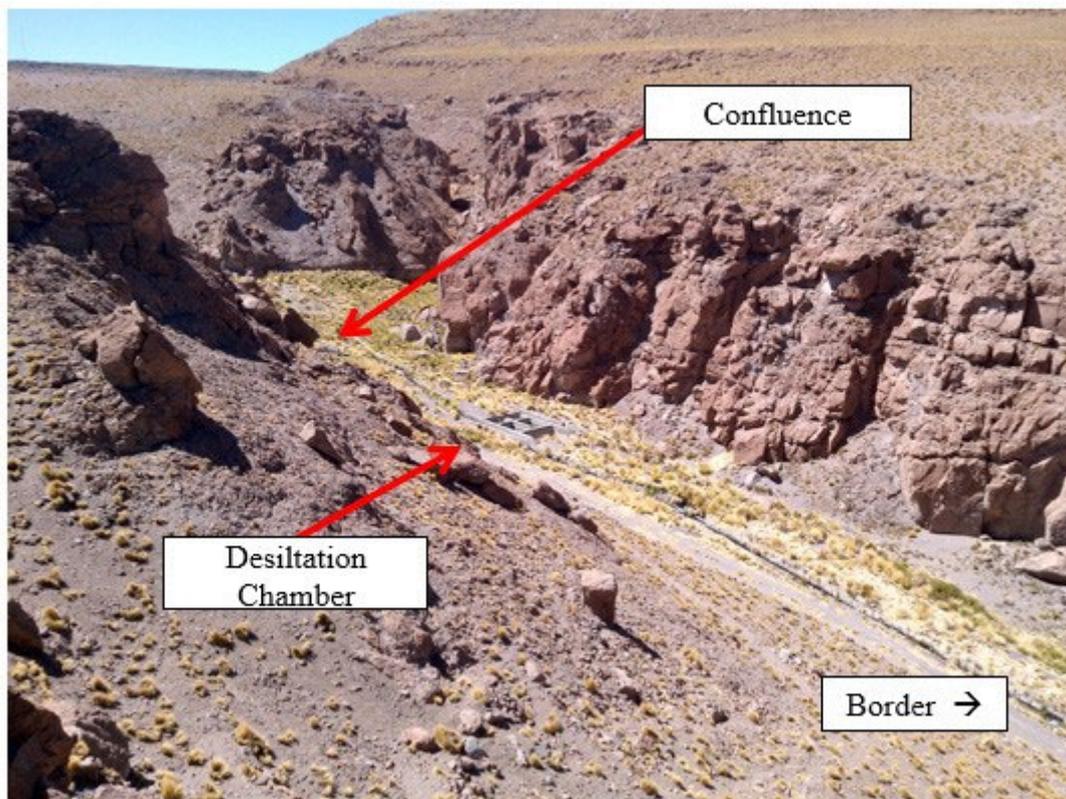
**Vue panoramique où l'on distingue le canal principal du *bofedal* nord**

69

**6.1.4. Captage spécifique majeur**

L'ouvrage de captage spécifique le plus important se trouve au début du tronçon de la confluence ; il est construit en béton. Il avait pour fonction de collecter l'écoulement en provenance du canal principal de la confluence. Il comprend des canaux collecteurs et un bassin de chargement pour l'adduction de l'eau au moyen de canalisations en acier.

L'ouvrage de captage d'eau se trouve à quelques mètres en dessous du point de confluence des canaux des *bofedales* sud et nord (voir figure 73). Il avait également pour fonction de retenir les sédiments fins, comme en témoignent sa configuration et sa structure conçues à cet effet, ce qui semble indiquer qu'une certaine forme de transport solide s'est produite à une époque donnée, en conséquence des ouvrages de chenalisation. Cependant, faute d'informations suffisantes, il n'est pas possible aujourd'hui de définir précisément cette fonction, d'autant que dans la partie supérieure il n'y a aucune trace d'un transport solide.



**Figure 73**  
**Ouvrage de captage d'eau avec bassin de désensablement et bassin de chargement à proximité de la frontière**

Légende :

Confluence	=	Confluence
Desiltation chamber	=	Bassin de désensablement
Border	=	Frontière

L'ouvrage de captage d'eau avec son bassin de désensablement (figure 74a) font aussi office de bassin de chargement (comme observé sur la figure 74b), comme le montre le raccordement à deux canalisations en acier partant de l'intérieur de l'ouvrage.

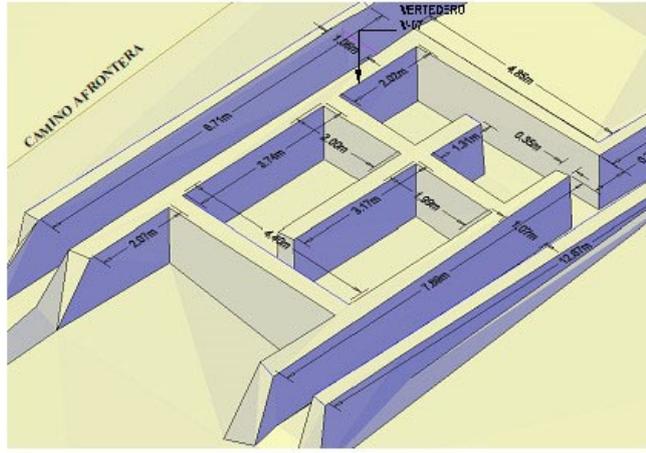
Comme on l'a vu, les ouvrages de captage à la frontière collectent l'eau provenant d'un canal sur la rive gauche ; l'écoulement est collecté par élévation du niveau de l'eau puis passe par plusieurs pentes, ce qui a pour effet de provoquer le dépôt des particules solides qui sont dirigées vers un réservoir raccordé à deux canalisations de diamètre de 10" et 12".

Actuellement, le canal de sortie de l'ouvrage de captage, situé sur la rive gauche, n'est plus utilisé et a été enterré.

70



a) Desiltation chamber and loading chamber near the Border with Chile.



b) Dimensions of elements of the water intake work.

**Figure 74**  
**Ouvrage de captage d'eau (DIREMAR)**

Légende :

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a) Desiltation chamber and loading chamber near the Border with Chile | = | a) Bassin de désensablement et bassin de chargement à proximité de la frontière avec le Chili |
| b) Dimensions of elements of the water intake work                    | = | b) Dimensions des éléments de l'ouvrage de captage d'eau                                      |

**6.1.5. Adduction**

Bien que les canaux de drainage aient pour fonction de collecter et de chenaliser l'eau, la présente analyse ne les considère pas comme des ouvrages d'adduction. Si nous avons parlé précédemment d'adduction, c'était uniquement pour faire référence aux canalisations sortant de l'ouvrage majeur. Il existe trois types d'adduction : 1) celle qui provient des sources afin de chenaliser l'eau vers les canaux principaux des *bofedales* ; 2) celle effectuée par les canaux principaux qui collectent l'eau drainée dans les *bofedales* et 3) celle effectuée par le canal collecteur final ou canal de sortie vers la frontière.

## 7. DESCRIPTION DU PROCESSUS DE TRANSPORT SOLIDE

Le transport solide n'est pas analysé ici sur la base de mesures effectuées sur le terrain puisque, selon les débits mesurés, ce phénomène ne se produit pas dans les canaux du Silala.

La description du processus de transport solide repose sur des preuves recueillies sur le terrain et sur les résultats de l'analyse de la qualité de l'eau réalisée par le DIREMAR. Les inspections sur le terrain prennent en compte deux éléments principaux :

- Les processus liés à l'érosion laminaire.
- Le transport solide dans les canaux.

### 7.1. Processus liés à l'érosion laminaire

L'analyse porte sur la totalité du bassin, l'objectif étant de trouver des traces d'érosion laminaire causée par un agent atmosphérique, les précipitations ou le vent.

L'inspection sur le terrain montre que la topographie et la surface sont hautement sensibles à l'érosion de l'eau mais, du fait que les précipitations ressemblent à de la neige, il n'y a pas d'érosion due à l'action de l'eau, bien que la surface du bassin soit constituée de sols désintégrés hautement susceptibles de s'éroder et de produire un déplacement de sédiments. En d'autres termes, on peut dire qu'il n'y a pas de traces de ruissellement causé par les précipitations comme cela se produirait dans un bassin présentant un excès de précipitations et une saturation des sols, c'est-à-dire qu'aucun tracé ne montre une concentration d'écoulement dans un réseau de drainage.

En conclusion, il n'y a pas ruissellement de surface susceptible de produire une érosion laminaire (voir figure 75).



Figure 75

Flanc de coteau du *bofedal* nord sans trace d'érosion

## 7.2. Transport solide dans les canaux

Lors de l'inspection sur le terrain, on a observé une absence de transport solide dans le fond des canaux, comme le montrent les photographies de la figure 76. Cette situation est confirmée par les enregistrements quotidiens du débit dans la période comprise entre décembre 2017 et mars 2018 ; le limnigramme des mesures montre clairement qu'il ne se produit aucun événement extrême, c'est-à-dire aucun événement lié à une tempête. Sur le limnigramme de la figure 77 on voit qu'il n'y a aucun pic pouvant indiquer une réponse hydrologique à des précipitations. Il a ainsi été démontré qu'il n'y a pas de transport dans le fond résultant des variations saisonnières.

Selon les investigations réalisées par les techniciens du SENAMHI qui mesurent le débit tous les mois, il existe une rétention de sédiments dans la partie antérieure de certains déversoirs.



a) Canal in the North Bofedal with sediments in the bottom without movement.



b) Canal in the South Bofedal with sediments in total rest.



a) Sediments on slopes of the South Bofedal (Site 2, Dm = 0.2 cm)



b) Sediments in the upper zone of the South Bofedal canal (Site 1, Dm = 0.3 cm)

**Figure 76**

### Sédiments dans les canaux et à flanc de coteau dans la partie supérieure des *bofedales*

Légende :

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a) Canal in the North Bofedal with sediments in the bottom without movement     | = | a) Canal du <i>bofedal</i> nord avec des sédiments déposés dans le fond qui ne se déplacent pas |
| b) Canal in the South Bofedal with sediments in total rest                      | = | b) Canal du <i>bofedal</i> sud avec des sédiments en repos total                                |
| c) Sediments on slopes of the South Bofedal (Site 2, Dm = 0.2 cm)               | = | c) Sédiments sur les pentes du <i>bofedal</i> sud (Site 2, dia. = 0,2 cm)                       |
| d) Sediments in the upper zone of the South Bofedal canal (Site 1, Dm = 0.3 cm) | = | d) Sédiments dans la partie supérieure du canal du <i>bofedal</i> sud (Site 1, dia. = 0,3 cm)   |

73

Le long des canaux, on observe que la configuration des particules posées dans le fond des canaux ne permet pas de confirmer la présence de particules sphériques, de pavés ou de rochers comme il en existe dans les canaux fluviaux.

Il est recommandé de réaliser une évaluation ou des études spécifiques fondées sur des mesures effectuées avec des pièges à sédiments. Au vu des informations actuellement disponibles sur les sédiments, il n'est pas possible de tirer des conclusions définitives.

Cependant, il y a des matières transportées en suspension. On le constate sur les fiches de qualité de l'eau renseignées lors de différentes campagnes, jointes à l'annexe 3.

Les résultats de l'analyse de la qualité de l'eau indiquent des concentrations de matières solides en suspension très faibles, voire nulles en certains points de mesure, avec une moyenne de 2,9 mg/l.

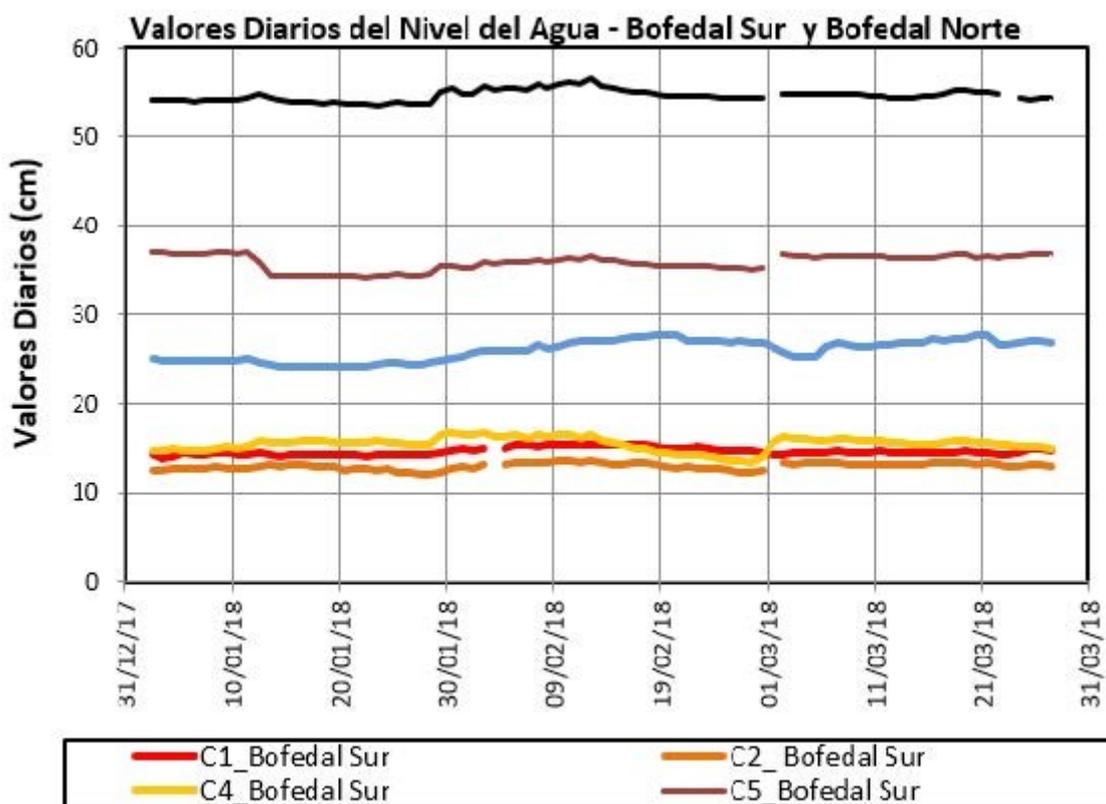


Figure 77  
Niveaux de l'eau dans les déversoirs C1 à C6 entre décembre 2017 et mars 2018

## 8. MODÉLISATION HYDRAULIQUE DE L'ÉCOULEMENT DE SURFACE DANS HEC-GEORAS

### 8.1. Objectif spécifique

La présente analyse hydraulique a pour objectif d'évaluer les conditions hydrodynamiques de l'écoulement ou du ruissellement en surface de l'eau dans le réseau de canaux du Silala. Elle vise également à évaluer l'impact des interventions artificielles (chenalisation pour capter et acheminer l'eau) — qui modifient le régime naturel de l'eau en surface et sous terre — sur les écoulements provenant des *bofedales*.

### 8.2. Modélisation hydraulique

Dans le réseau étudié, où les canaux sont majoritaires, un modèle mathématique a été renseigné au moyen du logiciel HEC-RAS Model (HEC-GeoRAS) et de ses modules de simulation hydraulique unidimensionnels et bidimensionnels qui fournissent les éléments hydrodynamiques, ou les variables, du système afin de définir le régime d'écoulement, la vitesse, les hauteurs d'eau, le nombre de Froude, la ligne de charge, etc.

Le logiciel HEC-RAS (River Analysis System) détermine les profils hydrauliques sur une base mathématique en utilisant les relations de l'hydrodynamique conventionnelle. Pour l'appliquer, il faut définir la surface du terrain à modéliser et les données de débit pour les événements ou les régimes hydrologiques. Les données géométriques et hydrométriques permettent de calculer le profil hydraulique d'un débit à variation graduelle à partir du calcul des pertes d'énergie. Le logiciel HEC-RAS permet de modéliser un réseau complet de canaux, des systèmes dendritiques ou une simple rivière (selon le niveau de détail des données disponibles, il peut être décidé de modéliser le réseau). Il faut renseigner dans le HEC-RAS des données géométriques pour représenter un réseau de canaux, des données sur les sections transversales. Depuis l'introduction de sa version 2.0, le HEC-RAS permet d'utiliser la géométrie tridimensionnelle pour décrire les réseaux et les sections transversales des écoulements. Les versions les plus récentes permettent l'extraction de la géométrie d'un modèle de terrain numérique au moyen d'une interface, ou l'extension vers des systèmes d'information géographique (ArcGIS).

Le modèle utilise les données géométriques des sections transversales pour définir la capacité de transport du canal (zone hydraulique efficace) et ses caractéristiques géomorphologiques. Les paramètres suivants doivent être saisis :

- La morphométrie du canal, qui représente la surface et son emplacement dans le secteur à modéliser (tronçon). Cette valeur géométrique est acquise au moyen des sections transversales perpendiculaires au sens de l'écoulement du canal principal (données de section transversale). Les portions de l'axe du canal principal (canal) sont définies avec celles du bord de la zone d'écoulement (rives), afin de faciliter la définition de la capacité de charge hydraulique de l'écoulement.
- Les distances longitudinales du canal entre les sections transversales (longueurs de tronçon), qui permettent de calculer la perte d'énergie se produisant dans chaque tronçon entre deux sections transversales. Ces distances doivent être mesurées à partir des rives ou berges gauche et droite et à partir de l'axe du canal principal.
- Le coefficient de rugosité, dit «coefficient de Manning» ( $n$ ), qui intervient dans le calcul des pertes d'énergie engendrées par le frottement de l'eau sur la surface du lit et des berges. Il est calculé pour chaque tronçon entre deux sections transversales et par type de matériau présent dans le lit et sur les parois du canal.

- 75 — Les coefficients de retrait et de dilatation, qui dépendent des caractéristiques des canaux et des modifications qu'ils ont subies.

Le logiciel HEC-RAS peut calculer les paramètres hydrauliques d'une rivière par simulation de son comportement avec les structures existantes.

S'agissant de la situation à l'examen, dans laquelle l'évolution temporelle n'est pas un facteur pertinent et l'écoulement est essentiellement unidimensionnel, ce modèle suffit, même si la modélisation a été réalisée en bidimensionnel. Ces types de modèles sont basés sur des schémas numériques relativement simples mais efficaces. Dans la modélisation mathématique, l'équation fondamentale est celle de la conservation de l'énergie entre deux sections, même si l'on peut aussi utiliser celle de la conservation de la quantité de mouvement pour les phénomènes locaux, tels que les modifications de régime, ainsi que d'autres équations plus ou moins empiriques pour d'autres effets locaux.

### 8.3. Méthodologie

Pour procéder à l'analyse hydrodynamique de l'écoulement du réseau de canaux par modélisation et simulation mathématique, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Collecte des données topographiques détaillées (altimétrie), des images satellite et des photos aériennes numériques fournies par le DIREMAR, au format .dwg pour Civil 3D comme modèle de surface et pour Autocad avec le détail des contours et des planimètres, tels que les canaux, les surfaces des *bofedales*, les infrastructures, les conduits, les routes, etc.
- Collecte et révision des documents de référence antérieurs concernant la zone étudiée ou des réseaux hydrologiques similaires.
- Relevé topographique par stations totales pour chaque point ou section de mesure concernés.
- A partir de la topographie détaillée, élaboration des modèles numériques d'élévation ou de terrain (DEM) dans le système d'information géographique ArcGIS, sous forme de tableaux ou au format TIN. Pour décrire au mieux la configuration de la surface du terrain, le modèle a une résolution de  $20 \times 20$  cm.
- Reproduction de la géométrie du réseau de canaux dans HEC GEO-RAS qui fonctionne en interface avec ArcGIS et génère la géométrie à exporter d'un DEM vers HEC-RAS. Des sections transversales ont été définies tous les 10 mètres afin d'obtenir une vision plus détaillée des conditions hydrauliques par section.
- Paramétrage et estimation des paramètres hydrauliques (pentes, coefficients de rugosité de Manning) sur la base des informations hydrométriques fournies par le SENAMHI par l'intermédiaire du DIREMAR pour traitement et gestion (courbes d'étalonnage).
- Définition du scénario hydrologique (débit) sur la base des données hydrométriques disponibles (niveaux et mesures) fournies par le SENAMHI par l'intermédiaire du DIREMAR.
- Paramétrage des conditions hydrauliques simulées, par sections, nœuds ou confluences.
- Ajustement des données pour obtenir une simulation optimale du modèle mathématique du réseau de drainage du Silala dans HEC-RAS.
- Simulation hydraulique du scénario de base.

— Présentation des résultats et évaluation.

76

#### 8.4. Géométrie du réseau hydrologique

La configuration et la longueur du réseau sont fonctions de l'importance des écoulements entrants et des principaux apports d'eau dans les zones de *bofedales* au niveau des eaux supérieures et des sources.

Une carte topographique détaillée avec les courbes de niveau a été établie, voir figure 78.

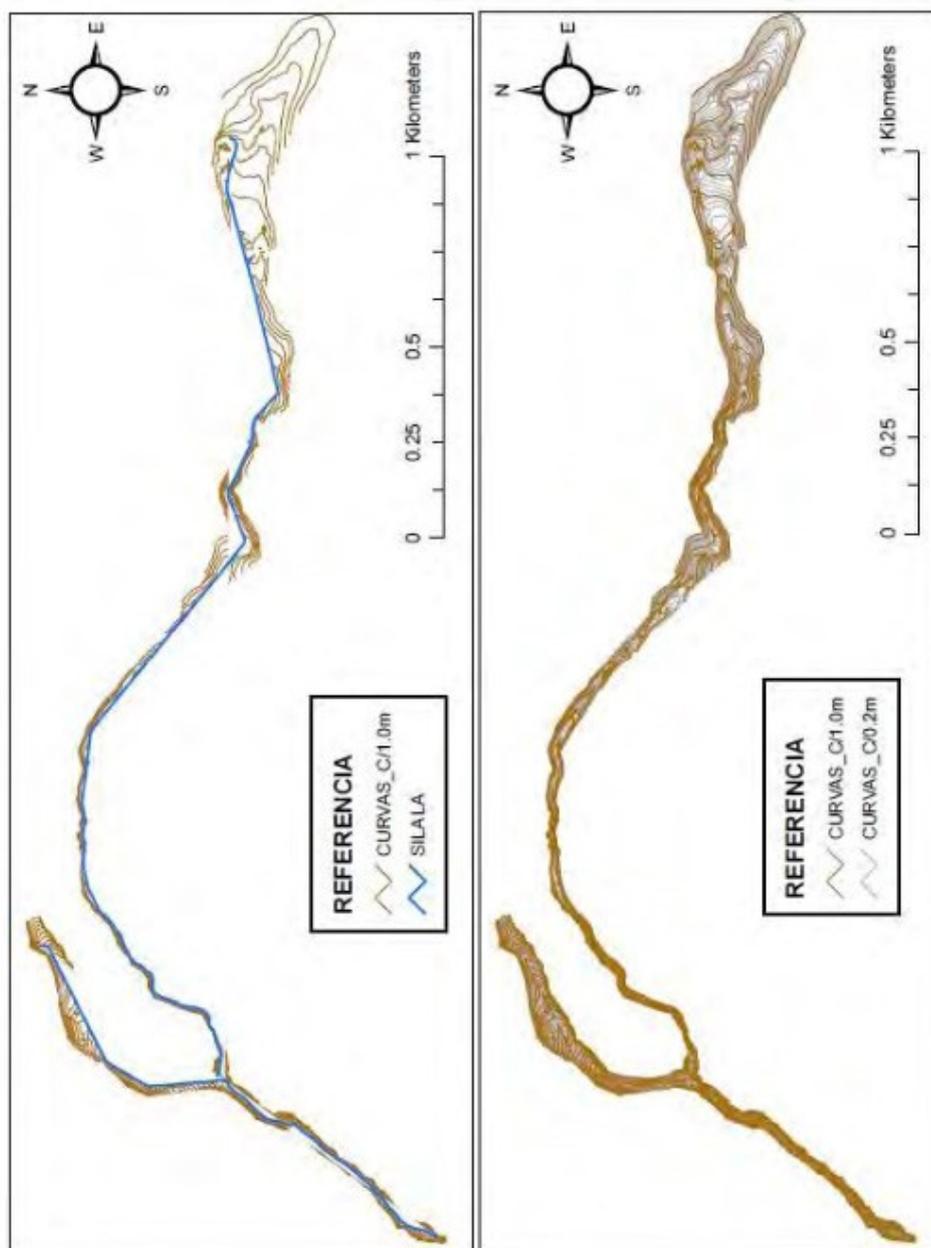
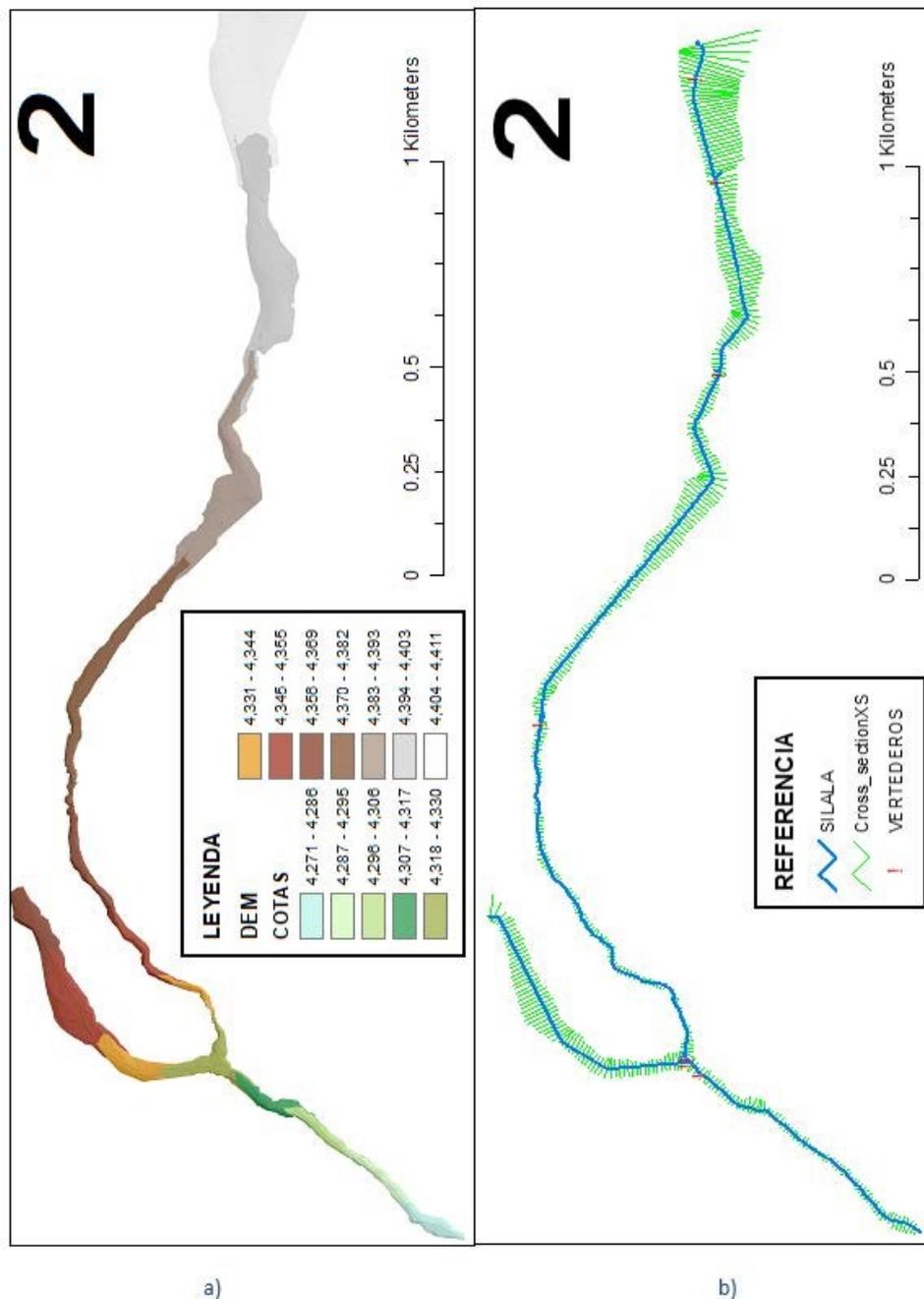


Figure 78

Carte de l'étude topographique avec courbes de niveau tous les mètres et tous les 20 cm (création interne selon la topographie fournie par le DIREMAR)

77

Un modèle de terrain numérique a ensuite été élaboré (figure 79), une vue en trois dimensions du système hydraulique a été générée pour être traitée dans ArcGIS HEC-GEORAS puis importée dans HEC-RAS.



**Figure 79**  
**Carte du modèle de terrain numérique et génération du modèle géométrique dans ArcGIS**  
**(création interne selon la topographie fournie par le DIREMAR)**

78

La figure 80 montre la géométrie du modèle HEC-RAS avec ses sections transversales et les résultats de l'écoulement de la simulation hydraulique. La figure 81 montre le réseau des canaux en perspective et le modèle 3D dans le logiciel HEC-RAS, ainsi que l'emplacement des sections transversales. Le réseau a été divisé en trois axes ou sections :

- Section du Silala sud. Tronçon long qui s'étend principalement d'est en ouest.
- Section du Silala nord. Tronçon court qui s'étend principalement du nord-est vers le sud-ouest.

- Section de la confluence. Confluence des tronçons nord et sud qui s'étend principalement du nord-est vers le sud-ouest.

79

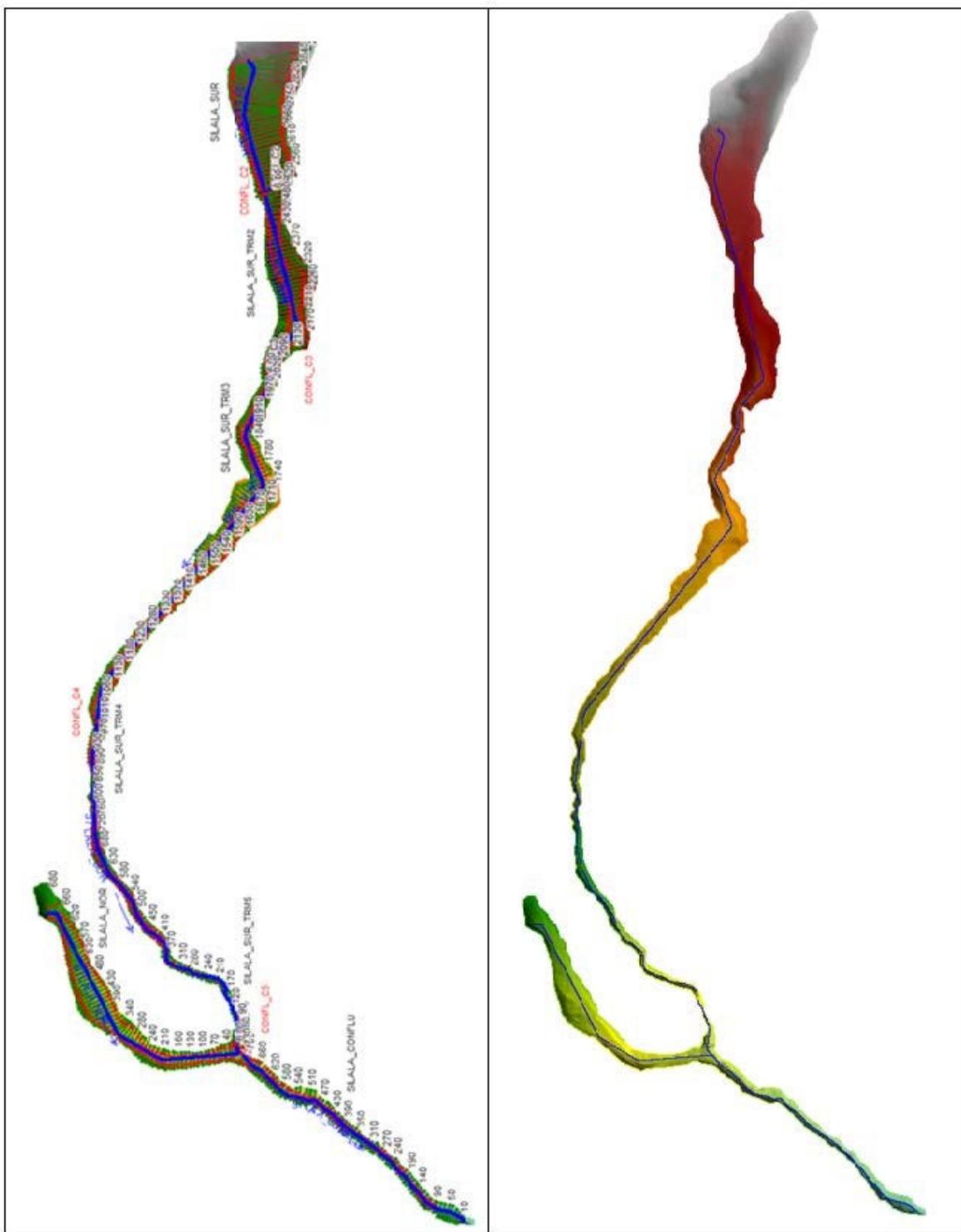


Figure 80  
Géométrie dans le modèle HEC-RAS (modèle d'élévation numérique – Digital Elevation Model (DEM)), points d'emplacement des électrodes, sections transversales)  
(création interne selon la topographie fournie par le DIREMAR)

80

L'annexe 2 présente la géométrie détaillée des trois tronçons (nord, sud et confluence).

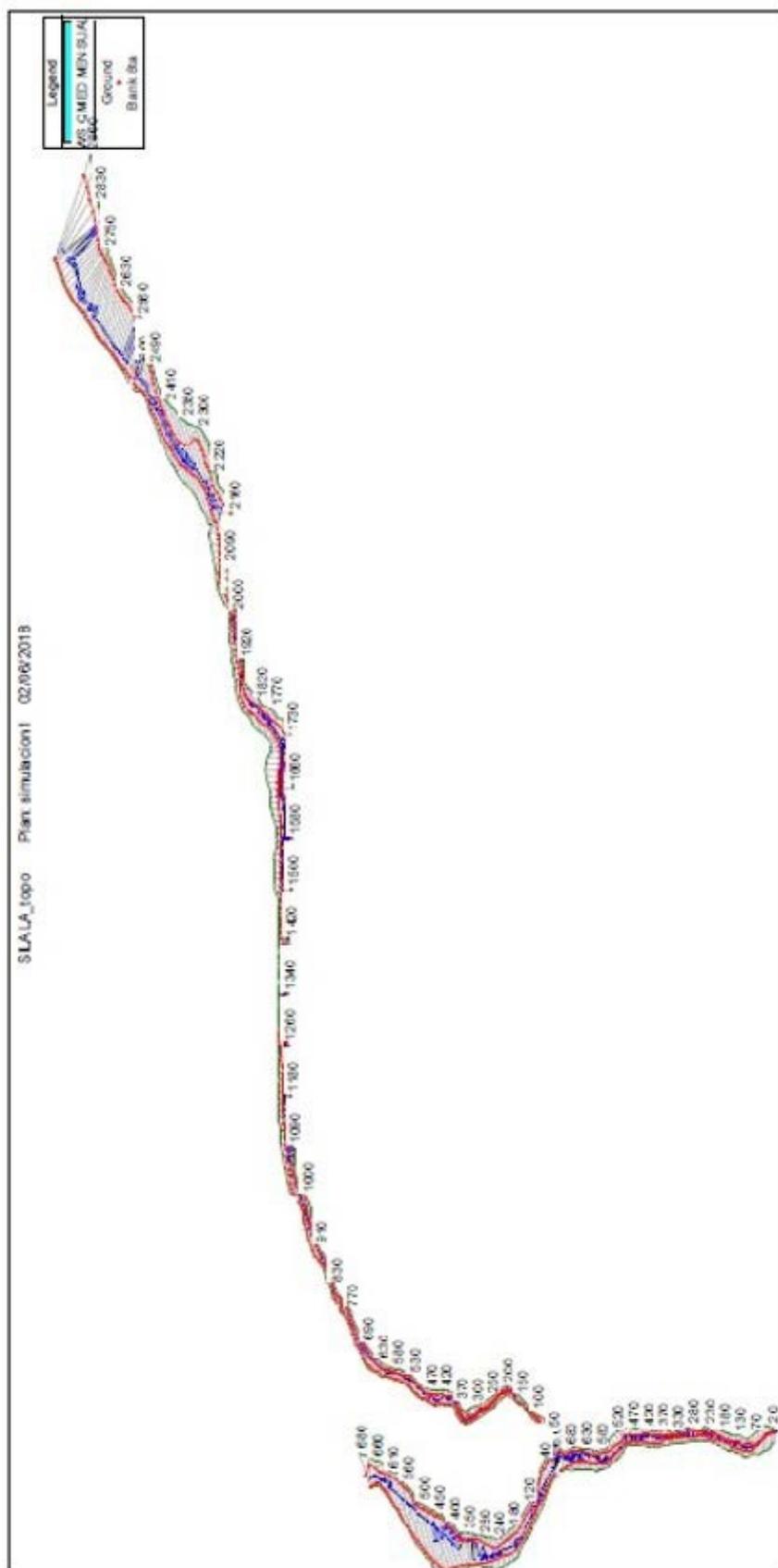
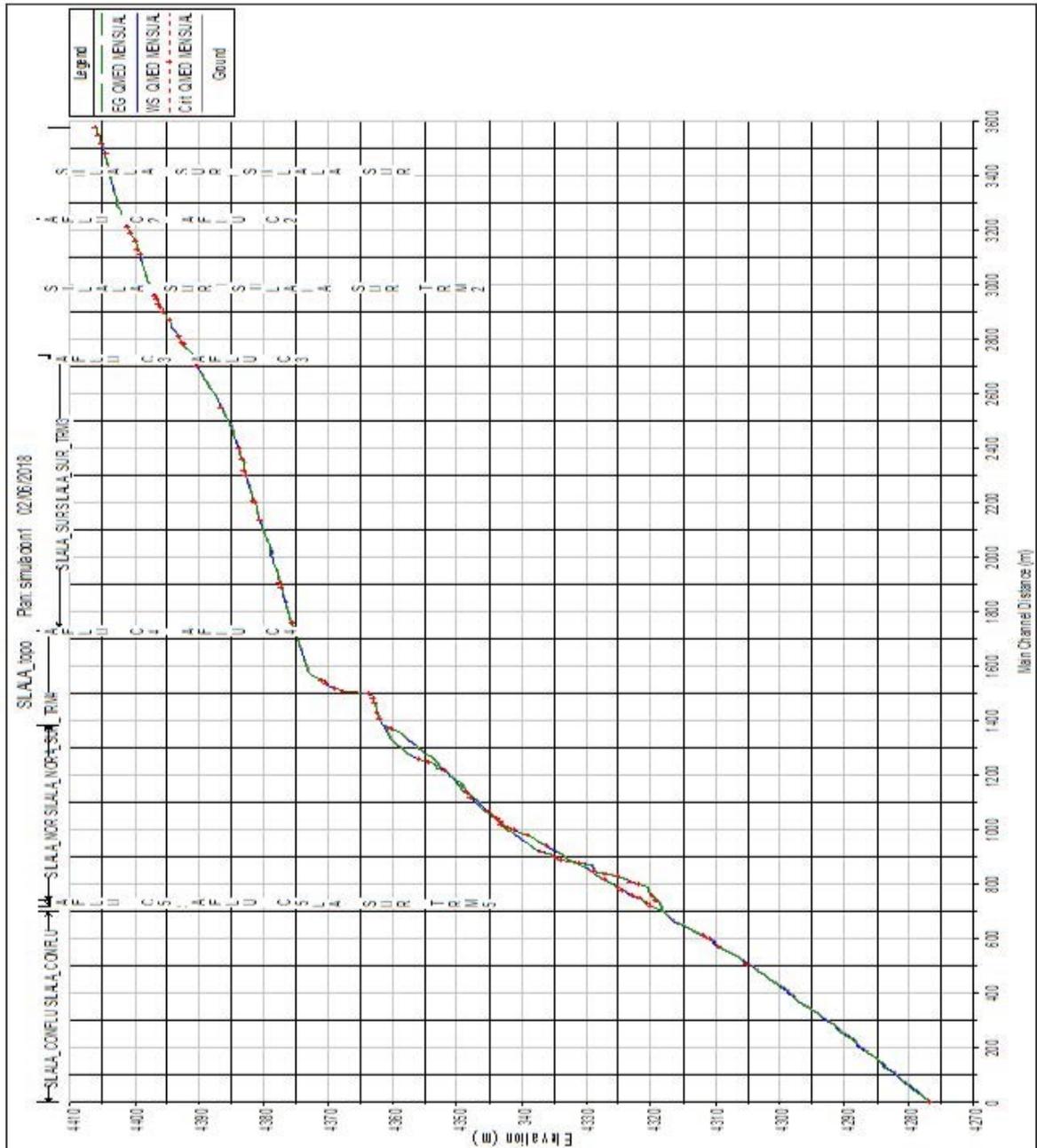


Figure 81

Géométrie dans le modèle HEC-RAS (perspective, sections transversales) (création interne)

### 8.5. Gradient du système de drainage

Le gradient est capital pour les conditions hydrauliques en ce qu'il détermine le régime d'écoulement dans le canal, où sont définis les flux critiques, subcritiques et supercritiques. Le gradient peut être tiré du modèle géométrique, de la topographie ou du modèle d'élévation numérique.



**Figure 82**  
**Profil longitudinal du cours principal (création interne)**

Les gradients les plus faibles du système se trouvent dans la partie la plus haute du tronçon sud (points d'emplacement des électrodes 3+600 m à 1+600 m) du réseau Silala ; les gradients augmentent ensuite au fur et à mesure du tracé dans le restant du tronçon sud (points d'emplacement des électrodes 1+600 m à 0+00 m) et plus particulièrement dans le tronçon nord et celui de la confluence. La pente varie de 0,012 m/m à 0,062 m/m.

**82**

Le détail des profils longitudinaux et hydrauliques est présenté pour les trois tronçons (nord, sud et confluence) dans l'annexe 2.

### **8.6. Coefficient de Manning (n)**

Ce coefficient indique le degré de résistance à l'écoulement produit par les parois du canal et dépend de la surface et de la formation des matériaux.

Dans le réseau de canaux sans revêtement de pierres, les matériaux prédominants sont les tourbes, les matériaux de haute altitude et les zones saturées. Dans le réseau de canaux avec revêtement de pierres, on trouve des matériaux rigides, rugueux et solides dans lesquels la variation du niveau d'eau est faible, ce qui explique la lenteur estimée de l'écoulement (régime subcritique). Selon ces caractéristiques, le coefficient de rugosité est élevé et varie entre 0,06 et 0,25.

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<b>Excavado o dragado</b>			
a. En tierra, recto y uniforme			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b. En tierra, serpenteante y lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c. Excavado con pala dragado			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
d. Cortes en roca			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.0356	0.040	0.050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin costar			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
<b>Corrientes naturales</b>			
I- Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente $100 <$ pies)			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con mas piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones mas ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con mas piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con mucha maleza, pozos profundos o canales de crecientes con muchos arboles con matorrales bajos.	0.075	0.100	0.150

Tableau 7  
Valeurs de référence du coefficient de rugosité de Manning (Ven Te Chow)

83

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: Gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: Cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
2- Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales disperses, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual al anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas.	0.080	0.10	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
3- Corrientes mayores (ancho superficial en nivel creciente > 100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	---	0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035	---	0.100

Tableau 8  
Valeurs de référence du coefficient de rugosité de Manning (suite) (Ven Te Chow)

### 8.7. Scénario hydrologique du réseau

La création du scénario hydrologique du réseau à utiliser pour l'analyse hydrologique et l'évaluation de l'écoulement de surface suppose d'analyser et de traiter les données hydrométriques (niveaux limnimétriques et mesures dans les canaux) pour obtenir une série de valeurs de débits de simulation et de moyennes mensuelles (voir tableau 9, tableau 10 et figure 83). Le régime hydrologique montre que la variabilité mensuelle et saisonnière n'est pas significative, ce qui veut

dire que les variations et amplitudes ne sont pas liées à la saison des pluies et à la saison sèche mais restent plutôt stables tout au long de l'année avec des amplitudes très faibles.

84

Le débit du réseau détermine la profondeur d'écoulement nécessaire pour un débit déterminé, en plus d'autres paramètres hydrodynamiques du milieu dans lequel l'eau circule.

Codigo Punto	Punto de Aforo	CAUDAL	
		[l/s]	[m3/s]
C1	Aforo en el punto C-1 canal sur	26.25	0.0263
C2	Aforo en el punto C-2 canal sur	33.94	0.0339
C3	Aforo en el punto C-3 canal sur	34.14	0.0341
C4	Aforo en el punto C-4 canal sur	52.09	0.0521
C5	Aforo en el punto C-5 canal sur	94.20	0.0942
C6	Aforo en el punto C-6 canal norte	52.06	0.0521
C7	Aforo en el punto C-7 canal principal	134.31	0.1343

**Tableau 9**  
**Écoulements moyens incrémentiels mesurés aux points de mesure en continu «C»**  
**(création interne selon les données du SENAMHI)**

Dans la présente étude, l'écoulement de surface du réseau dans le scénario hydrologique à débit moyen a été simulé pour la période avec des données disponibles, sur la base des informations fournies par le SENAMHI par l'intermédiaire du DIREMAR et du traitement et de l'analyse des dites données.

POINT CODE	INCREMENTAL FLOW PER REACH	FLOW	
		[l/s]	[m3/s]
C1	Q c1	26.25	0.0263
C2	$\Delta Qc2 = Q c2 - Q c1$	7.69	0.0077
C3	$\Delta Qc3 = Q c3 - Q c2$	0.20	0.0002
C4	$\Delta Qc4 = Q c4 - Q c3$	17.95	0.0180
C5	$\Delta Qc5 = Q c5 - Q c4$	42.11	0.0421
C6	Qc6	52.06	0.0521
C7	$\Delta Qc7 = Q c7 - Q c6 - Qc5$	11.95	0.0120

**Tableau 10**  
**Écoulements incrémentiels moyens mesurés aux points de mesure en continu «C»**  
**(création interne selon les données du SENAMHI)**

Légende :

Point code = Code du point  
 Incremental flow per reach = Écoulement incrémentiel par tronçon  
 Flow = Débit

La figure 83 montre la répartition spatiale des points de mesure en continu surveillés par le SENAMHI. Le schéma montre les points de mesure à partir desquels ont été obtenus les écoulements incrémentiels. Le tableau 10 présente les écoulements incrémentiels et leur calcul pour l'application des scénarios de modélisation par tronçon.

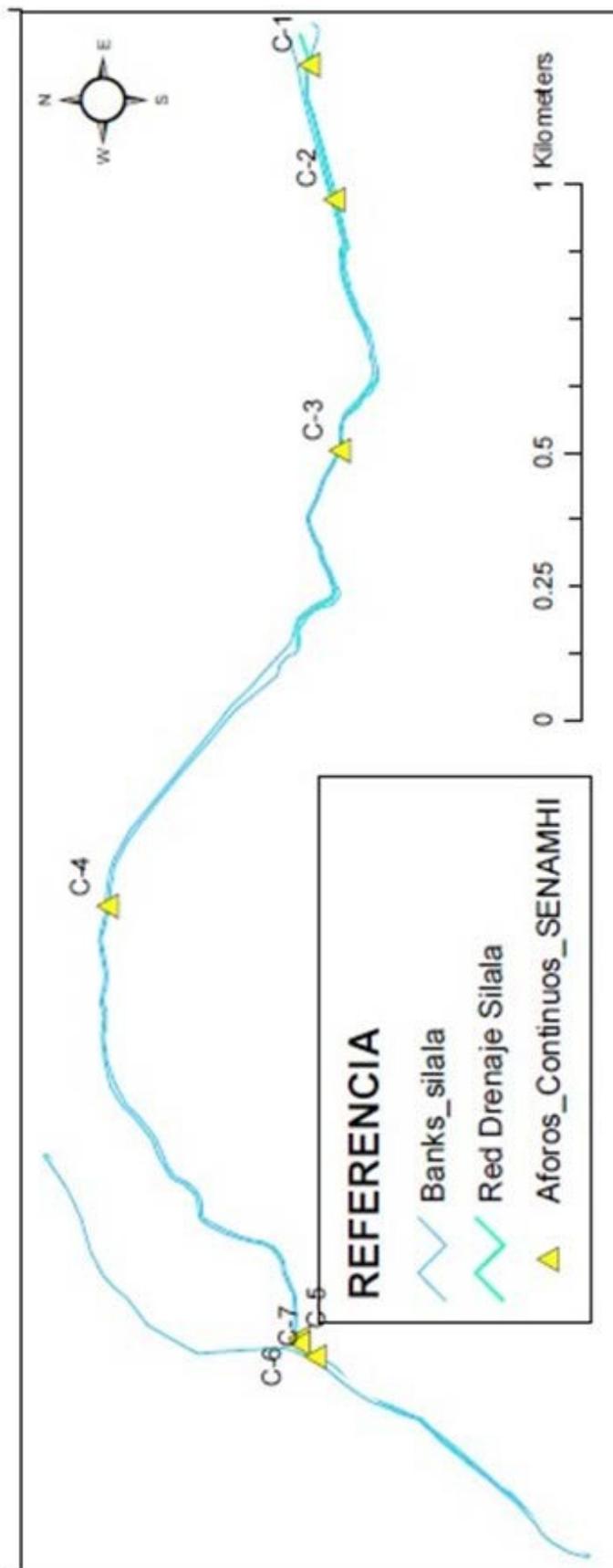


Figure 83  
Système hydraulique du Silala et points de mesure en continu surveillés par le SENAMHI

### 8.8. Régime hydraulique de l'écoulement

Le régime hydraulique de l'écoulement a été calculé avec le nombre de Froude qui détermine si le régime est subcritique, supercritique ou critique ( $Fr < 1$ ,  $Fr > 1$ ,  $Fr = 1$ ), au moyen du logiciel de simulation de l'écoulement de surface HEC-RAS. Le nombre de Froude a été calculé pour chaque point et les résultats sont indiqués à l'annexe 1. Ce tronçon a un régime essentiellement subcritique.

#### 8.8.1. Campagne de mesures d'avril 2018

L'objectif de la campagne de mesures était de déterminer les coefficients de rugosité de référence ainsi que les paramètres géométriques et hydrauliques pour calibrer le modèle.

Les mesures ont été effectuées sur 21 sections transversales du réseau de canaux, correspondant aux points de mesure du SENAMHI.

Le tableau 11 présente les résultats des 21 mesures : 18 points correspondent au canal principal et 3 points correspondent aux canaux secondaires.

Main canal denomination	Main Canal	Secondary Canal	Depth (m)	Water mirror (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Gradient (m/m)	Velocity (m/s)	Manning Roughness	Flow (m <sup>3</sup> /s)	Froude Number	Flow type	Horizontal alignment of the canal in point
South drainage canal	C1		0.18	0.81	0.140	0.0246	0.264	0.148	0.037	0.20	Subcritical	Straight canal
	S1		0.165	0.60	0.096	0.0123	0.302	0.084	0.029	0.24	Subcritical	Straight canal
	S2		0.15	1.10	0.147	0.0143	0.259	0.105	0.038	0.21	Subcritical	Straight canal
	C2		0.09	0.90	0.088	0.0430	0.443	0.086	0.039	0.47	Subcritical	Straight canal
	S6		0.13	1.20	0.138	0.0098	0.333	0.063	0.046	0.30	Subcritical	Straight canal
	C3		0.17	0.94	0.141	0.0325	0.298	0.144	0.042	0.23	Subcritical	Straight canal
	S7		0.11	1.00	0.101	0.0420	0.366	0.108	0.037	0.35	Subcritical	Straight canal
	S8		0.14	1.62	0.222	0.0224	0.206	0.175	0.046	0.18	Subcritical	Straight canal
	C4		0.12	0.90	0.100	0.0224	0.521	0.058	0.052	0.48	Subcritical	Straight canal
	S10		0.25	1.00	0.222	0.0624	0.509	0.142	0.113	0.33	Subcritical	Flow on rock with soft curve
	S11		0.29	0.96	0.246	0.0624	0.519	0.150	0.128	0.31	Subcritical	Flow on rock with soft curve
C5		0.19	0.60	0.096	0.0624	1.013	0.057	0.097	0.61	Subcritical	Flow on rock with soft curve	
North drainage canal		S18	0.07	0.36	0.024		0.103		0.002	0.12	Subcritical	Straight canal
		S17	0.09	0.45	0.036		0.915		0.033	0.97	Critical	Straight canal
		S16	0.12	0.44	0.046	0.0520	0.255	0.156	0.012	0.24	Subcritical	Straight canal
		S15	0.10	0.60	0.049	0.0520	0.756	0.055	0.037	0.76	Subcritical	Straight canal
		S13	0.12	0.60	0.081		0.786		0.064	0.72	Subcritical	Straight canal
		S12	0.15	0.55	0.074	0.0520	0.854	0.056	0.063	0.70	Subcritical	Straight canal
Confluence drainage canal		Desilting chamber	0.09	1.00	0.090		1.726		0.155	1.84	Subcritical	Straight canal
		C7	0.30	0.90	0.251	0.0624	0.748	0.104	0.187	0.44	Subcritical	Straight canal
		S19	0.33	0.85	0.266	0.0624	0.815	0.099	0.217	0.45	Subcritical	Straight canal

**Tableau 11**  
**Caractéristiques hydrauliques aux points de mesure de la campagne d'avril 2018**

Légende :

- Main canal denomination = Désignation du canal principal
- Main canal = Canal principal
- Secondary canal = Canal secondaire
- Depth (m) = Profondeur (m)
- Water mirror (m) = Miroir d'eau
- Area (m<sup>2</sup>) = Surface (m<sup>2</sup>)
- Gradient (m/m) = Gradient (m/m)
- Velocity (m/s) = Vitesse (m/s)

Manning Roughness	=	Coefficient de Manning
Flow (m <sup>3</sup> /s)	=	Débit (m <sup>3</sup> /s)
Froude number	=	Numéro de Froude
Flow type	=	Type de débit
Horizontal alignment of the canal in point	=	Tracé du canal au point
South drainage canal	=	Canal de drainage sud
North drainage canal	=	Canal de drainage nord
Confluence drainage canal	=	Canal de drainage de confluence
Desilting chamber	=	Bassin de désensablement
Subcritical	=	Subcritique
Critical	=	Critique
Straight canal	=	Canal rectiligne
Flow on rock with soft curve	=	Ecoulement sur des pierres avec courbe ample

87

### 8.9. Simulation hydraulique de l'écoulement de surface avec HEC-RAS

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de graphique pour :

- Les profils hydrauliques par tronçon ;
- Les profils de vitesses le long du tronçon ;
- Le profil longitudinal du nombre de Froude le long du tronçon ;
- Le profil longitudinal du gradient le long du tronçon ;
- Le profil longitudinal des profondeurs hydrauliques le long du tronçon.

Le logiciel HEC-RAS utilise les abréviations suivantes pour les paramètres :

Q Total :	Écoulement total
Min Ch El :	Altitude minimale dans le canal principal
W.S. Elev :	Hauteur de l'eau pelliculaire
Crit W.S :	Hauteur de l'eau pelliculaire en régime critique
E.G. Elev :	Hauteur de la ligne de charge
E.G. Slope :	Gradient de la ligne de charge
Vel Chnl :	Vitesse dans le canal principal
Flow Area :	Zone hydraulique
Top Width :	Largeur de l'eau pelliculaire
Froude # Chl :	Nombre de Froude
Vel Head :	Energie de la vitesse
Wetted Per :	Périmètre mouillé

Hydr. Depth : Profondeur hydraulique

Avg. Vel. : Vitesse moyenne

L'annexe 2 donne une présentation détaillée des profils hydrauliques et des sections transversales simulées pour le scénario hydraulique de base ; elle décrit les conditions géométriques et morphologiques pour les trois sections (nord, sud et confluence).

La figure 84 montre les résultats de la simulation dans RAS Mapper de HEC-RAS avec le modèle d'élevation numérique DEM et la surface de l'eau pelliculaire en bleu clair.

88

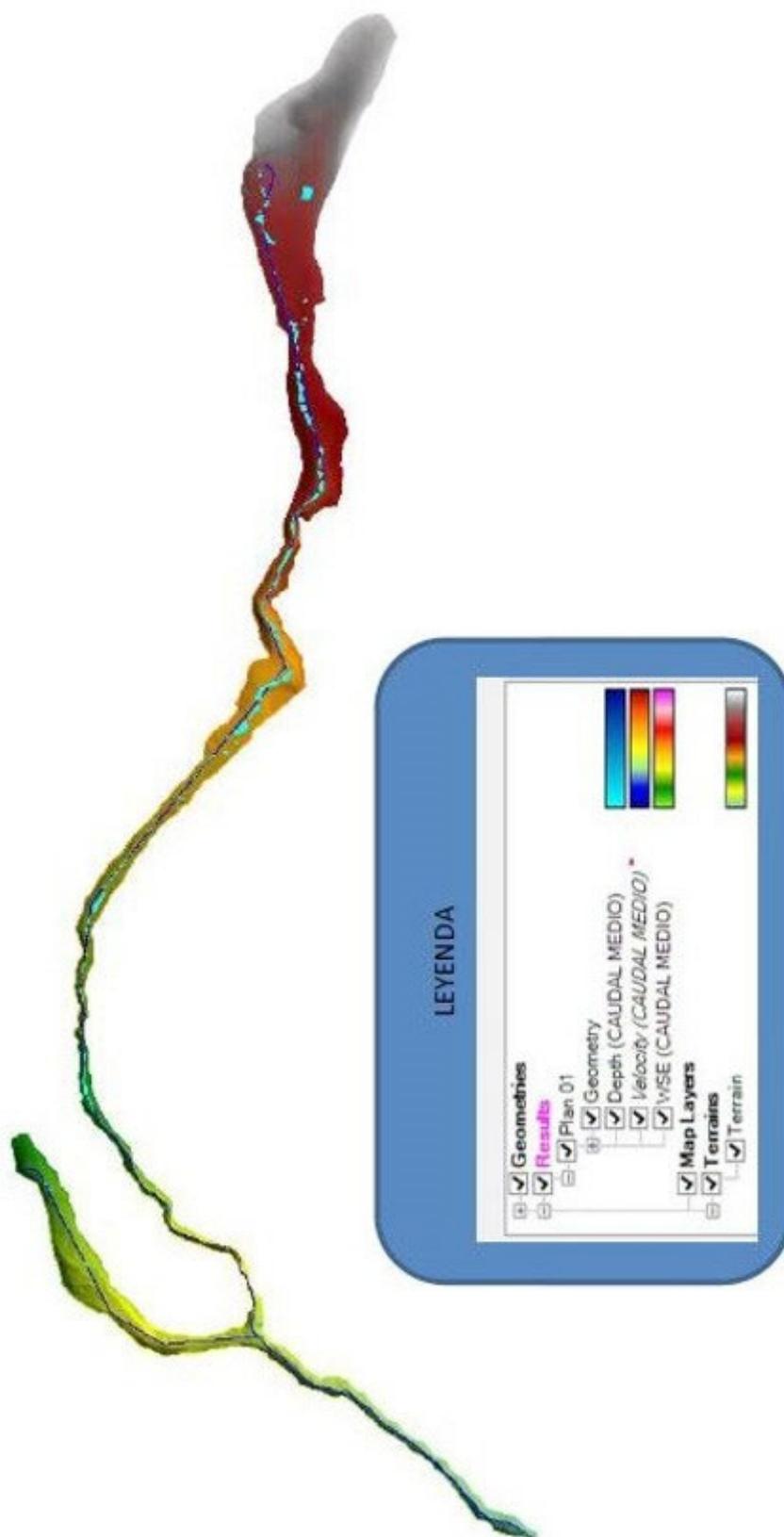


Figure 84  
Présentation de la simulation hydraulique dans RAS Mapper (Silala)

89

### 8.10. Résultats de la modélisation hydraulique

Sur la base des résultats présentés sous forme de graphiques et de tableaux (annexes), il est possible de tirer les conclusions suivantes de la simulation hydraulique de l'écoulement de surface du réseau du Silala :

- A partir de la topographie fournie par le DIREMAR, il a été possible de construire un modèle de terrain numérique DEM avec une résolution de  $20 \times 20$  cm qui représente le réseau du Silala de manière suffisamment détaillée pour obtenir un modèle géométrique permettant de faire une simulation hydraulique dans HEC-RAS.
- Les paramètres hydrauliques définis pour la simulation (coefficient de rugosité de Manning et gradient) représentent les conditions du réseau hydraulique du Silala.
- Le profil hydraulique montre la présence de légères dépressions où une certaine quantité d'eau s'accumule (la profondeur y étant plus importante que la moyenne, l'eau s'écoule en dehors du canal principal).
- Le profil de la vitesse montre que les vitesses de 0,4 m/s prédominent, dans une fourchette allant de 0,2 m/s minimum, dans les tronçons à pente douce, à 1,0 m/s maximum, dans les tronçons à pente forte.
- Le régime d'écoulement prédominant est subcritique, avec un nombre de Froude donnant majoritairement des valeurs  $Fr < 1$ . Il y a cependant des zones avec des gradients plus abrupts (profil de pente), ce qui implique une vitesse plus élevée et des valeurs  $Fr > 1$  supérieures à 1,5 environ ; mais cela ne se produit qu'en certains points.
- La profondeur moyenne ou prédominante est inférieure à 0,2 m, certains tronçons ou points où la tension est plus grande accumulant de l'eau ou certaines conditions faisant augmenter la profondeur de l'écoulement.

90

## 9. CONCLUSIONS

### 9.1. Conditions naturelles

#### a) Catégorie du *bofedal*

Pour comprendre quelles sont les conditions naturelles des eaux du Silala, il faut partir d'une catégorie physico-biologique définie par une unité eau-sol-biotope. Tenter d'expliquer l'écoulement de l'eau isolément revient à ignorer le lien existant entre ces trois éléments et le milieu environnant.

Dans ce cadre, les eaux du Silala sont complètement intégrées dans les zones humides d'altitude, indépendamment des facteurs tels que l'étendue, le gradient, la végétalisation et les caractéristiques de l'écoulement. Par conséquent, l'eau circule à l'intérieur de cette catégorie [de zones humides].

Bien que, sur un court segment de la branche sud, en raison des conditions géologiques, l'eau circule en surface dans un canal creusé dans la roche, la masse d'eau recouvre son statut de masse d'eau de *bofedal* à la confluence.

#### b) Provenance de l'eau

- Il n'y a pas d'apport par ruissellement superficiel dans le bassin.

L'absence dans le bassin de ruissellement superficiel, résultant de la réponse hydrologique aux précipitations, est démontrée de deux façons :

- Le régime d'écoulement à chacun des points de surveillance ne varie pas dans le temps : son comportement est pratiquement constant tout au long de l'année, c'est-à-dire qu'il ne présente pas de variation saisonnière.
  - Il n'y a aucun signe de ruissellement laminaire dans tout le bassin versant. On ne trouve pas trace d'un réseau de drainage, même à l'échelle du micro-bassin. Concrètement, l'absence de précipitations excédentaires entraîne l'absence de processus fluvial dans le bassin. Il n'y a pas d'écoulement en surface dans le bassin.
- L'eau des *bofedales* provient des apports d'origine souterraine.

Les eaux qui émergent dans les *bofedales* sont des sources qui apportent aux *bofedales* une eau d'origine souterraine ; leur présence n'est pas explicable autrement.

Le comportement de l'écoulement aux différents points de contrôle, au cours de la période d'étude allant de mai 2017 à mars 2018, indique que la seule source de l'écoulement apporté aux masses d'eau, définies par les *bofedales* et les zones de transition, est d'origine souterraine. Cette hypothèse s'appuie également sur le fait que la variation estimée de l'écoulement mensuel pour le même point de contrôle (points de mesure) n'est pas significative par rapport aux écoulements moyens.

91

### c) Circulation de l'eau

- La combinaison de la circulation en milieu poreux et en surface ne se concentre pas dans le *bofedal*.

Dans les masses d'eau du Silala, l'eau circule par gravité mais il est nécessaire de classer cette circulation en différentes catégories :

- Dans les *bofedales*, l'eau circule lentement, à très faible vitesse, en fonction des caractéristiques de perméabilité, de porosité, de teneur en matière organique, de gradient hydraulique et de débit.
- En conditions naturelles, sans intervention artificielle, l'eau des *bofedales* circule en mode micro-superficiel, dans des branches dispersées, de sorte qu'il n'est pas possible de définir un lit ou un cours d'eau proprement dit.

D'un point de vue technique, la circulation naturelle du Silala dans les *bofedales* ne correspond pas à la définition technique d'une rivière, à savoir un «cours d'eau important drainant naturellement un bassin».

Bien que le terme «important» puisse être subjectif s'agissant de qualifier l'ampleur de l'écoulement, il est établi que le débit du Silala est de l'ordre de 160 l/s environ, ce qui est une valeur faible en comparaison du débit d'autres cours d'eau prenant leur source dans la cordillère des Andes.

Il n'y a pas de drainage de surface dans le bassin du Silala parce qu'il n'y a pas d'apport d'eau de surface suffisant pour produire un tel écoulement.

## 9.2. Etat des interventions sur les masses d'eau

Au sujet des interventions effectuées sur les masses d'eau du Silala au moyen d'ouvrages hydrauliques, on peut conclure ce qui suit :

### — Système hydraulique

Les interventions menées sur les masses d'eau du Silala s'inscrivent dans un système hydraulique : il ne s'agit pas d'ouvrages isolés, mais d'un ensemble qui commence aux ouvrages de captage et s'étend jusqu'au territoire bolivien.

### — Objectif de ces interventions

92

Le principal objectif des ouvrages hydrauliques était d'améliorer l'efficacité hydraulique du captage et de l'acheminement au moyen de prises d'eau situées au niveau des sources et de canaux drainant les masses d'eau.

La construction dans les *bofedales* de canaux sans revêtement, de canaux avec revêtement de pierres assemblées à sec et de canalisations perforées a considérablement modifié le régime hydrique d'origine. Elle a même entraîné une diminution de l'écoulement qui alimentait les *bofedales* et, dans certains cas, elle a durablement interrompu l'apport d'eau, provoquant le dessèchement des *bofedales*.

### — Première intervention

#### Ouvrages de captage

D'après leurs dimensions actuelles, les ouvrages de captage sur le tronçon de la confluence ont la capacité de capter et d'acheminer l'ensemble de l'apport en eau. Ces ouvrages ont été construits en béton.

#### Ouvrages d'acheminement de l'eau

L'objectif des ouvrages d'acheminement est de diriger toute l'eau collectée à la confluence, située en territoire bolivien, vers le territoire chilien, au moyen d'un bassin de chargement raccordé à l'ouvrage de captage.

### — Deuxième intervention

#### Ouvrages de captage spécifiques

La deuxième intervention, s'agissant des ouvrages hydrauliques, ne consiste pas en opérations isolées comme dans le cas de la première intervention : il s'agit d'une intervention globale, comprenant un ensemble d'ouvrages de collecte ou de captage installés sur chacune des sources les plus productives. L'objectif est d'intervenir au point même d'émergence de l'eau, afin de limiter les pertes autant que possible.

#### Ouvrages d'acheminement longitudinal de l'eau (canaux d'acheminement)

Les canaux d'acheminement de l'eau ne rentrent pas dans la catégorie des canalisations étanches conçues «uniquement» pour diriger l'écoulement vers des zones en aval ; ce sont des «canaux de drainage» qui servent aussi à capter l'eau «latéralement», en faisant baisser le niveau de la nappe phréatique afin d'augmenter le débit déjà capté à chaque source. Ces ouvrages d'acheminement sont donc considérés comme des ouvrages d'acheminement longitudinal.

### — Caractéristiques générales des ouvrages hydrauliques

Les ouvrages installés sur les masses d'eau du Silala présentent des caractéristiques très «agressives» pour l'environnement, du fait qu'ils ont un impact non seulement sur le régime de l'eau mais aussi sur l'écosystème. Le drainage de la nappe phréatique a provoqué la disparition de zones humides saines dans les *bofedales* nord et sud.

93

Les résultats de la modélisation hydraulique réalisée pour cette étude montrent que les conditions de circulation de l'eau dans les masses d'eau du Silala ont subi des modifications importantes. L'introduction d'ouvrages hydrauliques a modifié les conditions naturelles de circulation de l'eau en milieu poreux et a transformé un écoulement de surface dispersé en un écoulement à surface libre dans les canaux de drainage mis en place.

Les modifications du comportement hydraulique des *bofedales* à l'état naturel ont un impact sur les vitesses de la circulation de l'eau prédominant dans le milieu poreux : alors que ces vitesses étaient à l'origine de l'ordre de  $2,3 \times 10^{-9}$  cm/s dans le *bofedal* nord et de  $6,5 \times 10^{-9}$  cm/s dans le *bofedal* sud, les interventions ont permis de les augmenter jusqu'à 0,4 m/s, avec des pointes variant de 0,2 m/s à 1,0 m/s environ. Le régime d'écoulement prédominant est subcritique (nombre de Froude inférieur à 1) ; il l'est également dans certaines zones de chutes ou de pentes. Les hauteurs d'eau prédominantes sont en moyenne inférieures à 0,2 m.

### — Longueurs et matériaux des canaux du Silala

Les réseaux d'adduction des *bofedales* sud et nord, ainsi que le canal de la confluence, sont construits avec des matériaux différents et sont de longueurs différentes. Les types de construction les plus fréquents sont les canaux creusés dans un sol naturel, les canaux avec revêtement en maçonnerie à sec, les canaux en maçonnerie avec liant et les canaux en pierre.

Le canal principal et les canaux secondaires du *bofedal* sud mesurent 3685,50 m, tandis que ceux du *bofedal* nord mesurent 1800,00 m. Le canal principal et les canaux secondaires du tronçon de la confluence mesurent 944,00 m.

Les canaux principaux des *bofedales* nord et sud et du tronçon de la confluence s'étendent sur une longueur totale de 4265 m, tandis que les canaux secondaires atteignent une longueur de 2114,40 m. La longueur totale de tous les canaux construits est de 6379 m.

Le tableau 12 présente une synthèse des longueurs des canaux principaux et secondaires des *bofedales* sud et nord et du tronçon de la confluence.

Canal lengths (m)			
Sector	Main Canal	Secondary Canal	Sub-Total
South bofedal	2871,0	814,5	3685,5
North bofedal	688,0	1112,0	1800,0
Confluence reach	706,0	238,0	944,0
<b>Total</b>	<b>4265,0</b>	<b>2164,5</b>	<b>6429,5</b>

**Tableau 12**  
Caractéristiques hydrauliques aux points de mesure pendant la campagne d'avril 2018

Légende :

Canal lengths (m)	=	Longueur des canaux (m)
Sector	=	Secteur
Main canal	=	Canal principal
Secondary canal	=	Canal secondaire

Sub-total	=	Sous-total
South bofedal	=	<i>Bofedal</i> sud
North bofedal	=	<i>Bofedal</i> nord
Confluence reach	=	Tronçon de la confluence
Total	=	Total

94

### 9.3. Synthèse

L'étude montre que le degré d'intervention dans les *bofedales* du Silala a été particulièrement élevé, comme en témoignent l'importance des ouvrages construits et la grande efficacité du captage et de la chenalisation de l'eau. La longueur des canaux construits dépasse 6 kilomètres et près d'une centaine d'ouvrages servent au captage des sources les plus productives. Par sa chenalisation dans les canaux construits, l'eau qui s'écoulait à très petite vitesse à l'état naturel a atteint des débits comparativement beaucoup plus élevés.

Les interventions ont non seulement eu un impact sur l'acheminement naturel de l'eau des sources aux *bofedales*, mais elles ont également transformé la structure même des *bofedales*, qui sont drainés grâce aux canaux perméables mis en place.

Les ouvrages hydrauliques ont eu une forte incidence sur le milieu naturel puisque la fonction initiale de ces masses d'eau agissant comme réservoirs naturels et régulateurs du système sol-eau-biotope n'a pas été respectée.

La préservation des masses d'eau a été subordonnée à une conception interventionniste visant essentiellement à augmenter le volume d'eau captée à des fins d'usage.

En bref, l'objectif principal a été de drainer les masses d'eau des sources et des *bofedales*.

RÉFÉRENCES

García, E. y Otto, M., 2015. 2, Lima: s.n., 2015, Ecol.apl., Vol. 14 Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del Río Santa, Ancash, Perú. García, E. y Otto, M. 2015. 2, Lima: s.n., 2015, Ecol.apl., Vol. 14.

CNCH. 1992. Modifica Artículos 58 y 63 del Código de Aguas. Legislación Chilena. s.l.: Biblioteca Nacional del Congreso Nacional de Chile, 1992.

COFADENA. 2017. Estudio geofísico mediante tomografías eléctricas resistivas — ERT — del área del Silala, Provincia Sud Lipez, Departamento de Potosí — Bolivia. Corporación de las Fuerzas Armadas para el Desarrollo Nacional (COFADENA), Dirección de Reinviación Marítima, Silala y Recursos Hídricos Internacionales (DIREMAR). La Paz, Bolivia: Unidad de Explotación de Recursos Hídricos (U.E.R.H.), 2017.

Technical Consultants, 2018. Georreferencation study, topographical survey and determination of infiltration capacity in the face of a possible surface run off in the area of the Silala springs.

DIREMAR. La Paz: s.n., 2018. Consultancy Report.

DIREMAR. 2017. Characterization of the Soils of the Silala Bofedals and surrounding areas.

DIREMAR. La Paz: Plurinational State of Bolivia, 2017. p. 135, Consulting Report.

Fox, Robert H. 1922. "The Waterworks Department of the Antofagasta (Chili) & Bolivia Railway Company". Johannesburg : *South African Journal of Science*, 1922.

Gómez-García, R. 1997. Recursos Hídricos Transfronterizos entre las Repúblicas de Bolivia y Chile. Unidad de Análisis de Política Exterior (UDAPEX), Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto de la República de Bolivia. La Paz, Bolivia: Corporación Andina de Fomento, 1997.

Hydrologic Engineering Center. 2011. HEC-GeoRAS GIS Tools for support of HEC-RAS using ArcGIS User's Manual. Version 4.3.93, February. [ed.] Institute for Water Resources US Army Corps of Engineers. Davis: s.n., 2011.

IGM. 2016. Ubicación georreferenciada, Aguas del Silala. Instituto Geográfico Militar. s.l.: Agosto, 2016.

Jackson, C. Rhett, Thompson, James A. y Kolka, Randall K. 2014. *Wetland soils, hydrology and geomorphology*. [aut. libro] D. Batzer y R., Sharitz. [ed.] University of California Press. *Ecology of freshwater and estuarine wetlands*. Berkeley: s.n., 2014, págs. 23-60, Chapter 2.

Ramsar Convention of Wetlands. 1971. Acta final de la Conferencia Internacional sobre la Conservación de los Humedales y las Aves Acuáticas. Ramsar, Irán: s.n., 1971. Acta de Conferencia del 30 de enero al 3 de febrero de 1971.

—. 2016. Introducción a la Convención sobre los Humedales, Subserie I Manual de la Convención de Ramsar. Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar, 2016. Manual 1.

—. 2010. Manual de Lineamientos Ramsar en relación con el agua. Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsa, 2010.

Sanguenza, Abel. 2016. Estudio de Prospección Geofísica por el Método de Tomografía Eléctrica en el Sudoeste del Departamento de Potosí — Municipio de San Pablo de Lipez. [ed.] Ministerio de medio ambiente y agua. [recopil.] Viceministerio de agua potable y saneamiento básico. La Paz, Bolivia: s.n., Julio de 2016.

SENAMHI. 2014. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. <http://www.senamhi.gob.bo/>. [En línea] 2014. [Citado el: 20 de 6 de 2014.] <http://www.senamhi.gob.bo/>.

**96** SENAMHI-DIREMAR. 2018. Informe de Medición de Caudales en la Región de los Manantiales del Silala. Ministerio de Medio Ambiente y Agua. La Paz: s.n., 2018.

SERGEOMIN. 2017. Mapeo geológico estructural del área circundante a los manantiales del SILALA. Servicio Geológico Minero, DIREMAR. 2017.

The Antofagasta (Chili) & Bolivia Railway Company Ltd. 1928. New Intake Chambers, etc. Siloli Chilean Section Estimates Nos. 1440/41. [Documento]. 29 de June de 1928. No 165.

—. 1928. Proposed open channel from Siloli Springs “Orientales” and “Cajon” to intake of Siloli Pipe Line. 27 de January de 1928. No 143.

WMO. 2012. International Glossary of Hydrology. [ed.] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization World Meteorological Organization. Geneva: s.n., 2012. No. 385.

---

### ANNEXE 23.3

#### FUNDECO, EVALUATION DE L'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT DANS LA RÉGION DU SILALA, MAI 2018

*[Traduction établie par le Greffe à partir de la traduction anglaise de l'original espagnol fournie par la Bolivie]*

#### **Auteurs**

Luis F. Pacheco, D.Cs. Coordonateur de l'étude. Directeur de l'institut d'écologie de l'Université supérieure San Andres (IE-UMSA).

Rosa Isela Meneses. Spécialiste des écosystèmes et zones humides des hauts plateaux andins. Cheffe de l'unité de botanique du Museum national d'histoire naturelle et chercheuse à l'Herbarium national de Bolivie.

Gabriel Zeballos. Spécialiste des systèmes d'information géographique. Département de géographie, université d'Etat de l'Ohio.

Carolina Garcia Lino, PhD. Spécialiste de l'écologie des milieux alpins. Chercheuse associée à l'Herbarium national de Bolivie.

Susi Loza Herrera, MSc. Biologiste/écologiste. Chercheuse associée à l'Herbarium national de Bolivie.

Loly Vargas C. Biologiste, spécialiste de la sociologie de l'environnement.

Arelly N. Palabral A., MSc. Biologiste botaniste. Chercheuse associée à l'Herbarium national de Bolivie.

Ariel Lliully A. Botaniste, spécialiste des herbacées et graminoides. Chercheur associé à l'Herbarium national de Bolivie.

Jorge Molina. Biologiste, spécialiste des écosystèmes aquatiques. Chercheur associé à l'unité de limnologie de l'institut d'écologie de l'Université supérieure San Andres (IE-UMSA).

Jaime Sarmiento. Biologiste, ichtyologiste. Museum national d'histoire naturelle.

Alberto Mariscal. Biologiste, ichtyologiste.

James K. Aparicio E. Herpétologiste. Chef de l'unité de zoologie du Museum national d'histoire naturelle. Chef et conservateur de la section reptiles et amphibiens de la Colección boliviana de fauna.

Leslie Zegada H. Herpétologiste.

M. Isabel Gomez U. Ornithologue. Museum national d'histoire naturelle.

Paola Velásquez Noriega. Ornithologue.

Adriana Rico, PhD. Zoologiste spécialiste des mammifères. Colección boliviana de fauna (IE-UMSA).

Virginia Sanchez Biologiste, zoologiste spécialiste des mammifères.

## Glossaire

- *Bofedal* : type de formation végétale nécessitant un apport en eau constant et caractérisé par une concentration élevée en matière organique.
- Qualité écologique : désigne généralement la structure et la fonction d'un écosystème.
- Communauté : ensemble de populations d'animaux, de plantes et/ou d'êtres vivants qui partagent une zone géographique à un moment donné. Lorsqu'elles vivent sur un territoire, ces populations en partagent l'espace et d'autres ressources et établissent différents types de relations. La stabilité d'une communauté biologique est déterminée par la variété et la quantité des populations qui la composent.
- Ecosystème : ensemble des interactions de la communauté avec la zone ou le territoire qu'elle occupe. L'écosystème se compose d'éléments vivants qui forment la communauté et d'éléments non vivants (éléments abiotiques).
- Macro-invertébrés : il s'agit des invertébrés aquatiques, larves, nymphes, naïades ou adultes vivant dans le substrat, la colonne ou à la surface des masses d'eau. Ils sont visibles à l'œil nu ou à l'aide d'une simple loupe. Puisqu'ils vivent dans l'eau, ils peuvent fournir des informations sur la santé des écosystèmes et sur la qualité écologique de l'eau, au moyen d'éléments physico-chimiques et morpho-structurels.
- Indice d'habitabilité fluviale : indice permettant d'évaluer la qualité de l'habitat selon sept paramètres, à savoir la présence de rapides, la fréquence des rapides, la composition du substrat, le rapport vitesse/profondeur, le pourcentage d'ombre dans le canal, les éléments d'hétérogénéité et la couverture végétale aquatique.
- Population : ensemble d'individus de la même espèce qui partagent une zone géographique pendant une période donnée. Une espèce est un ensemble d'êtres présentant des caractéristiques biologiques similaires, qui peuvent se croiser et donner naissance à une descendance fertile. Par exemple, tous les lapachos d'une certaine zone forment une population. Autre exemple : toutes les souris dans une zone donnée.
- Unité physiologique : communauté de plantes similaire en apparence. Par exemple, en raison de leur mode de croissance.

## TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Auteurs .....	i
Glossaire.....	ii
Résumé.....	1
1. CONTEXTE	
2. CONTEXTE THÉORIQUE	
3. OBJECTIF GÉNÉRAL	
4. ZONE D'ÉTUDE	
5. MÉTHODOLOGIE	
5.1. Diagnostic des facteurs abiotiques et biotiques dans le secteur du Silala	
5.2. Délimitation de la zone actuelle des <i>bofedales</i>	
5.3. Cartographie de la végétation du secteur et calcul de la superficie des <i>bofedales</i> d'autrefois	
5.4. Etat actuel des <i>bofedales</i> : analyse de premier niveau	
Végétation	
Ichtyofaune	
Herpétofaune	
Avifaune	
Mastofaune	
ANALYSE DES DONNÉES	
5.5. Impact sur l'environnement des <i>bofedales</i> causé par le réseau de canaux artificiels	
Végétation	
Macro-invertébrés aquatiques	
5.6. Poissons	
6. RÉSULTATS	
6.1. Historique de l'occupation du territoire du Silala (aspect social)	
6.2. Diagnostic des facteurs biotiques et abiotiques	
Conditions climatiques	
Paramètres physico-chimiques	
Canaux	
Sol	
Flore	
Faune	
Macro-invertébrés	
Ichtyofaune	
Herpétofaune	
Avifaune	
Mastofaune	
6.3. Délimitation de la zone actuelle des <i>bofedales</i>	

6.4. Calcul de la superficie des <i>bofedales</i> actuellement et dans le passé récent	
6.5. Etat actuel des <i>bofedales</i> du Silala Description botanique des <i>bofedales</i> du Silala	
Fragments du <i>bofedal</i> sud	
<i>Bofedal</i> nord (N)	
Confluence des <i>bofedales</i> sud et nord (CONF)	
Etat actuel des <i>bofedales</i>	
6.6. Impact sur l'environnement des <i>bofedales</i> causé par la présence de canaux artificiels	
6.6.1. Qualité écologique des <i>bofedales</i>	
6.6.[2]. Macro-invertébrés	
Oiseaux	
Mammifères	
6.7. Préparation des mesures de restauration qui doivent être prises pour garantir la préservation de l'écosystème des <i>bofedales</i>	
6.8. Développement d'un programme de surveillance de l'environnement du Silala	
6.9. Atténuation et contrôle des impacts sur les <i>bofedales</i> du Silala	
7. CONCLUSIONS .....	4
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	7

#### ANNEXES

1. Aspects historiques et sociaux	
2. Codes et significations des fragments et des désignations abrégées des espèces	
3. Sélection avancée de la méthode d'analyse PCA avec les variables environnementales qui affectent significativement les communautés végétales.	
4. Guide photographique des taxons présents dans les zones humides du Silala	
5. Paramètres physico-chimiques des stations d'échantillonnage dans les zones humides du Silala	
6. Habitat et paramètres morphologiques et structurels des zones humides du Silala	

## Résumé

Le rapport présente les résultats de l'évaluation de l'impact sur l'environnement effectuée dans la région du Silala, qui a consisté à évaluer l'état des *bofedales* (facteurs biotiques et abiotiques) et les impacts causés par les activités humaines (principalement la chenalisations). Il présente également une évaluation de la diversité associée aux *bofedales*, et des directives pour la restauration, l'atténuation des effets et le suivi. Il décrit en outre certains aspects historiques et sociaux liés à la zone. L'évaluation repose sur des visites sur le terrain menées entre mars et avril 2018 et l'analyse d'images satellitaires.

Trois zones ont été définies dans les *bofedales* du Silala : le *bofedal* sud, le *bofedal* nord et la zone de la confluence. Les trois *bofedales* sont décrits du point de vue du paysage ainsi que de la composition et du nombre des espèces. Le *bofedal* sud est le plus dégradé et fragmenté. On y a recensé six fragments avec différentes communautés de plantes correspondant à des prairies et à de l'herbe composées, en proportions différentes, de sol nu et d'affleurements salins (fragments A, B et C).

Des espèces non typiques des *bofedales* (telle que *Deyeuxia curvula*) ont été observées, certaines étant indicatives d'un sol très humide (comme *Xenophyllum incisum*) et généralement présentes sur les berges des masses d'eau et aux limites du *bofedal*. On a trouvé des zones désertiques et salines qui, en raison de la présence des espèces citées précédemment, ont dû être un *bofedal* dans un passé récent (décennies). Dans le *bofedal* sud, les fragments D et E représentent les zones ayant encore une vraie structure de *bofedal*, dont l'état de conservation va de «moyen» à «dégradé». Le fragment E présente la qualité écologique la plus élevée dans la région du Silala. Les fragments D et E du *bofedal* sud couvrent une superficie totale de 4822 m<sup>2</sup>.

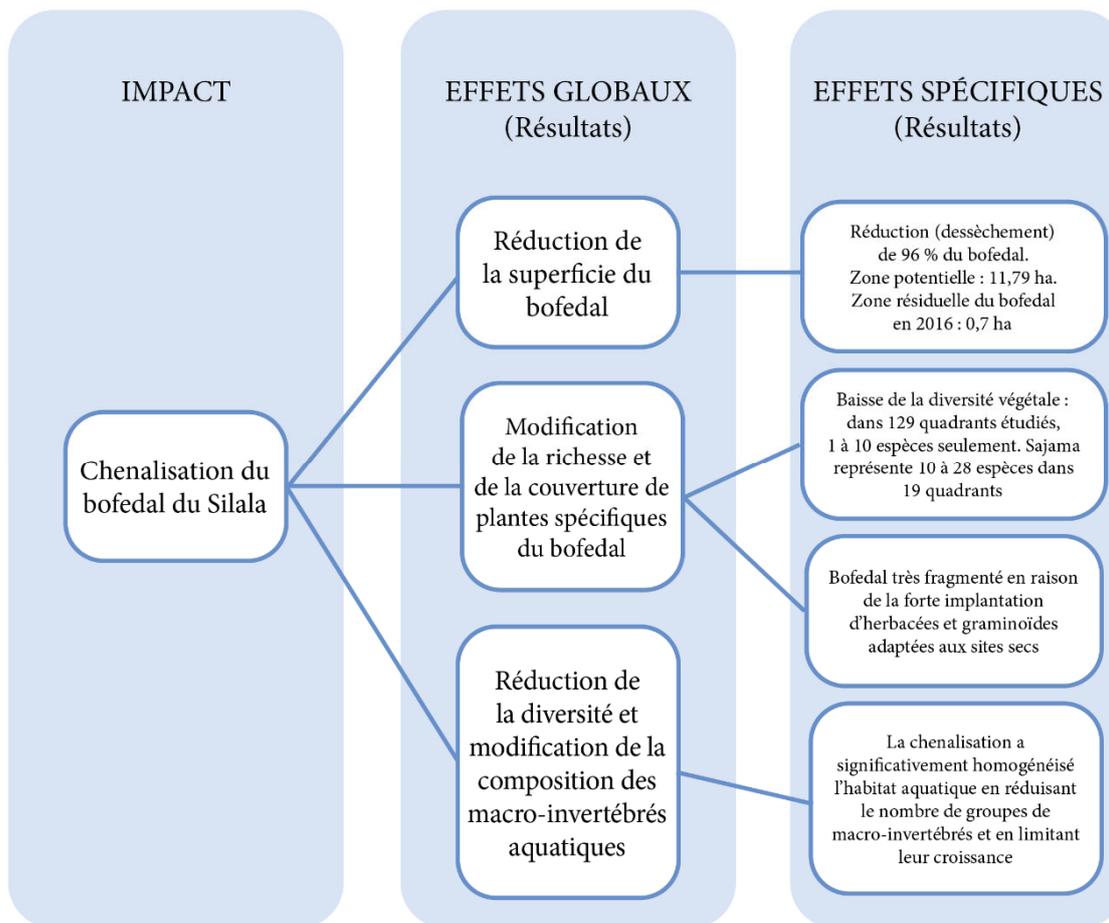
Dans le *bofedal* nord, on a identifié trois unités : 1) zones où domine *Oxychloe andina* (espèce typique des *bofedales*), 2) zones où les canaux à ciel ouvert sont très nombreux et où prédomine *Deyeuxia eminens* var. *eminens* et 3) secteurs demi-secs des limites des *bofedales*, où domine *Festuca potosiana*. Le *bofedal* nord occupe une superficie de 2540 m<sup>2</sup>. Ce *bofedal* est dégradé.

Dans le *bofedal* de la zone de la confluence, on observe plus de *Deyeuxia eminens* var. *eminens* (espèce associée à des eaux courantes) et, dans une moindre mesure, un mélange de *Festuca rigescens* et d'*Oxychloe andina*. Ce secteur est très dégradé et mal préservé.

L'évaluation par quadrant (129 quadrants de 1 m<sup>2</sup>) montre que la végétation des *bofedales* est très hétérogène, notamment dans le *bofedal* nord où l'on observe une grande variété d'herbacées telles que *Festuca potosiana*. Cette espèce se développant habituellement aux confins des *bofedales*, sa présence laisse supposer que la disponibilité de l'eau a diminué ici, par rapport à un *bofedal* typique.

La composition floristique du terrain indique un degré élevé de compaction du sol (ce qui en réduit la porosité), dû à la prédominance d'espèces de graminées et de graminoides comme *Carex cf. maritima* et *Puccinellia frigida*, d'espèces qui forment des plaques comme *Plantago tubulosa* et de plantes herbacées comme *Gentiana gayi*. Le *bofedal* nord et le fragment D du *bofedal* sud sont les moins compactés malgré l'abondance de graminées typiques des milieux secs, même au cœur du *bofedal*.

Au niveau abiotique, nous observons que, compte tenu des propriétés physico-chimiques, des caractéristiques du relief (pente variant de moins de 1 % à 7 %) et de la faible densité des troupeaux de bovins (dont témoigne la présence réduite d'excréments), les *bofedales* du Silala devraient être en très bon état de conservation et présenter une qualité écologique très élevée. Or, ils sont actuellement très fragmentés et desséchés. Le diagramme ci-après résume les principaux impacts observés sur l'environnement selon les éléments étudiés dans les *bofedales* du Silala.



**Schéma 1 : création interne**

Au niveau socio-culturel, les *bofedales* du Silala et leurs environs ont une valeur historique, archéologique et culturelle attestée par les établissements humains et une occupation saisonnière, probablement pour des activités de pâturage et/ou de chasse, depuis l'époque inca. En raison de leur situation géographique, au milieu d'une zone désertique, les sources du Silala revêtent une grande importance écologique et constituent un refuge temporaire pour de nombreuses espèces d'animaux, en particulier les oiseaux migrateurs.

Les *bofedales* du Silala ont subi au fil du temps de nombreuses interventions humaines, notamment : i) l'extraction de l'*Azorella compacta* (*yareta*) dont les populations semblent avoir été décimées depuis plusieurs décennies pour être transformées en combustible végétal destiné aux activités humaines, et ii) les établissements humains, les abris temporaires ainsi que les sites de pâturage utilisés par les membres de la communauté Quetena Chico. Cependant, l'activité qui a eu l'impact le plus important sur les *bofedales* du Silala est sans aucun doute la chenalisation des eaux réalisée au début du XX<sup>e</sup> siècle pour alimenter l'Antofagasta (Chili) & Bolivia Railway Company Ltd., la compagnie ferroviaire chilienne qui a mené à bien les travaux. L'impact de cette intervention a perduré puisque les canaux ont été entretenus pendant presque tout le siècle dernier.

Il est incontestablement établi qu'une zone d'une surface totale de 117 934 m<sup>2</sup> (11,79 hectares) a été un *bofedal*. En 2016, le *bofedal* ne couvrait plus que 7679 m<sup>2</sup> (0,76 hectare). Ces chiffres constituent une preuve supplémentaire que la chenalisation a été un facteur important de dégradation des *bofedales*. La zone des *bofedales* a diminué d'environ 94 % à cause de l'infrastructure en place.

En conclusion, il existe trois zones de *bofedal* présentant différents degrés de fragmentation et de drainage. L'abondance de certaines espèces de plantes alentour laisse à penser que la composition

du *bofedal* a été modifiée. La zone est riche de 167 espèces, dont 86 de flore et 81 de faune (y compris les macro-invertébrés). La biodiversité du Silala laisse supposer que ce site est une oasis régionale en raison de la diversité qu'elle abrite. Cependant, l'activité humaine résultant de la présence de populations et plus particulièrement la chenalisation a modifié la zone et la composition typique du *bofedal*, qui s'en est trouvé largement fragmenté. Des mesures de restauration, de réduction et de suivi sont proposées au vu de l'évaluation réalisée.

.....

## 7. CONCLUSIONS

- Les *bofedales* du Silala ont été fragmentés et dégradés et sont très vulnérables. Des mesures doivent être prises pour les restaurer, leur rendre leur biodiversité, leur physionomie générale et rétablir leurs écosystèmes.
- Il est établi que, avant les ouvrages de chenalisation, les *bofedales* recouvraient une surface plus étendue qui, selon les estimations, devait atteindre 11,48 hectares alors qu'il ne reste aujourd'hui qu'une zone de 0,76 hectare, dont l'état de conservation est en outre peu satisfaisant. On peut donc affirmer que les ouvrages de chenalisation ont entraîné la perte de plus de 10 hectares de *bofedales*.
- Une régénération des *bofedales*, limitée mais manifeste, s'est produite au cours des 15 dernières années, ce qui confirme la nécessité de prendre des mesures de restauration pour assurer la préservation des *bofedales*.
- Les *bofedales* du Silala constituent une sorte d'«oasis» productive dans une zone désertique ; ils abritent et assurent la pérennité de nombreuses formes de vie, dont certaines sont nouvelles dans la diversité connue du pays. Si la chenalisation se poursuit, la flore et la faune du *bofedal* seront toujours menacées.

### Facteurs biotiques et abiotiques

- Les 167 espèces qui habitent la région du Silala comprennent 86 espèces de flore et 81 espèces de faune.
- Treize espèces de plantes que l'on trouve communément dans les *bofedales* et 18 espèces propres aux confins des *bofedales* ont été recensées. Parmi celles-ci, quatre sont classées comme espèces menacées : *Azorella compacta*, *P. deserticola*, *Z. atacamensis* et *O. andina*, et quatre autres sont classées comme vulnérables : *P. quadrangularis*, *N. auricoma*, *F. potosiana* et *P. tarapacana*.
- Dix-sept espèces de plantes ont été recensées pour la première fois dans le département de Potosí (tableau 7) parmi lesquelles deux sont des espèces nouvelles dans le pays (*Menonvillea virens* et *Mostacillastrum dianthoides*).
- On a observé qu'une importante population d'amphibiens *Rhinella spinulosa* se reproduisait dans les masses d'eau du Silala.
- Trois espèces de lézard du genre *Liolaemus* ont été observées ainsi qu'une quatrième espèce (*Liolaemus hajeki*), faisant ainsi du Silala l'une des zones abritant la plus grande diversité d'espèces de ce genre dans la région sud de l'Altiplano bolivien.
- Les *bofedales* du Silala et leurs environs fournissent des ressources à 35 espèces d'oiseaux. Deux d'entre elles sont classées comme espèces menacées, à savoir *Rhea pennata* (menacée) et (*Phegornis mitchellii*) (quasi menacée). Six sont considérées comme des espèces endémiques de la région zoogéographique des Andes centrales. Sept d'entre elles sont des espèces migratrices boréales, australes et altitudinales. La présence d'*Oressochen melanopterus*, de *Cinclodes albiventris*, de *Lessonia oreas* et de *Muscisaxicola flavinucha* ainsi que l'absence de *Muscisaxicola juninensis* et de *Gallinago andina* attirent notre attention car cela pourrait constituer un indicateur de la dégradation et/ou de la réduction de la surface des *bofedales* du Silala.

- Les espèces de rongeurs trouvées dans la zone du Silala sont caractéristiques de la région andine (Potosí et Oruro, dans des conditions similaires) ; toutefois, des espèces non identifiées du genre *Abrothrix* pourraient être des espèces nouvellement observées dans le secteur ou dans le pays.
- Les espèces de *Heleobia* (*Caenosgastropoda* ; *Cochliopidae*) et les mollusques que l'on trouve habituellement dans les *bofedales* n'ont pas été observées.
- Les eaux des *bofedales* du Silala sont de type basique : le pH est compris entre 8 et 9 dans le *bofedal* sud et entre 7 et 8 dans le *bofedal* nord. Le taux d'alcalinité est élevé, ce qui rend l'écosystème du *bofedal* sujet aux affleurements salins.
- La conductivité générale est faible, de 160 à 300  $\mu\text{s}/\text{cm}$  ; ces eaux ont une teneur réduite en nutriments, qui tendent à diminuer en aval du canal.

### Etat actuel

- On a distingué trois zones différentes : les *bofedales* nord et sud et la zone de la confluence. Leur végétation est en général fragmentée.

### Domages causés à l'environnement par les ouvrages hydrauliques

- Les observations scientifiques démontrent que les *bofedales* se sont fragmentés à cause des ouvrages hydrauliques. D'autres observations permettent de corroborer cette constatation : l'absence d'espèces caractéristiques de ces milieux, par exemple *Distichia muscoides* (*Juncaceae*), *Werneria spathulata*, *Cuatrecasasiella argentina* (*Asteraceae*), et la présence importante de *Carex cf. maritima* et de graminées comme *Festuca potosiana* (une espèce endémique, propre aux limites des *bofedales*), qui ne sont pas caractéristiques des *bofedales*, sont un indicateur de la dégradation du Silala à cause des ouvrages hydrauliques. La superficie pouvant abriter les espèces communes des *bofedales* s'en est trouvée réduite, et le sol s'est tassé davantage, perdant de sa capacité à retenir l'eau.
- Les ouvrages hydrauliques ont très fortement homogénéisé l'habitat aquatique, réduisant le nombre de groupes de macro-invertébrés qui vivent généralement dans les *bofedales*. Seuls les groupes suivants associés aux masses d'eau des *bofedales* ont été observés : *Austrelmis*, *Hyallela* et *Simulium*. Par ailleurs, on a trouvé dans les canaux en pierre principalement les espèces suivantes : *Paraheptagyia*, *Claudioperla* et *Hydrobiosidae*, des groupes associés à l'écoulement amélioré provoqué par les ouvrages hydrauliques.
- Les ouvrages de chenalisation construits sur les remontées d'eau ont augmenté le débit aval, ce qui a limité la disponibilité de l'eau pour les coussins de plantes communes des *bofedales* (par exemple, dans le *bofedal* sud, fragment C), réduit la diversité aquatique (E11L) et probablement perturbé la reproduction ainsi que le développement larvaire (métamorphose) de l'amphibien *Rhinella spinulosa*, mettant ainsi en péril sa survie dans le fragment C.
- La seule espèce ichtyologique observée dans le secteur est la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) issue d'un programme d'élevage intensif et extensif mis en place par le gouvernement du département de Potosí. Des populations de truites sauvages peuvent être actuellement observées dans les canaux artificiels du secteur.
- La mise en place de cet élevage de truites a, semble-t-il, eu des répercussions sur l'écosystème dans la région du Silala, difficiles à mesurer concrètement en raison de l'absence de données sur la biodiversité aquatique (invertébrés et la présence éventuelle d'*Orestias* dans la zone)

antérieures à l'installation de l'élevage. Il est fortement recommandé de suivre la population de truites et les communautés d'invertébrés afin d'obtenir plus de preuves des éventuelles répercussions.

## 8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aguirre M. Benito I. & Galera A. Tour of the Zalama peatland (Bizkaia) in the last thirty years. 2018. Dans : Chico, Guaduneth & Clutterbuck, Ben & Midgley, Nicholas & Labadz, Jillian. Identification, assessment and restoration of peatlands: recent contributions, p. 23 à 34.
- Albarracín-Jordan J. & Capriles J. 2011. The Paleo-American occupation of Cueva Bautista: Late-Pleistocene Human evidence from the Bolivian Highlands. *Current Research in the Pleistocene* 28: 95-98.
- Alzerreca, H. and Luna, D. 2001. *Cattleman's Manual for the Management of Bofedales*. La Paz, Bolivia, p. 40.
- Alzerreca H., G Prieto, J. Laura, D. Luna & S. Laguna. 2001. Characteristics and distribution of bofedales in the Bolivian area. Final Report. Integral Association of Cattlemen of the High Andes (AIGACAA), p. 176.
- Arratia G. 1982. Fish of the Chilean Altiplano. p. 93 à 133 dans : Veloso A & Bustos E (editions) *Vegetation and ectothermic vertebrates of the Arica-Chungara Lake transect*. Synthesis Volume MAB Project 6 UNEP – UNESCO.
- Arratia G. 1983. *Trichomycterus chungarensis* n.sp. and *Trichomycterus laucaensis* n.sp. (Pisces:Siluriformes: Trichomycteridae) from the High Andes range. *Studies on Neotropical Fauna and Environment* 18: 65-87.
- Arratia G. 1990. The South American Trichomycteridae (Teleostei: Siluriformes) a problematic group. p. 395 à 493 dans : Peters G & Hutterer (eds.) *Vertebrates in the tropics*. Museum Alexander Koenig. Bonn. Argollo J. *et al.*, 1987, *Plioquaternary Geology of Bolivia*. Unpublished.
- Argollo J. and Iriondo G., 1987, *Plioquaternary Geology of Bolivia*. Unpublished. Bazoberry, Q. A. 2003, *The myth of Silala*. Plural Editorial. La Paz, Bolivia.
- Beck, S., A. Domic, C. Garcia, R. I. Meneses, K. Yager & S. Halloy. 2010. The Sajama National Park and its plants. National Herbarium of Bolivia, La Paz, p. 250.
- Bernal M. 2012. *Planning: basic concepts, principles, components, characteristics and development of the process*. Santa Maria University.
- Biggs, J., S. von Fumetti y M. Kelly-Quinn. 2017. The importance of small water bodies for biodiversity and ecosystem services: implications for policy makers. *Hydrobiology* 793:3–39.
- Bosch J, Rincon PA, Boyero L, and Martínez-Solano I. 2006. Effects of Introduced Salmonids on a Mountain Population of Iberian Frogs. *Conservation Biology* 20(1) : 180-189.
- Buria LM, Albariño RJ, Modenutti BE & Balseiro EG. 2009. Temporal variations in the diet of the exotic rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in an Andean-Patagonian canopied stream. *Chilean Magazine of Natural History* 82: 3-15.
- Bustamante E & Treviño H. 1980. Description of the fisheries in Lake Titicaca 1975-79. Institute of the Sea of Peru - Puno.
- Buttolph, L. 1998. *Rangeland Dynamics and Pastoral Development in the High Andes: The Camelids Herders of Cosapa, Bolivia*. Thesis for Doctorate in Philosophy, Utah State University. Logan, Utah, p. 286.

Campos H, Dazarola G, Dyer B, Fuentes L, Gavilan J, Hauquin L, Martinez G, Melendez R, Pequeño G, Ponce F, Ruiz W, Sielfeld W, Soto D, Vega R & Vila I (1998). Conservation categories of native fish of inland waters of Chile and Bolivia. *National Museum of Natural History of Chile* 47: 101-122.

Coronel J. 2010. Bofedales of the Mauri River basin: Vegetation and physical-chemical characteristics. *Sustainable water*. Cochabamba, Bolivia, p. 32.

Costa WJM. 2003. Family Cyprinodontidae (Pupfishes). P. 549 à 554 dans : Reis RE, Kullander SO & Ferraris CJ (eds.). *Check List of the freshwater fishes of Central and South America*. Porto Alegre – Brazil, EEDIPUCRS.

Dangles, O., Rabatel, A., Kraemer, M., Zeballos, G., Soruco, A., Jacobsen, D., & Anthelme, F. (2017). Ecosystem sentinels for climate change? Evidence of wetland cover changes over the last 30 years in the tropical Andes. *PloS one*, 12(5), e0175814.

DIREMAR, 2017. Multi-temporal analysis by means of satellite images of the bofedales of the Silala springs, Potosi - Bolivia. Technical Report.

DIREMAR, 2017. Final Report: Characterization of the soils of the Silala bofedales and surrounding areas. Strategic Office for the Maritime Claim, Silala and International Water Resources, p. 121. Dorador C, Pardo R & Vila I (2003). Temporal variations of physical, chemical and biological parameters of a lake of height: the case of Chungara Lake. *Chilean Journal of Natural History* 76: 15-22.

ERBOL 2016. Potosi will redirect the trout farming project. ERBOL, 6 April 2016.

Eigenmann CH. 1918. The Pygidiidae, a family of South American catfishes. *Mem. Carnegie Museum* /: 259-398.

Eguino, Z. F. 1964. *Synopsis of the History of Bolivia*, 2nd Edition, La Paz - Bolivia.

Feinsinger, P. 2004. The design of field studies for the conservation of biodiversity. FAN. Santa Cruz – Bolivia.

Fjeldså, J. & N. Krabbe. 1990. *Birds of the high Andes*. Apollo Books, Svendborg, Denmark. p. 876. Flores E. (1986) Bolivia, p. 43 à 62 dans : Scott D. A. & Carbonell M. (Compilers). *Inventory of wetlands of the neo-tropical region*. IWRB Slimbridge and IUCN, Cambridge.

Haile J, Froese DJ, MMacPhee RDE et al. (2009) Ancient DNA reveals late survival of mammoth and horse in interior Alaska. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106: 22352–22357.

Hennessey, B., S. K. Herzog & F. Sagot. 2003 *Annotated list of birds of Bolivia*. Harmony Association, Santa Cruz de la Sierra, p. 238.

Herzog, S. K.; R. S. Terril; A. E. Jahn; J. V. Remsen Jr.; O. Maillard; V. H. Garcia Soliz; R. Macleod; A. Maccormick & J. Q. Vidoz, 2017. *Birds of Bolivia: Field Guide*. Civil Action Harmony, Santa Cruz.

Garside ET & Tait JS. 1958. Preferred temperature of rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson) and its unusual relationship to acclimation temperature. *Can. J. Zool.* 36 : 563-567.

Gonzales, R. K. 2013. Temporal and spatial variability of the macrophyte and macro-invertebrate communities of water courses of the Quetena Bofedal - Barrancas Sector (South Lipez – Potosi). Master's thesis in Ecology and Conservation. CPEC-UMSA.

Gutierrez-Viñuales A. 2008. Chuquicamata: industrial heritage of copper mining in Chile. Dans : APUNTES (NOTES) Vol. 21, N° 1 (2008) : 74-91.

[http://www.chululo.cl/pages/recortes2.php?id=28102015\\_021810](http://www.chululo.cl/pages/recortes2.php?id=28102015_021810).

Innova Chile 2010. Base characterization of high Andean meadows and bofedales for a sustainable management of water resources. First Part: Antofagasta Region. Final Report, p. 112.

Jørgensen, P. M., M. H. Neeley S. G. Beck (Editions) 2014. Catalog of vascular plants of Bolivia, Monographs in Systematic Botany. Missouri Botanical Garden, 127(1-2): I–VIII, 1-1744. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis. Lauzanne L. (1982). Orestias (Pisces, Cyprinodontidae) of Little Lake Titicaca. Tropical Hydro-biological Magazine, 15: 39-70.

Lauzanne L. (1991). Native species: Orestias, p. 409 à 421 dans Dejoux C. and Iltis A. (Editions). Lake Titicaca, Summary of the current limnological knowledge. ORSTOM – Hisbol. La Paz, Bolivia.

Legendre, P., & De Caceres, M. 2013. Beta diversity as the variance of community data: Dissimilarity coefficients and partitioning. Ecology Letters, 16, 951–963. <https://doi.org/10.1111/ele.12141>.

Leps J. & Smilauer P. (Editions), 2003. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge University Press, United Kingdom. 267 p.

Liberoff A. L., Miller J. A., Riva-Rossi C. M., Hidalgo F. J., Fogel M. L. and Pascual M. A., 2014.

Transgenerational effects of anadromy on juvenile growth traits in an introduced population of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 71 : 398-407. [dx.doi.org/10.1139/cjfas-2013-0466](https://doi.org/10.1139/cjfas-2013-0466).

Lippolt G. E., Vigliano P. H., Alonso M. F., Macchi P. J., Milano D., Denegri M. A. and Garcia Asorey M., 2011. Comparative analysis between gill netting and sport fisher catches in a small patagonic Andean lake: its implications for resource evaluation and management. Southern Ecology 21:71-85.

Llully A. 2018. Environmental and social impact assessment of the Laguna Colorada transmission line and other socio-environmental documents. Activity Report. La Paz.

Loubens G. (1989). Observations on fish from the Bolivian part of Lake Titicaca. IV. Orestias spp, *Salmo gairdneri* and management problems. Tropical Hydro-biological Magazine 22: 157-177.

Loubens, G. & Sarmiento J., 1985. Observations on fish from the Bolivian part of Lake Titicaca. II. Orestias agassii Valenciennes 1846 (Pisces: Cyprinodontidae). Tropical Hydro-biological Magazine 18: 159-171.

Loubens G. 1991. Introduced species. 1. *Salmo gairdneri* (rainbow trout), p. 425-430 in Dejoux C. & Iltis A. (Editions) Lake Titicaca. Summary of current knowledge. ORSTOM – HISBOL, La Paz – Bolivia.

Loza Herrera, S., R. I. Meneses & F. Anthelme, 2015. Plant communities of the bofedales of the Real Mountain Range (Bolivia) under global warming. Ecology in Bolivia, 50 (1): 39-56.

Loza Herrera, S. 2012. Diversity, composition and abundance of macrophytes and filamentous macro-algae in the bofedales of two micro-basins in Tuni-Condoriri and their relationship with the environmental variables in the dry, transitional and humid periods, Department of La Paz. Bachelor thesis, Higher University of San Andrés, La Paz, p. 64.

Luna SM & Valdestamon RR. 2018. *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792). Rainbow trout. Dans : Froese, R. and D. Pauly. Editors. 2018. FishBase. World Wide Web electronic publication (02/2018). (Consultable à l'adresse : [www.fishbase.org](http://www.fishbase.org)) [Consulté le 23 mai 2018].

Mamani P. 2016. Evaluation of native forage resources with satellite images in the Alto Peñas community of the Batallas Municipality, Los Andes Province. Bachelor thesis, Higher University of San Andrés, La Paz, p. 141.

Martin-Torrijos L., Sandoval-Sierra J. V., Muñoz J., Dieguez-Uribeondo J., Bosch J. and Guayasamin.

J. M., 2016. Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) threaten Andean amphibians. *Neotropical Biodiversity*, 2(1): 26-36.

Mealla L. 2013. Since 2015, it is planned to “cut” 100% of the Silala water. *La Razon newspaper*, 17 March 2013. Meneses, R. I. 2012. State of art of the bofedales in the Real Mountain Range in the area that covers the Khara Khota basin up to the Choqueyapu basin. Unpublished technical document. Inter-American Development Bank (IDB), La Paz, p. 74.

Meneses, R., Loza Herrera, S., Lliully A., Palabral A. & Anthelme F., 2014. Methods to quantify the plant diversity and productivity of bofedales in the face of climate change. *Ecology in Bolivia*, 49 (3), 42-55.

Meneses R. I., A. Palabral, A. Lliully, J. Molina, J. Acho, O. Plata, S. Loza & V. Urrelo, 2014. Floristic and limnological characterization of bofedales in the Municipalities of Turco, Pelechuco, Curva, Charazani and Curahuara de Carangas for the second phase of the National Bioculture Program (PNB). Unpublished technical document. Sustainable Water. La Paz, p. 167.

Ministry of Environment and Water, 2009. Red book of the vertebrate wildlife of Bolivia. La Paz, Bolivia.

Ministry of Environment and Water (MMAyA), 2012. RED BOOK of the threatened Flora of Bolivia. Vol. I. Andean Zone. La Paz, p. 600.

Montaje, J. 1977. Outline of the Chilean Prehistory in “PUMAPUNKU Magazine”, Official Magazine of the Aimara Culture Institute, La Paz – Bolivia, p. 69 à 84.

Montes C., Rendon-Martos M., Varela L. and Cappa M. J., 2007. Manual of Mediterranean wetland restoration. Ministry of Environment, Seville.

Muñoz J., 2000. General Geomorphology. Ed. Synthesis S. A. Madrid.

Nelson J. S. 2006. *Fishes of the World* (Fourth Edition). New Jersey. John Wiley and Sons.

Nielsen A. & E. Berberian, 1995. The Mallku Manor Revisited, Contributions to the knowledge of the late pre-Hispanic history of Lipez, in “Archeology Magazine of the Highlands, Inter-Andean Valleys and Lowlands of Bolivia”, *Memoirs of the congress of archeology of Bolivia*, La Paz – Bolivia, p. 145 à 166.

Nielsen, A. E., Vazquez M. M., Avalas J. C. and Angiorama C. I., 1999. Archaeological Surveys in the “Eduardo Abaroa” Reserve (South Lipez, Department of Potosi, Bolivia). Dans : *Relations of the Argentine Society of Anthropology XXIV*, Buenos Aires.

Nielsen, A. 2009. Training occupations in the Altiplano of Lipez-Potosi, Bolivia. In *Journal of Anthropological Texts* Vol. 13, N° 1-2, La Paz – Bolivia, p. 265 à 285.

Orellana, R. Yañez N., Montero Y., Weisner R., Hantke M., Del Castillo L., Rovere & M., 2013. Conflicts and Agreements on Transboundary Waters. Regulatory Frameworks and International Regulatory Practices. Cordillera University – Sustainable Water, La Paz, Bolivia.

Parenti L. R., 1984. A taxonomic revision of the Andean killifish genus *Orestias* (Cyprinodontiformes: Cyprinodontidae) Bull. Amer. Mus. Nat. Hist. 178 : 107-2014.

De Pinna MCC & Wosiacki W. 2003. Family Trichomycteridae (Pencil or parasitic catfishes), p. 270 à 290. Dans : Reis RE, Kullnader (SO) & de Ferraris CJ (Editions) Check List of the Freshwater Fishes of South and Central America. Porto Alegre. PUCRS.

Palabral-Aguilera A., O. Rocha, F. Guerra, G. Siebel, K. Gonzales, A. Lliully, L. Moya and F. Varela, Noviembre 2016. Preliminary Report: Evaluation of the biodiversity of the Silala springs, southwest of Potosi – Bolivia, p. 41. RAMSAR, C. 2005. Ninth meeting of the conference of the Contracting Parties to the Convention on Wetlands.

Rambaud, M., S. Pavoine, N. Machon, J. Moret & I. Combroux, 2009. Does canalization alter spatial and temporal dynamics of macrophyte communities and their physical habitat? *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*, 174(2), 159-172.

Remsen, J. V., Jr., C. D. Cadena, A. Jaramillo, M. Nores, J. F. Pacheco, M. B. Robbins, T. S. Schulenberg,

F. G. Stiles, D. F. Stotz, & K. J. Zimmer. 2018. A classification of the bird species of South America. American Ornithologists' Union.

Riva-Rossi C, Arguinbau M & Pascual M. 2003. The spawning migration of anadromous rainbow trout in the Santa Cruz River, Patagonia (Argentina) through radio-tracking. *Southern Ecology* 13:151- 159.

Robbins S.P. & Coulter M., 2005. Administration. 8th Edition. Mexico: Pearson Education.

Ruthsatz B. 2012. Vegetation and ecology of the high Andean bofedales of Bolivia. *Phytocoecology* 42: 133-179. Santoro, M & A. Romero, 2009. Social interaction in the Late and Late Intermediate Periods, Lluta Valley, Northern Chile, in “Archeology and Ethnohistory an Andean encounter”, Institute of Peruvian Studies, Lima – Peru, p. 81 à 141. Sarmiento J. 1991. Fish, p. 469 à 481 dans : Baudoin M. & Forno E. (Editions) Natural History of a Valley in the Andes: La Paz. La Paz, Bolivia. Quipus Graphics Services.

Sarmiento J. 1992. Aquatic ecosystems and hydro-biological resources, p. 293 à 320 dans : Marconi M. (Edition). Conservation of Biological Biodiversity in Bolivia. CDC-Bolivia/USAID-Bolivia. La Paz, Bolivia.

Sarmiento J. 2006. Fish, p. 162 à 166 dans : Olivera M., Ergueta P. & M. Vilca Sanjines (Editions). Conservation and sustainable development in the southwest of Potosi, Bolivia. Prefecture of the Department of Potosi/TROPIC. La Paz, Bolivia.

Sarmiento J. & Barrera S., 1996. Fish, p. 33 à 65 dans : Erqueta P. & Morales C. (Editions). Red Book of Vertebrates of Bolivia.

Sarmiento et al., 1999. Plan of Action for the Endangered Species of Bolivia.

Secretary of Environment and Natural Resources (SEMARNAP), 2013. Guidelines for a restoration strategy in protected natural areas. National Commission of Natural Protected Areas Secretariat of the Environment and Natural Resources. Camino al Ajusco N° 200 Jardines en la Montaña CP 14210 Tlalpan, Mexico D.F. <http://www.conanp.gob.mx>. SENAMHI, 2017. Continuous monitoring of

levels, flows and provision of meteorological information in the area of the Silala springs, Potosi, p. 55.

SERGEOMIN, 2017. Geological structural mapping of the area surrounding the Silala springs, p. 90.  
SERGEOTECMIN, 2004. Preliminary report on the hydrological and hydro-chemical investigations carried out in the field of Silala, p. 193 à 207.

SERNAP, 2006. Updated Management Plan for the Eduardo Abaroa National Andean Fauna Reserve. Bolivia.

National Service of Geology and Mining, 1996. Geological Letter of Bolivia. Sheet 5927–6027 Inca Hill – Khara Lagoon, Scale 1: 100 000.

National Service of Geology and Mining, 2003. Geological Letter of Bolivia. Sheet 5928–6028 Silala – Sanabria, Scale 1: 100 000.

National Service of Geology and Mining, 2003. Study of Geology, Hydrogeology and Environment of the Area of the Silala Springs (Regional Integration Project) Study of Hydrographic Basins – Basin of the Silala Springs, Basin 20. June 2000-2001.

Squeo F., E. Ibacache, B. Warner, D. Espinoza, R. Aravena & J. Gutierrez, 2006. Productivity and floristic diversity of the Tambo meadow. Geo-ecology of the Andean deserts. The High Mountain of Elqui Valley. CEPEDA P., J. (Edition). Editions of the University of La Serena. La Serena, Chile, p. 325 à 351.

Stotz, D. F., Fitzpatrick, J. W., Parker III, T. A., & Moskovits, D. K. 1996. Neo-tropical birds: Ecology and conservation. University of Chicago Press.

Tchernavin VV (1944b). A revision of the Trichomycterinae based on material preserved in the British Museum (Natural History). Proc. Zool. Soc. London 114: 234-275.

Thornbury W., 1960. Principles of Geomorphology. Kapelus S.A Edition. Buenos Aires.

IUCN, 2017. The IUCN Red List of Threatened Species. Consultable à l'adresse : <http://www.iucnredlist.org>, 2017-3 Version. Downloaded: 27 mai 2018.

UNEP. 2007. Hydropolitical Vulnerability and Resilience along International Waters (Nairobi: UNEP Publications).

Urquidi F. 2004. Report of the trip to Silala. Additional field work, p. 170 à 192.

Valladares, M., Cruz-Jofre F., Barrera S. & Sarmiento J., 2017. Phylogenetic relationships and historical biogeography of the genres *Heleobia* Stimpson, 1865 (Caenogastropoda, Cochliopidae) and *Orestias* Valenciennes, 1839 (Cyprinodontiformes: Cyprinodontidae) of the Andean Altiplano. (Project in execution).

Vila I., Pardo R. & Scott S., 2007. Freshwater fishes of the Altiplano. Aquatic Ecosystems Health & Management 10(2): 201-211.

Villarroel J. 1997. Fodder and nutritional balance in production areas of Ulla Ulla alpacas. Bachelor thesis, Higher University of San Simon, Cochabamba, p. 111.

Willerslev E., Davidson J., Moora et al., 2014. Fifty thousand years of Arctic vegetation and mega-faunal diet. Nature 506: 47-51.

Wurtsbaugh W. A. & Alfaro T. R., 1988. Mass mortality of fishes in Lake Titicaca (Peru-Bolivia) associated with the protozoan parasite *Ichthyophthirius multifiliis*. *Transactions of the American Fisheries Society* 117: 213-217.

Zobel M., Davidson J., Edwards M. E. et al., 2018. Ancient environmental DNA reveals shifts in dominant mutualisms during the Late Quaternary. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/s41467-017-02421-3.

---

**ANNEXE 24**

**DHI, ANALYSE ET ÉVALUATION DE L'ARGUMENTATION OPPOSÉE PAR LE CHILI  
AUX DEMANDES RECONVENTIONNELLES DE LA BOLIVIE  
DANS L'AFFAIRE RELATIVE AU SILALA, MARS 2019**

## TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1. RÉSUMÉ.....	1
2. INTRODUCTION	
2.1. Contexte	
2.2. Structure de la réplique du Chili et du présent rapport	
3. ARGUMENTS ET ÉLÉMENTS DE PREUVE TECHNIQUES PRÉSENTÉS DANS LA RÉPLIQUE DU CHILI	
3.1. Observations concernant l'évaluation par le Chili des points techniques sur lesquels les Parties sont d'accord quant à l'hydrologie du Silala	
3.2. Evaluation des points techniques sur lesquels les Parties sont en désaccord quant à l'hydrologie du Silala	
3.2.1. Effets du drainage artificiel des zones humides, reconnus à l'échelle internationale	
3.2.2. Modèle en champ lointain et bilan hydrique du bassin versant	
3.2.3. Interprétation fondamentale de la géologie et de l'hydrogéologie	
3.2.4. Désaccords concernant le modèle numérique en champ proche	
3.2.5. Analyse des études comparatives des zones humides du Silala effectuées par le Chili	
4. EVALUATION	
5. CONCLUSIONS TECHNIQUES.....	3
6. RÉFÉRENCES.....	5

## 1. RÉSUMÉ

Le DHI a été chargé par le DIREMAR de fournir une réponse technique à un sous-ensemble de questions techniques traitées dans la réplique déposée par la République du Chili (volumes 1 à 3) en février 2019 devant la Cour internationale de Justice dans le cadre du *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)*.

Le DHI s'est limité à formuler des observations sur ces questions. L'absence d'observations sur d'autres parties du document susmentionné ne signifie en aucune façon que le DHI est d'accord avec ce qui est dit dans ces parties.

Le rapport se structure comme suit :

- Chapitre 2 : Contexte et structure
- Chapitre 3 : Arguments et éléments de preuve techniques présentés dans la réplique du Chili
- Chapitre 4 : Evaluation des points forts et des points faibles
- Chapitre 5 : Conclusions techniques et recommandations

Dans les conditions actuelles, l'eau du bassin hydrographique du Silala s'écoule à la fois sous forme d'eaux de surface et d'eaux souterraines. Cependant, le Chili émet l'hypothèse que la ressource hydrique alimentant le bassin du Silala est connue. Les eaux souterraines étant des ressources dites «cachées», il est généralement plus difficile de les quantifier. L'étendue et le volume de l'aquifère qui alimente en eaux souterraines les sources Silala restent inconnus à ce jour.

Les données radiométriques et les temps de parcours estimés des eaux du bassin versant souterrain dont l'existence est supposée indiquent qu'une grande partie des eaux souterraines alimentant actuellement les sources Silala s'est probablement rechargée dans les conditions climatiques qui existaient il y a des milliers d'années. Les données disponibles ne permettent pas d'écarter la possibilité d'une diminution à long terme de la réserve de l'aquifère associée à une recharge actuelle réduite, ce qui est courant dans les Andes. Par conséquent, il n'est pas possible d'affirmer que les débits actuels entrants et sortants de l'aquifère qui alimente les sources Silala sont équilibrés. Il se peut que les apports aux sources Silala aient diminué avec le temps, auquel cas il s'agirait d'une ressource en eaux souterraines non renouvelable.

L'affirmation selon laquelle les «ouvrages n'ont pas une incidence importante sur l'écoulement des eaux de surface» est contredite par les éléments de preuve recueillis sur le terrain, la littérature scientifique et les propres experts du Chili.

Le DHI a souligné que l'évaluation de l'incidence du retrait des canaux comprenait une part d'incertitude, ce qu'admettent également les experts du Chili. Nous convenons que, la limite étant située près des interventions, qui peuvent donc avoir une incidence sur celle-ci, des analyses de sensibilité devraient être envisagées.

Le DHI met en doute la validité du calcul simplifié de l'incidence fait par le Chili et affirme que ce calcul ne permet pas de dire que l'incidence telle qu'évaluée par le DHI est exagérée. L'analyse repose sur l'équation de Darcy, qui est unidimensionnelle et uniquement valide dans des conditions idéalisées que ne remplit pas le Silala. L'aquifère n'est pas homogène. Il est à la fois captif et à nappe libre. L'écoulement des eaux souterraines n'est pas unidimensionnel, mais plutôt fortement tridimensionnel. En particulier, l'approche unidimensionnelle de Darcy ne représente pas correctement les changements observés dans les gradients des eaux souterraines ni, partant, les

écoulements vers la zone d'émergence des sources, et elle ne fait référence à aucune donnée de terrain.

Le Chili souligne l'importance de la géologie tridimensionnelle et extrêmement complexe, mais n'en tient nullement compte dans son analyse simplifiée. C'est là un manque de cohérence évident qui remet en question la validité de son évaluation de l'incidence de la chenalisation.

S'agissant de la géologie et du modèle hydrogéologique en 3-D mis au point par le DHI, le Chili ne voit aucune raison d'intégrer une zone de failles présentant une forte conductivité hydraulique. Il soutient que le modèle hydrogéologique du DHI ne tient pas compte de la variabilité verticale de la perméabilité, en se référant aux conditions d'écoulement relevées dans un forage réalisé du côté chilien. Selon lui, le modèle hydrogéologique du DHI ne tient pas compte non plus des interprétations chiliennes, ni des différences dans la composition chimique et isotopique des eaux souterraines. Le DHI convient que les modèles géologiques et hydrogéologiques utilisant de nombreuses sources de données sont sujets à interprétation. Cependant, les données de terrain étayent son propre modèle hydrogéologique et concordent également avec les informations dont dispose le Chili d'après les forages. L'argument des experts du Chili voulant que rien ne justifie d'intégrer une faille ou une zone fortement fracturée est incorrect. L'affirmation selon laquelle le DHI ne tient pas compte de la variabilité verticale est également incorrecte puisque le modèle numérique comme le modèle conceptuel incluent tous deux l'anisotropie verticale et les variations observées dans la conductivité hydraulique horizontale selon la profondeur.

Nous ne contestons pas la préférence du Chili pour des modèles fondés sur un bilan hydrique souterrain équilibré, avec des limites imposées en amont et des données «connues» quant à la recharge. Cette idée a été envisagée, puis rejetée en raison du manque de données hydrogéologiques concernant le champ lointain et de l'impossibilité, d'après les données disponibles, de définir correctement le bassin versant et les limites de l'aquifère. L'étalonnage des eaux souterraines de l'intégralité du champ lointain par rapport aux quelques données disponibles pour le champ proche exigerait que l'on parte de nombreuses hypothèses quant aux zones de l'aquifère à ce jour non définies.

L'approche technique retenue a donc consisté à recueillir des données hydrogéologiques dans le champ proche et ses environs. Cela a permis de mettre au point un modèle numérique qui a été étalonné par rapport aux données spécifiques de terrain, incluant les paramètres hydrauliques et la répartition des charges à diverses profondeurs. Le modèle en champ proche étalonné reproduit les données de terrain, ce qui améliore sa fiabilité et sa capacité prédictive. Le Chili, en revanche, a choisi d'ignorer le cadre géologique, dont il a pourtant constamment souligné avec force l'importance. Il a ainsi décidé, pour critiquer les résultats du modèle, d'utiliser une solution analytique très simplifiée et non étalonnée dont il admet lui-même qu'elle ne reflète pas les conditions hydrogéologiques du site.

Une analyse de sensibilité et d'incertitude des conditions limites du champ proche pourrait être envisagée.

.....

## 5. CONCLUSIONS TECHNIQUES

Les eaux souterraines émergeant dans le champ proche du Silala (englobant les sources et la chenalisation) sont associées à un aquifère ignimbritique dont l'étendue spatiale et verticale reste inconnue et qui présente des propriétés hydrauliques incertaines et un volume d'eau stockée non quantifié.

Les eaux souterraines émergeant aux sources Silala sont relativement âgées, ce qui indique des temps de résidence longs dans l'aquifère, probablement de plusieurs millénaires. Par conséquent, on ne peut exclure qu'il y ait eu des changements dans la réserve de l'aquifère au fil du temps. Par extension, il se peut que les débits entrants et sortants de l'aquifère ne soient pas équivalents et qu'une partie des eaux soit non renouvelable ou fossile.

Le Chili reconnaît que le réseau de drainage et la chenalisation ont contribué à l'augmentation de l'écoulement de surface, mais il minimise leur importance et la qualifie de «négligeable». L'affirmation selon laquelle les «ouvrages n'ont pas une incidence importante sur l'écoulement des eaux de surface» est contredite par les éléments de preuve recueillis sur le terrain, la littérature scientifique et les propres experts du Chili. L'ampleur exacte des effets sur le débit demeure inconnue, mais elle est clairement supérieure au pourcentage de 1,2 % avancé par le Chili.

Le DHI admet que les limites latérales du modèle en champ proche sont situées près des interventions, qui peuvent donc avoir une incidence sur celles-ci. Des analyses de sensibilité devraient être envisagées pour lever ces incertitudes.

Le DHI met en doute la validité du calcul simplifié de l'incidence fait par le Chili et affirme que ce calcul ne permet pas de dire que l'incidence telle qu'évaluée par le DHI est exagérée. L'analyse repose sur l'équation de Darcy, qui est unidimensionnelle et uniquement valide dans des conditions idéalisées que ne remplit pas le Silala. L'aquifère n'est pas homogène, mais hétérogène et anisotrope, comme le dit le Chili lui-même ailleurs dans ses écritures. L'écoulement des eaux souterraines n'est pas unidimensionnel, mais plutôt fortement tridimensionnel, et l'aquifère est à la fois captif et à nappe libre. En particulier, l'approche unidimensionnelle de Darcy ne représente pas correctement le régime d'écoulement souterrain tridimensionnel vers les sources Silala ni les changements observés dans les gradients des eaux souterraines vers la zone d'émergence.

S'agissant de la géologie et du modèle hydrogéologique en trois dimensions mis au point par le DHI, le Chili ne voit aucune raison d'intégrer une zone de failles et soutient en outre que le modèle ne tient pas compte de l'anisotropie verticale. C'est faux. Le Chili affirme aussi que le modèle-cadre hydrogéologique du DHI ne tient pas compte de ses propres interprétations géologiques les plus récentes. Cependant, ces interprétations concernent des aires généralement éloignées de la zone d'intérêt du modèle et n'ont probablement aucune incidence sur les propriétés hydrauliques à l'échelle du VER<sup>1</sup> ou sur les résultats du modèle pour ce qui concerne les eaux souterraines alimentant les sources et les canaux ou les écoulements transfrontières.

Le modèle conceptuel du DHI part du principe que les eaux souterraines alimentant les zones humides nord et sud ont des temps de résidence différents, ainsi qu'une composition chimique et isotopique associée à des chemins d'écoulement différents dans l'aquifère. Par conséquent, deux chemins d'écoulement ont été conceptualisés : un court, plus local, et un autre long, plus régional. Le Chili donne une interprétation en grande partie similaire, sauf qu'il conclut que le chemin d'écoulement court est lié à un système aquifère perché qui n'a pas été retrouvé en territoire bolivien.

Le Chili affirme que le modèle numérique n'inclut pas les deux différentes sources d'eau mais c'est parce que les deux régimes d'écoulement, celui localisé et celui régional, ont été conceptualisés

---

<sup>1</sup> Volume élémentaire représentatif : le plus petit volume d'un milieu poreux à partir duquel une mesure peut être faite, permettant d'obtenir une valeur représentative de l'ensemble.

comme trouvant chacun leur origine à l'extérieur du champ proche. En outre, le modèle en champ proche visait à simuler les effets liés à la chenalisation et aux modifications apportées par le Chili au système naturel, et non l'origine des eaux des sources.

Nous ne contestons pas la préférence du Chili pour des modèles fondés sur un bilan hydrique souterrain équilibré, avec des limites imposées en amont et des données «connues» quant à la recharge. Cette idée a été envisagée, puis rejetée en raison du manque de données hydrogéologiques concernant le champ lointain et de l'impossibilité, d'après les données disponibles, de définir correctement le bassin versant et les limites de l'aquifère. L'étalonnage des eaux souterraines de l'intégralité du champ lointain par rapport aux quelques données disponibles pour le champ proche exigerait que l'on parte d'un grand nombre d'hypothèses quant aux zones de l'aquifère à ce jour non définies.

L'approche technique retenue a donc consisté à recueillir des données hydrogéologiques dans le champ proche et ses environs et à circonscrire le modèle en champ proche à la zone pour laquelle il existe des informations hydrogéologiques. Cette approche a toutefois deux inconvénients : la zone modélisée n'inclut pas les eaux souterraines sur toute la largeur de l'aquifère, et l'apport au système n'est pas imposé mais est fonction de la condition limite.

## 6. RÉFÉRENCES

- 1) Blann, K. L., Anderson, J. L., Sands, G. R., & Vondracek, B. (2009). Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 39(11), 909-1001.
- 2) Chabreck, R. H. (1988). *Coastal marshes: ecology and wildlife management (Vol. 2)*: U of Minnesota Press.
- 3) Erwin, K. L. (2009). Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and management*, 17(1), 71.
- 4) Evans, M., Burt, T., Holden, J., & Adamson, J. (1999). Runoff generation and water table fluctuations in blanket peat: evidence from UK data spanning the dry summer of 1995. *Journal of Hydrology*, 221(3-4), 141-160.
- 5) Finlayson, C., D'Cruz, R., & Davidson, N. (2005). *Millenium ecosystem assessment. Ecosystems and human well-being: wetlands and water. Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- 6) Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... Gibbs, H. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574.
- 7) Gibbons, J. W., Winne, C. T., Scott, D. E., Willson, J. D., Glaudas, X., Andrews, K. M., ... Tsaliagos, R. N. (2006). Remarkable amphibian biomass and abundance in an isolated wetland: implications for wetland conservation. *Conservation Biology*, 20(5), 1457-1465.
- 8) Holden, J., & Burt, T. P. (2003). Runoff production in blanket peat covered catchments. *Water resources research*, 39(7).
- 9) Holden, J., Evans, M., Burt, T., & Horion, M. (2006). Impact of land drainage on peatland hydrology. *Journal of Environmental Quality*, 35(5), 1764-1778.
- 10) Holden, J., Wallage, Z., Lane, S., & McDonald, A. (2011). Water table dynamics in undisturbed, drained and restored blanket peat. *Journal of Hydrology*, 402(1-2), 103-114.
- 11) Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*: CRC press.
- 12) Lapen, D. R., Price, J. S., & Gilbert, R. (2000). Soil water storage dynamics in peatlands with shallow water tables. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(1), 43-52.
- 13) Luscombe, D. J., Anderson, K., Grand-Clement, E., Gatis, N., Ashe, J., Benaud, P., Brazier, R. E. (2016). How does drainage alter the hydrology of shallow degraded peatlands across multiple spatial scales? *Journal of Hydrology*, 541, 1329-1339.
- 14) Phillips, B., Skaggs, R., & Chescheir, G. (2010). A method to determine lateral effect of a drainage ditch on wetland hydrology: field testing. *Transactions of the ASABE*, 53(4), 1087-1096.
- 15) South, C., Susan, C., Grimmond, B., & Wolfe, C. P. (1998). Evapotranspiration rates from wetlands with different disturbance histories: Indiana Dunes National Lakeshore. *Wetlands*, 18(2), 216-229.
- 16) Sun, G., Noormets, A., Chen, J., & McNulty, S. (2008). Evapotranspiration estimates from eddy covariance towers and hydrologic modeling in managed forests in Northern Wisconsin, USA. *Agricultural and forest meteorology*, 148(2), 257-267.

- 17) U.S. EPA. 2008. Methods for Evaluating Wetland Condition: Wetland Hydrology. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA-822-R-08-024.
  - 18) Whiteley, H. (1979). Hydrologic implications of land drainage. Canadian Water Resources Journal, 4(2), 12-J-40.
-

**ANNEXE 25**

**DHI, ACTUALISATION DES SCÉNARIOS DE LA MODÉLISATION MATHÉMATIQUE  
HYDROLOGIQUE DES EAUX DES SOURCES SILALA PAR UNE ANALYSE  
DE SENSIBILITÉ DES LIMITES DU MODÈLE, AVRIL 2019**

## TABLE DES MATIÈRES

Page

1. RÉSUMÉ .....	1
2. INTRODUCTION	
2.1. Contexte	
2.2. Portée de l'étude	
2.3. A propos du contenu du rapport	
2.4. Hydrologie générale des sources Silala	
3. MÉTHODE DE MODÉLISATION ET MODÈLES APPLIQUÉS	
3.1. Modèle hydrogéologique conceptuel	
3.2. Composition et configuration du modèle numérique appliqué	
3.2.1. Méthode de modélisation	
3.2.2. Exécution des modèles conceptuels	
3.2.3. Etalonnage et performance du modèle	
4. CONDITIONS AUX LIMITES DU MODÈLE EN CHAMP PROCHE DES EAUX SOUTERRAINES	
4.1. Limites à charge imposée (le long des limites supérieures du débit entrant)	
4.2. Limites fermées (où les eaux souterraines s'écoulent parallèlement à la limite)	
4.3. Gradient de nappe phréatique imposé (le long de la limite inférieure du débit sortant)	
4.4. Niveaux piézométriques observés dans les sources Silala	
5. SCÉNARIOS ANALYSÉS PRÉCÉDEMMENT	
6. MÉTHODE RETENUE POUR LES ANALYSES DE SENSIBILITÉ DES CONDITIONS AUX LIMITES	
6.1. Etendue du modèle en champ proche	
6.2. Limite à charge imposée en amont (limite supérieure des variations de l'écoulement)	
6.3. Limite à flux imposé en amont (limite inférieure des variations de l'écoulement)	
6.3.1. Exécution des analyses de sensibilité	
6.4. Estimation moyenne	
6.5. Influence de la limite de flux en aval	
7. RÉSULTATS DES ANALYSES DE SENSIBILITÉ	
7.1. Limite à charge imposée – estimation haute des effets produits	
7.2. Limite à flux imposé – estimation basse des effets produits	
7.3. Plage de sensibilité estimée et observations de l'écoulement avant chenalisation	
7.4. Sensibilité de la condition à la limite en aval	
8. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.....	3
8.1. Contexte	
8.2. Méthode retenue pour les analyses de sensibilité	
8.3. Résultats de l'analyse de sensibilité de la limite en amont	
8.4. Résultats de l'analyse de sensibilité de la limite en aval	

## 9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### FIGURES

Figure 2-1 : Emplacement du système des sources Silala

Figure 2-2 : Etendue approximative du champ proche du Silala (Mulligan et Eckstein, 2011)

Figure 2-3 : Etendue approximative du champ lointain du Silala (bassins versants souterrains susceptibles d'alimenter le système des sources Silala)

Figure 2-4 : Emplacements des forages et courbes isohypses des eaux souterraines dans le champ proche du Silala, déterminées par interpolation des cotes des puits piézométriques et des excavations des zones humides réalisées à des fins d'échantillonnage des sols. N.B. : les courbes tracées à distance des zones humides et des forages sont incertaines (DHI, 2018).

Figure 3-1 : Modèle-cadre hydrogéologique restitué en trois dimensions. La faille de Silala (HGU7) est surlignée en rouge. Les unités restantes sont affichées en transparence pour faciliter la visualisation du sous-sol modélisé.

Figure 4-1 : Cartes piézométriques utilisées pour définir les conditions limites correspondant aux eaux souterraines.

Figure 4-2 : Illustration de la condition aux limites des eaux souterraines

Figure 7-1 : Représentation principale des variations du débit des eaux de surface enregistrées dans le cadre de l'analyse de sensibilité des limites de charge en amont

### TABLEAUX

Tableau 7-1 : Limites extérieures des analyses de sensibilité réalisées pour les conditions limites supérieures à charge imposée ; les résultats sont exprimés en pourcentage des éléments de l'écoulement dans le scénario de référence avec canaux

Tableau 7-2 : Limites extérieures des analyses de sensibilité réalisées pour les conditions limites supérieures à charge imposée ; les résultats sont exprimés sous forme de variations en l/s par rapport aux éléments de l'écoulement dans le scénario de référence avec canaux

Tableau 7-3 : Résultats des analyses de sensibilité du gradient aval des eaux souterraines

## 1. RÉSUMÉ

Le présent rapport décrit les analyses de sensibilité des conditions aux limites du modèle numérique intégré des eaux de surface et souterraines des sources Silala, en s'intéressant plus particulièrement à l'incidence des limites modélisées sur les résultats obtenus.

Faute de données hydrogéologiques recueillies au-delà des zones humides, et l'objectif étant d'évaluer les effets de la chenalisation, le modèle ne porte que sur une zone relativement proche des sources Silala. Les niveaux des eaux souterraines observés ont été utilisés comme conditions aux limites du modèle. Il s'est toutefois avéré que les limites retenues étaient influencées par les changements produits par la suppression des canaux et qu'elles auraient donc une incidence sur les résultats correspondant à une situation où les canaux ont été supprimés. Il convient donc de tenir compte des facteurs de sensibilité et d'incertitude dans l'examen des résultats du scénario de référence et du scénario «sans canal» ou «sans perturbations».

Les analyses de sensibilité des limites du modèle effectuées dans le cadre du présent projet s'intéressent principalement à l'incidence de ces limites sur la répartition entre eaux souterraines et eaux de surface en l'absence de canaux. Grâce à une série de simulations de la sensibilité des conditions aux limites, l'étude a permis de définir une fourchette des effets produits par la chenalisation, mesurés par des variations du débit des eaux de surface et des eaux souterraines par rapport aux conditions actuelles avec canaux.

Deux analyses distinctes ont été effectuées :

- Une analyse de la sensibilité des limites en amont ;
- Une analyse de la sensibilité des résultats à des modifications de la limite de l'écoulement en aval, le long de la frontière avec le Chili.

*En ce qui concerne les limites en amont*, nous avons choisi d'encadrer les résultats possibles de la modélisation entre deux séries d'hypothèses — chacune étant considérée comme représentant l'estimation basse ou l'estimation haute des variations de l'écoulement par rapport à la situation actuelle de référence, à supposer que les canaux soient supprimés et que les zones humides soient restaurées.

En postulant qu'aucun changement ne se produise à la limite, les effets sur les écoulements de surface seraient maximums, si bien que cette analyse représente l'estimation haute. Cela correspond aux simulations déjà décrites dans l'étude initiale (DHI, 2018).

Afin de déterminer dans quelles conditions limites la suppression des canaux aurait l'incidence la plus faible (estimation basse), on suppose que le débit dans le champ proche serait le même avec ou sans canaux.

*La limite en aval du modèle* contrôle l'écoulement transfrontière et a un effet sur le rapport entre le débit des eaux de surface et celui des eaux souterraines. Cette limite suppose un gradient imposé pour les eaux souterraines (versant imposé pour les charges souterraines). La sensibilité des résultats du modèle à cette limite a été analysée en faisant varier le gradient de +/- 20 % de la valeur d'étalonnage établie à 0,05.

### Résultats

L'analyse de sensibilité des conditions aux limites en amont a permis d'obtenir les résultats suivants concernant l'écoulement transfrontière dans le scénario sans canaux :

- Dans les cas où la sensibilité aux limites a été testée, la simulation a abouti à une réduction de 11 à 33 % du débit des eaux de surface transfrontière en cas de suppression des canaux.
- Le débit des eaux souterraines augmenterait de 4 à 10 % par rapport à l'écoulement modélisé dans la situation actuelle.
- L'évapotranspiration des zones humides, qui est bien mieux définie, augmenterait de 28 à 34 % par rapport aux valeurs de référence, soit entre 3 et 3,4 l/s.

Les valeurs additionnées ne donnent pas une somme nulle car seule une des conditions aux limites analysées part du principe que le débit serait le même dans le champ proche avec et sans canaux, tandis que l'autre postule qu'une partie du flux d'origine contournerait le champ proche en s'écoulant dans les couches souterraines environnantes.

La plage de sensibilité de l'écoulement des eaux de surface à la frontière tel qu'évalué dans le scénario «sans canal» est assez large et la présente analyse ne permet pas de quantifier la valeur du débit la plus plausible dans cet intervalle.

Cependant, d'après les seules observations de terrain de la situation avant chenalisation (Fox, 1922), le débit était de 131 l/s, soit 18 % de moins que les 160 l/s mesurés en 2017 au niveau du dessableur (supposément situé au même endroit). Une réduction de 18 % est relativement proche du milieu de la plage de sensibilité.

Le gradient aval influence effectivement le rapport entre le débit des eaux souterraines et celui des eaux de surface.

Dans la situation «sans canal», l'application d'un gradient de charge 20 % supérieur le long de la limite basse fait augmenter la part des eaux souterraines à la frontière au détriment de celle des eaux de surface. Plus précisément, on obtient alors une réduction de 7 % du débit de surface et une hausse de 8 % du débit souterrain à la frontière. L'évapotranspiration reste quasiment inchangée (on enregistre une baisse de moins de 1 %). L'application d'un gradient 20 % inférieur en aval a l'effet inverse.

Si, dans ce modèle, le débit s'accroît avec le gradient aval, tant dans la situation actuelle de référence (avec canaux) que dans la situation sans canaux, l'incidence du gradient sur l'apport modélisé dans ces deux situations reste néanmoins faible (moins de 1 %).

.....

## **8. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS**

### **8.1 Contexte**

Un modèle numérique intégré des eaux de surface et souterraines a été établi pour le champ proche des sources Silala et étalonné avec succès à l'aide des données d'observations relatives à l'écoulement des eaux de surface le long des canaux et aux niveaux des eaux souterraines dans cette zone.

La configuration et les paramètres de modélisation sont fondés sur un modèle conceptuel hydrogéologique en trois dimensions qui associe les informations recueillies dans le cadre d'une étude de terrain hydrogéologique intensive exécutée par la DIREMAR en 2017 à des mesures de la géorésistivité et à une analyse cartographique détaillée de la géologie superficielle de la zone du Silala.

Le modèle existant illustre donc les conditions actuelles du champ proche des sources Silala selon le modèle conceptuel. On considère en outre que, étant fondés sur les mesures relevées sur le terrain, le modèle en champ proche et ses paramètres permettent de simuler les conditions hydrologiques d'une situation sans chenalisation.

En l'absence de données hydrogéologiques relevées au-delà des zones humides, le modèle se limite à une zone relativement proche des sources Silala, où les niveaux des eaux souterraines observés ont été utilisés comme conditions aux limites du modèle. Il a toutefois été constaté que les limites retenues étaient influencées par les changements produits par la suppression des canaux. Les résultats du modèle sont donc sensibles aux conditions limites.

Il convient donc de tenir compte des facteurs de sensibilité et d'incertitude dans l'examen des résultats du scénario de référence et du scénario «sans canal». La présente analyse s'intéresse spécifiquement à la sensibilité aux limites du modèle et ne reflète pas l'ensemble des sensibilités et des incertitudes. Si l'accent est mis sur les conditions limites des eaux souterraines, c'est parce que les sources Silala et le système des eaux de surface sont entièrement alimentés par les eaux souterraines d'un bassin versant mal délimité situé en amont. Le modèle en champ proche, qui comprend les sources, les zones humides et les canaux, s'étend jusqu'à la frontière entre la Bolivie et le Chili. Il ne représente toutefois pas un ensemble à bilan hydrique fermé, mais utilise des limites de l'apport en eaux souterraines dépendantes de la charge dans une zone restreinte, ce qui introduit une sensibilité potentielle s'agissant des principaux résultats obtenus.

Les analyses de sensibilité des limites du modèle effectuées dans le cadre du présent projet s'intéressent principalement à l'incidence de ces limites sur la répartition entre eaux souterraines et eaux de surface en l'absence de canaux. Grâce à une série de simulations de la sensibilité des conditions aux limites, l'étude a permis de définir une fourchette des effets produits par la chenalisation, mesurés par des variations du débit des eaux de surface et des eaux souterraines par rapport aux conditions actuelles avec canaux.

### **8.2 Méthode retenue pour les analyses de sensibilité**

Deux analyses distinctes ont été effectuées :

- Une analyse de la sensibilité des limites en amont, et
- Une analyse de la sensibilité des résultats à des modifications de la limite de l'écoulement en aval, le long de la frontière avec le Chili.

### **Limites en amont**

Un modèle hydrogéologique portant sur une zone considérablement plus vaste que le champ proche aurait pu être utile pour estimer à quelle distance des zones humides du Silala les charges souterraines se trouveraient sensiblement modifiées par la suppression des canaux. En raison du manque de données et des délais courts dont on a disposé dans le cadre du présent projet, il n'a pas été possible d'établir et d'étalonner un tel modèle.

Nous avons donc choisi une méthode consistant à encadrer les résultats possibles de la modélisation entre deux séries d'hypothèses — chacune étant considérée comme représentant l'estimation basse ou l'estimation haute des variations de l'écoulement par rapport à la situation actuelle de référence.

L'utilisation de charges souterraines imposées en amont aboutit aux variations les plus importantes du débit entre la situation de référence et les autres scénarios — ce qui représente donc l'estimation haute. Il s'agit de la simulation déjà décrite dans l'étude initiale.

Pour déterminer dans quelles conditions limites la suppression des canaux aurait l'incidence la plus faible par rapport aux conditions de référence actuelles, la méthode suivante a été adoptée :

- On postule que le débit dans le champ proche sans les canaux serait le même que dans la situation [avec] canaux.
- Cette situation est obtenue en faisant augmenter la charge le long de la limite de sorte que la répartition entre les eaux souterraines dans le modèle reste la même que dans le scénario de référence.

### **Limite en aval**

A l'extrémité aval du modèle, on a utilisé une limite à gradient imposé. La limite en aval a une incidence sur les niveaux des eaux souterraines en amont de la limite et donc sur la répartition de l'écoulement transfrontière total entre eaux souterraines et eaux de surface. La sensibilité des résultats du modèle à cette limite a été analysée en faisant varier le gradient de +/- 20 % de la valeur d'étalonnage établie à 0,05.

## **8.3 Résultats de l'analyse de sensibilité de la limite en amont**

L'analyse de sensibilité des conditions aux limites en amont a abouti aux résultats suivants en ce qui concerne l'écoulement transfrontière dans le scénario sans canaux :

- Dans les cas où la sensibilité aux limites a été testée, la simulation a abouti à une réduction de 11 à 33 % du débit des eaux de surface transfrontière en cas de suppression des canaux.
- Le débit des eaux souterraines dans la zone modélisée augmenterait de 4 à 10 % par rapport à la situation actuelle.
- L'évapotranspiration des zones humides, qui est bien mieux définie, augmenterait de 28 à 34 % par rapport aux valeurs de référence, soit entre 2,8 et 3,4 l/s.

Les valeurs additionnées ne donnent pas une somme nulle car seule une des conditions aux limites analysées part du principe que le débit serait le même dans le champ proche avec et sans canaux, tandis que l'autre postule qu'une partie du flux d'origine contournerait le champ proche en s'écoulant dans les couches souterraines environnantes.

La plage de sensibilité de l'écoulement des eaux de surface à la frontière tel qu'évalué dans le scénario «sans canal» est assez large et la présente analyse ne permet pas de quantifier la valeur du débit la plus plausible dans cet intervalle.

D'après les observations de terrain de la situation avant chenalisation (Fox, 1922), le débit était de 131 l/s, soit 18 % de moins que les 160 l/s mesurés en 2017 (DHI, 2018), ce qui représente une réduction proche du milieu de la plage de sensibilité et donc une mesure valable des effets de la suppression des canaux.

#### **8.4 Résultats de l'analyse de sensibilité de la limite en aval**

Le débit des eaux souterraines à la limite aval du modèle, située à la frontière entre la Bolivie et le Chili, dépend du modèle hydrogéologique, des propriétés de l'unité hydrogéologique, du gradient de nappe phréatique, de la largeur de la section d'écoulement des eaux souterraines considérée et des conditions hydrogéologiques en aval au Chili. La limite est décrite par un gradient de nappe phréatique et l'essai porte sur la sensibilité aux variations de ce gradient.

Le gradient aval influence effectivement le rapport entre le débit des eaux souterraines et celui des eaux de surface dans la situation sans canal. Ainsi, l'application d'un gradient de charge 20 % supérieur le long de la limite basse fait augmenter la part des eaux souterraines à la frontière au détriment de celle des eaux de surface. Plus précisément, on obtient alors une réduction de 7 % du débit de surface et une hausse de 8 % du débit souterrain à la frontière. L'évapotranspiration reste quasiment inchangée (on enregistre une baisse de moins de 1 %).

L'application d'un gradient 20 % inférieur en aval a l'effet inverse.

Si dans ce modèle, le débit s'accroît avec le gradient aval, tant dans la situation actuelle de référence (avec canaux) que dans la situation sans canaux, l'incidence du gradient sur l'apport modélisé dans ces deux situations reste néanmoins faible (moins de 1 %).

---