

Arianne Phosphate Inc

MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE

PROJET DE MINE D'APATITE
LAC À PAUL (QUÉBEC)

Arianne Phosphate Inc

MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE

PROJET DE MINE D'APATITE
LAC À PAUL (QUÉBEC)

Projet n° : 141-24652-00
Date : JANVIER 2015



—
WSP Canada Inc.
5355, boul. des Gradins
Québec (Québec) G2J 1C8

Téléphone : 418-623-2254
Télécopieur : 418-623-1857
www.wspgroup.com



SIGNATURES

PRÉPARÉ PAR



Daniel Lemaire, ing. M. Sc.
N° de membre OIQ : 146940

RÉVISÉ PAR



2015-01-29

Andréanne Hamel, ing. M. Sc.
N° de membre OIQ : 128249

ÉQUIPE DE RÉALISATION

ARIANNE PHOSPHATE INC.

Directeur Environnement et Développement durable : Éric Arseneault

WSP CANADA INC. (WSP)

Directeur de projet : Jean Lavoie,

Chargée de discipline (hydrogéologie) : Andréanne Hamel, ing. M. Sc.

Modélisation numérique : Daniel Lemaire, ing. M. Sc.

Collaboration : Isabelle Hemming, M. A. Sc

Rédaction : Andréanne Hamel, ing. M. Sc.
Daniel Lemaire, ing. M. Sc.

Cartographie : Mélissa Gaudreault
Jean-Marc Tremblay

Traitement de texte et édition : Linette Poulin

Référence à citer :

WSP. 2015. *Modélisation hydrogéologique. Futur site minier d'Arianne Phosphate. Lac à Paul.* Rapport produit pour Arianne Phosphate Inc. 107 pages et annexes.

TABLE DES MATIÈRES

SIGNATURES.....	I
ÉQUIPE DE RÉALISATION.....	I
TABLEAUX.....	VII
CARTES.....	IX
FIGURES.....	XI
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 MISE EN CONTEXTE.....	1
1.2 OBJECTIFS.....	1
2 MÉTHODOLOGIE.....	3
2.1 ÉTAPES REQUISES.....	3
2.2 CHOIX DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT.....	4
3 MODÈLE CONCEPTUEL.....	5
3.1 TOPOGRAPHIE.....	5
3.2 HYDROLOGIE.....	6
3.2.1 Lacs.....	6
3.2.2 Cours d'eau.....	6
3.3 UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES.....	8
3.3.1 Unité 1 (2Be/2A et 9): Dépôts fluvio-glaciaires/juxtaglaciaires/éoliens.....	9
3.3.2 Unité 2 (1A/1AR) : till.....	10
3.3.3 Unité 3 : Roc fracturé.....	11
3.3.4 Unité 4 : Roc sain.....	11
3.4 ÉLÉMENTS STRUCTURAUX.....	12
3.5 CHARGES HYDRAULIQUES.....	12
3.6 ZONES DE RECHARGE.....	12
4 CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT.....	15
4.1 ÉTENDUE DU DOMAINE ET CONSTRUCTION DU MAILLAGE.....	15
4.1.1 Discrétisation horizontale du maillage.....	15
4.1.2 Définition des différentes couches du modèle.....	15

TABLE DES MATIÈRES (suite)

4.2	CONDITIONS LIMITES	17
4.2.1	Conditions limites externes.....	17
4.2.2	Conditions limites internes.....	17
4.2.2.1	Type charge constante.....	17
4.2.2.2	Type drain	17
5	CALIBRATION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT.....	19
5.1	OBJECTIFS DE CALIBRATION.....	19
5.2	MÉTHODOLOGIE DE CALIBRATION.....	19
5.3	RÉSULTATS DE LA CALIBRATION	20
5.3.1	Charges hydrauliques.....	20
5.3.2	Débits de base-cours d'eau	20
5.3.3	Bilan hydrique	27
5.4	CONDITIONS FINALES DU MODÈLE CALIBRÉ.....	27
5.4.1	Conductivité hydraulique	27
5.4.2	Recharge	28
5.5	ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES.....	29
5.6	MODÉLISATION DE LA FOSSE.....	34
5.6.1	Discrétisation horizontale.....	34
5.6.2	Définition des différentes couches du modèle.....	34
5.6.3	Propriétés hydrauliques	34
5.6.4	Conditions limites.....	34
5.6.5	Recharge	35
6	RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES.....	37
6.1	MODIFICATION DE LA PIÉZOMÉTRIE RÉGIONALE.....	37
6.2	DÉBITS DE DÉNOYAGE	38

TABLE DES MATIÈRES (suite)

6.3	IMPACTS SUR LES EAUX DE SURFACE	39
6.3.1	Impacts sur les cours d'eau	39
6.3.2	Impacts sur les lacs	42
6.4	ÉTUDE DE SENSIBILITÉ SUR LES RÉSULTATS	45
7	CONCLUSION.....	49
8	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	53

TABLEAUX

Tableau 1	Élévations des lacs	7
Tableau 2	Liste des stations et débit estimé.....	8
Tableau 3	Conductivité hydraulique, modèle conceptuel	10
Tableau 4	Liste des élévations piézométriques ciblées.....	13
Tableau 5	Sommaire des différentes couches	16
Tableau 6	Élévation des points d'observation sélectionnés à partir des profondeurs des principales fractures répertoriées.....	21
Tableau 7	Statistiques de calibration (charges hydrauliques)	22
Tableau 8	Calibration des charges hydrauliques.....	24
Tableau 9	Comparaison des débits de base estimés et simulés.....	25
Tableau 10	Statistiques de calibration (débits de cours d'eau)	27
Tableau 11	Bilan hydrique	27
Tableau 12	Conductivités hydrauliques des quatre unités hydrogéologiques obtenues suite à la calibration	28
Tableau 13	Recharge obtenue suite à la calibration	28
Tableau 14	Résultats de l'analyse de sensibilité sur les charges hydrauliques	31
Tableau 15	Résultats de l'analyse de sensibilité sur les débits de base	33
Tableau 16	Débits de dénoyages anticipés.....	38
Tableau 17	Valeurs des débits de base simulées (stations) à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif,	40
Tableau 18	Valeurs des débits de base simulées (station) à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif, fosse 25 ans.....	41
Tableau 19	Impact de la réduction des débits de base sur les débits moyens des cours d'eau dans le secteur de la fosse (bassins versants actuels et modifiés).....	42
Tableau 20	Variation des apports d'eau souterraine à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif, fosse 8 ans.....	43
Tableau 21	Variation des apports d'eau souterraine à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif, fosse 25 ans.....	44
Tableau 22	Variation des débits de dénoyage selon le scénario	46

CARTES

Carte 1	Localisation régionale et limite du domaine modélisé	57
Carte 2	Localisation des installations et des sondages	59
Carte 3	Topographie interpolée	61
Carte 4	Bassins versants et hydrologie du domaine d'étude.....	63
Carte 5	Géologie régionale.....	65
Carte 6	Dépôts quaternaires	67
Carte 7	Épaisseur des dépôts de surface (interpolation)	69
Carte 8	Discretisation horizontale du maillage	71
Carte 9	Distribution des valeurs de conductivité hydraulique couche 1, modèle calibré	73
Carte 10	Distribution des valeurs de conductivité hydraulique couche 2, modèle calibré	75
Carte 11	Distribution des valeurs de conductivité hydraulique couche 3 à 6, modèle calibré	77
Carte 12	Distribution des valeurs de conductivité hydraulique couche 7 à 30, modèle calibré	79
Carte 13	Conditions limites, couche supérieure du modèle calibré.....	81
Carte 14	Conditions limites, couches 2-30 du modèle calibré.....	83
Carte 15	Élévations piézométriques, modèle calibré	85
Carte 16	Distribution des zones de recharge, modèle calibré	87
Carte 17	Conditions limites, couche supérieure du modèle modifié (fosse 25 ans)	89
Carte 18	Élévations piézométriques du toit du roc, dénoyage finale (25 ans)	91
Carte 19	Rabattement du niveau d'eau, dénoyage finale (25 ans)	93
Carte 20	Élévations piézométriques du toit du roc, dénoyage (8 ans)	95
Carte 21	Rabattement du niveau d'eau, dénoyage 8 ans	97
Carte 22	Impact sur les cours d'eau et les lacs (dénoyage final 25 ans)	99

FIGURES

Figure 1	Résultats de la calibration des charges hydrauliques.....	23
Figure 2	Comparaison des débits de base estimés et simulés.....	26
Figure 3	Modèle conceptuel en 3 dimensions	103
Figure 4	Distribution des charges hydrauliques, coupe A-A”	104
Figure 5	Distribution des charges hydrauliques, coupe B-B”	105
Figure 6	Étude de sensibilité (conductivité hydraulique).....	106
Figure 7	Étude de sensibilité (recharge, épaisseur roc fracturé)	107

1 INTRODUCTION

1.1 MISE EN CONTEXTE

Le projet minier du lac à Paul est situé dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, soit à environ 200 km au nord de la ville de Saguenay. Les coordonnées géographiques du centre du projet sont : 49° 54' 12" de latitude Nord et 70° 44' 04" de longitude Ouest. La carte 1 permet de visualiser la localisation régionale du projet. La carte 2 présente la compilation des sondages effectués qui serviront à la construction du modèle.

Les installations minières seront entièrement sur le site de la pourvoirie du Lac Paul, à l'intérieur du lot 5000089-453. Le projet se retrouve dans un territoire de chevauchement entre les Nistassinan des Pekuakamiulnuatsh (Mashteuiatsh) et de Pessamit (Betsiamites).

Des études hydrogéologiques ont été réalisées entre 2012 et 2014, incluant des travaux de modélisation numérique. Afin de préciser les impacts anticipés sur le milieu environnant, des travaux de modélisation numérique additionnels étaient requis. Ce rapport présente donc les résultats de l'analyse effectuée. La compilation de toutes les données hydrogéologique a été présentée dans l'étude hydrogéologique réalisée en 2014 (WSP, 2014).

Les travaux additionnels de modélisation numérique ont été effectués afin d'étudier les impacts de la future mine à ciel ouvert sur le régime hydrogéologique environnant.

1.2 OBJECTIFS

WSP Canada Inc. (WSP) a été mandatée pour réaliser une modélisation hydrogéologique, afin de répondre aux questions soulevées par les différents intervenants en lien avec les eaux souterraines.

Les principaux objectifs de la modélisation numérique de l'eau souterraine sont les suivants :

- établir les paramètres hydrogéologiques théoriques du site et réaliser un modèle numérique d'écoulement en régime permanent. Calibrer ce modèle à partir des niveaux d'eau souterraine mesurés à l'endroit de 55 puits;
- utiliser le modèle numérique calibré afin de simuler l'excavation et le dénoyage de la fosse à différentes étapes;
- étudier l'effet du cône de rabattement généré par le dénoyage;
- évaluer les impacts sur les lacs environnants ainsi que sur les cours d'eau;
- effectuer une étude de sensibilité liée à la variation des valeurs de recharge et de conductivités hydrauliques des unités géologiques.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 ÉTAPES REQUISES

Les travaux de modélisation de ce projet incluent les différentes étapes suivantes :

- élaboration du modèle conceptuel initial basé sur les données disponibles;
- identification des éléments hydrologiques, tels que les bassins versants, les zones d'infiltration des eaux souterraines et les résurgences ainsi que les cours d'eau;
- identification du contexte géologique et des propriétés hydrogéologiques des unités hydrostratigraphiques;
- détermination de l'étendue de la zone d'étude;
- construction du modèle hydrogéologique numérique afin d'obtenir une représentation le plus fidèle possible au modèle conceptuel élaboré;
- analyse du mouvement régional de l'eau souterraine incluant les élévations de l'eau souterraine;
- évaluation de l'aire d'influence du dénoyage de la fosse.

Le modèle hydrogéologique a été élaboré à partir des études antérieures et des différentes cartes hydrogéologiques. Voici un résumé des données utilisées dans ces différentes études.

- données digitalisées d'élévation topographique (BDTQ, 1:20 000, MRN, 2007);
- données digitalisées d'élévation topographique (LIDAR, Rousseau Babin, 2012);
- données digitalisées d'élévation bathymétrie des principaux lacs (DESSAU-NUTSHIMIT, 2012).
- données digitalisées des dépôts quaternaires (MFFP, feuillet 22E/15, échelle 1 : 50 000, 1993)
- données digitalisées des lacs et cours d'eau (207090-19468-3200-CI-DGA-0001, revF, Cegertec WorleyParsons, 2012);
- cartes géologiques (SIGEOM, 2014);
- Données météorologiques station Péribonca (1961-1990), Environnement Canada;
- Étude hydrogéologique (WSP, 2014; LVM, 2014);
- Étude hydrologique (GENIVAR, 2013a);
- Études géotechniques (LVM, 2013; Journeaux ass., 2013);
- Description du milieu (DESSAU-NUTSHIMIT, 2012);
- Design de la fosse à différentes périodes (Arianne Phosphate inc).

2.2 CHOIX DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

Pour simuler l'écoulement d'eau souterraine, un code numérique est requis pour reproduire les patrons d'écoulement. Le modèle numérique sélectionné pour cette étude est « FEFLOW », version 6.2 (Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System ; Trefry et Muffels, 2007, Diersch, 2010). La résolution des équations de l'écoulement en milieu saturé ou en milieu non saturé dans FEFLOW utilise la technique numérique des éléments finis. FEFLOW permet de produire des modèles numériques d'écoulement de l'eau souterraine en trois dimensions, autant pour les régimes permanent et transitoire de l'eau souterraine dans des aquifères captifs et semi-captifs. Il est particulièrement approprié pour des systèmes aquifères complexes impliquant plusieurs unités hydrostratigraphiques et des conditions aux limites variables. Le modèle permet d'adapter facilement le maillage à une topographie accidentée et la prise en compte de discontinuités est également facilitée par cette propriété. FEFLOW a largement été utilisé dans le passé pour modéliser l'écoulement souterrain dans le cadre de projets miniers.

Dans le cas de la présente étude, des conditions en régime permanent ont été modélisées.

Approche avec un milieu poreux équivalent

La modélisation numérique d'écoulement d'eau souterraine à travers un milieu poreux saturé simule généralement les mouvements de l'eau dans un milieu complètement saturé comme le sable et le gravier, lesquels ont des distributions prévues de porosité et de conductivité hydraulique. Dans un substrat rocheux fracturé, le mouvement de l'eau souterraine est généralement plus grand à l'intérieur de l'endroit fracturé que dans la matrice qui l'entoure. Dans l'hypothèse que la densité des fractures et que la connectivité hydraulique de ces fractures sont suffisantes, le roc fracturé peut être simulé comme un « milieu poreux équivalent ». Le modèle est donc construit pour simuler l'écoulement à travers un milieu poreux avec des propriétés hydrauliques adéquates pour des milieux fracturés. Sur une plus petite échelle, les mouvements de l'eau souterraine présents et ceux simulés peuvent être différents, et ce, à l'intérieur de la zone où les mouvements de l'eau souterraine sont dominés par quelques fractures. Dans les zones fracturées avec une plus grande densité de fractures et avec des simulations sur une plus grande échelle, l'approche du milieu poreux équivalent fournit une représentation raisonnable du mouvement de l'eau souterraine, laquelle est acceptée par l'industrie.

3 MODÈLE CONCEPTUEL

Trois étapes clés sont présentes lors de la formulation du modèle conceptuel (Anderson et Woessner, 1992) :

- définir les unités hydrostratigraphiques;
- définir les systèmes aquifères et les systèmes d'eau de surface;
- analyser les éléments du bilan hydrique.

Le modèle conceptuel et la future construction d'un modèle numérique impliquent quelques simplifications et classifications des données dans le but de représenter les systèmes aquifères avec assez de détails pour fournir des résultats raisonnablement représentatifs. Finalement, l'exactitude du modèle dépendra de la capacité du modèle théorique à établir des conditions observées approximatives. Des statistiques de calibration permettront de vérifier si le modèle conceptuel établi simule de façon satisfaisante les conditions observées.

Le contexte hydrogéologique régional de la région du lac à Paul se définit par un socle rocheux peu perméable recouvert de dépôts glaciaires, juxtaglaciaires et fluvioglaciaires de perméabilité variable. Étant donné la faible perméabilité du milieu rocheux, l'écoulement s'effectuera de façon préférentielle à sa surface et le long des zones de fractures, suite à son infiltration au roc.

Dans l'ensemble, l'écoulement souterrain devrait s'écouler de façon similaire à la topographie de surface (DESSAU-NUTSHIMIT, 2012).

3.1 TOPOGRAPHIE

La topographie du territoire à l'étude est principalement de nature montagneuse, avec quelques secteurs ayant un relief plus plat, notamment dans le bassin versant du lac Épinette et de la rivière Naja (en amont du lac à Paul).

L'élévation topographique est d'environ 460 masl dans le secteur de la fosse et de 410 masl dans le secteur du parc à résidus. L'altitude maximale de cette ancienne surface d'érosion dans la région est d'environ 540 m, le lac à Paul se situant à 401 m et la rivière Manouane entre 370 et 400 m d'élévation, respectivement.

La topographie de surface du modèle a été interpolée à partir des données suivantes :

- données digitalisées d'élévation topographique (BDTQ, 1:20 000, MRN, 2007);
- données digitalisées d'élévation topographique (LIDAR, Rousseau Babin, 2012);
- données digitalisées d'élévation bathymétrie des principaux lacs (DESSAU-NUTSHIMIT, 2012).

Les élévations des fonds des lacs ont été interpolées à l'aide des données bathymétriques mesurées en 2012 (DESSAU-NUTSHIMIT, 2012). Les données interpolées sont présentées sur la carte 3.

3.2 HYDROLOGIE

Le réseau hydrographique de la zone à l'étude comporte une forte densité de cours d'eau et de lacs se déversant dans le lac à Paul au sud et à l'ouest et dans la rivière Manouane au nord-est. Selon les normales climatiques compilées par Environnement Canada pour la station Péribonca (1961-1990), les précipitations totales annuelles moyennes sont de 835 mm (GENIVAR, 2013a).

Dans l'ensemble, l'eau qui ruisselle à la surface dans le secteur de la fosse s'écoule vers le lac à Paul, alors que dans le secteur du parc à résidus, l'eau s'écoule vers la rivière Naja.

3.2.1 LACS

La carte 4 présente les limites des sous-bassins versants tirées de l'étude hydrologique réalisée en 2013 (GENIVAR, 2013a), l'élévation des lacs estimée à partir du relevé topographique du LIDAR, ainsi que la position des cours d'eau.

Le tableau 1 présente le relevé des élévations, des profondeurs (min et max) des principaux lacs dans le secteur (DESSAU-NUTSHIMIT, 2012)).

3.2.2 COURS D'EAU

Dans le cadre de l'étude hydrologique réalisée en 2013 (GENIVAR, 2013a), les débits d'étiage des cours d'eau ont été évalués selon deux méthodes :

- la transposition de débits d'étiage spécifiques établis par le CEHQ pour certains cours d'eau situés dans la même région hydrographique que la zone d'étude;
- l'application de formules développées par le CEHQ permettant d'évaluer le débit d'étiage d'un cours d'eau en fonction de la superficie de son bassin versant.

Tableau 1 Élévations des lacs

NOM DU LAC	NIVEAU D'EAU (m)	PROFONDEUR MOYENNE (m)	PROFONDEUR MAXIMUM (m)
Lac B	410	2,3	6,4
Lac C	438	4,6	8,5
Lac Coyote	441,6	3,6	11,5
Lac D	445,2	1,1	1,6
Lac des Épinette	406	1,8	11,6
Lac F	408	1,1	0,4
Lac Grizzli	408	2,9	15,8
Lac Kodiak	436	1,5	3,1
Lac Loup	427	6,8	21,7
Lac Lynx	410,5	0,9	1,3
Lac Ours Polaire	442	8	3,4
Lac à Paul	401,7	5,8	49,7
Lac Siamois	401	3,1	7,3
Lac de l'Ourson	407	1,9	8,9
Lac G	408	NM	NM
Lac H	407	NM	NM
Lac Merveille	427	NM	NM
Lac A	443	NM	NM
Lac de la Tanière	425	NM	NM
Lac 761	410	NM	NM

NM : non-mesuré

Puisque les débits d'étiage des cours d'eau ont été estimés sans aucune donnée d'observation locale, les résultats de débits d'étiage estimés sont des ordres de grandeur et devraient être considérés avec prudence et discernement (GENIVAR, 2013a). Ces valeurs estimées peuvent tout de même servir de cible à atteindre pour la calibration du modèle afin de s'assurer que les débits de base simulés obtenus respectent minimalement les ordres de grandeur des estimations des méthodes hydrologiques.

À partir des différentes stations de mesures de débits, 31 stations ont été choisies afin de servir de cibles à atteindre pour la calibration des débits simulés. Le tableau 2 présente la liste des stations choisies ainsi que les valeurs des débits estimés utilisées. La localisation des différentes stations est présentée sur la carte 4.

Tableau 2 Liste des stations et débit estimé

STATION	ID BASSIN VERSANT	DÉBIT (Q10.7 [ESTIVAL]) (m3/j)
P1	4	211,5
P2	3	203,04
P3	1	304,56
P4	1+2	642,96
P5	25	296,1
P6	24	329,94
P7	28	67,68
P8	27	42,3
P9	1+2+26	846
P10	5	93,06
P11	21	431,46
P12	22	186,12
P13	18	439,92
P14	19	634,5
P15	16+19+18	1979,64
P16	20	118,44
P17	23	482,22
P20	13	143,82
M5	6	177,66
M6	6+7	905,22
M7	6+7+9	1243,62
M8	10	499,14
M9	11	549,9
M10	36	76,14
M11	35	76,14
M12	34	93,06
J1	29	67,68
J2	30	16,92
J3	31	186,12
J4	32	126,9
J5	33	42,3

Source : GENIVAR, 2013a

3.3 UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES

Le site minier du lac à Paul, situé dans la province géologique de Grenville du Bouclier Canadien, appartient à la suite anorthositique du Lac-Saint-Jean et se caractérise par des faciès enrichis en apatite (gabbronorites, norites et leuconorites). À l'est et à l'ouest du lac à Paul se trouvent plusieurs plans de cisaillement régionaux correspondant parfois à des contacts de roc. La carte 5 présente les différentes unités géologiques et les principales zones de failles.

Les matériaux de surface se composent surtout de dépôts glaciaires et fluvioglaciaires d'épaisseurs variables et leur répartition est en lien avec l'élévation. La carte 6 présente la distribution des dépôts de surface de la zone d'étude locale (MFFP, 1993).

Le modèle conceptuel utilisé pour représenter le système hydrogéologique a été simplifié de manière à : 1) respecter le plus fidèlement possible les observations de terrain; et 2) produire des simulations conservatrices concernant l'impact du dénoyage de la fosse. Ces simplifications sont nécessaires puisque l'étendue du modèle couvre une superficie beaucoup plus grande que l'aire d'étude, avec des secteurs où aucune donnée de terrain n'est disponible. Les conditions de terrain de ces secteurs ont été interpolées à partir des secteurs connus et des cartes des dépôts quaternaires. En modélisant un secteur plus grand, il est ainsi possible de s'assurer que les conditions appliquées aux limites n'influenceront pas l'écoulement dans le secteur de la fosse.

Les unités hydrostratigraphiques suivantes ont été identifiées lors de la réalisation des forages, à partir de la surface : (1) un horizon fluvioglaciaire de sable avec un peu de silt à silteux; (2) un horizon de till à matrice sableuse et graveleuse et; (3) le roc constitué principalement de roche de la suite anorthositique du Lac-Saint-Jean. La présence de sédiments dans les lacs n'a pas été considérée dans ce modèle compte tenu qu'aucune information sur leur épaisseur et leurs propriétés hydrauliques n'étaient disponibles. Toutefois, cette omission permet d'obtenir des résultats conservateurs puisque la perméabilité des sédiments est généralement faible. La présence de sédiments diminue généralement l'infiltration de l'eau de surface vers l'aquifère.

La carte 7 montre l'interpolation de l'épaisseur des dépôts de surface obtenue à partir de tous les rapports de forages disponibles.

3.3.1 UNITÉ 1 (2BE/2A ET 9): DÉPÔTS FLUVIO-GLACIAIRES/JUXTAGLACIAIRES/ÉOLIENS

Les dépôts fluvioglaciaires (unité 2BE) couvrent les secteurs de moins de 410 m d'élévation, faisant le lien topographique jusqu'au lac à Paul et à la rivière Manouane. Ces dépôts, stratifiés, sont répartis surtout autour des cours d'eau (rive est du lac à Paul et rivière Manouane), triés et disposés en couches bien distinctes, principalement composées de sable, de gravier et de cailloux émoussés.

Une partie des dépôts fluvioglaciaires est surmontée par des dunes (dépôts éoliens-unité 9), essentiellement au sud du lac Épinette. Les dépôts éoliens sont principalement composés de sable fin à moyen lités.

S'ajoutent de façon bien distincte les dépôts juxtaglaciaires (unité 2A), surtout constitués de matériaux relativement grossiers composés de sable, de gravier et de cailloux, de pierre et de blocs arrondis à sub-arrondis. Ils ont souvent une stratification déformée et faillée et contiennent fréquemment des poches de till. Ces dépôts se retrouvent principalement au nord-est du lac à Paul dans le secteur compris juste au sud de la rivière Manouane (dépôts juxtaglaciaires et esker).

Ces trois unités sont considérées comme des aquifères à nappe libre. Leur épaisseur varie entre 2 et 51 m selon les sondages réalisés et augmente au nord vers les lac G, H et Siamois.

Les résultats des essais de perméabilité pour les puits aménagés dans ces unités ont permis de mesurer des conductivités hydrauliques variant de $5,14 \times 10^{-7}$ m/s à $2,55 \times 10^{-6}$ m/s, pour une valeur moyenne $1,56 \times 10^{-6}$ m/s (voir tableau 3).

Tableau 3 Conductivité hydraulique, modèle conceptuel

UNITÉ	ÉPAISSEUR	CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE (INITIALE)		
		minimum (m/s)	maximum (m/s)	moyenne (m/s)
1- Dépôt fluvio-glaciaires/éoliens (2BE,2A, 9)	0 à 51 m	5,14E-07	2,55E-06	1,53E-06
2- Till (1AR, 1A)	0,45 à 10 m	2,11E-07	1,21E-05	1,76E-06
3- Roc fracturé (0-40m)	40 m	5,40E-09	4,77E-05	1,41E-07
4- Roc sain (40m+)	394,2 à 600 m	2,16E-09	6,45E-07	4,23E-08

3.3.2 UNITÉ 2 (1A/1AR) : TILL

Les dépôts d'origine glaciaire dominent en superficie. Ceux sans morphologie particulière (till indifférencié) sont minces (épaisseur moyenne de 25 cm à 1 m) au-delà de l'élévation de 440 m alors qu'ils forment une épaisseur moyenne supérieure à 1 m entre les élévations 410 et 440 m. Le substratum rocheux affleure parfois sur les sommets, avec moins de 25 cm de matériel meuble le recouvrant. Au nord, au nord-est et surtout à l'est du lac à Paul se trouvent des dépôts glaciaires caractérisés par leur morphologie de type drumlin, où les crêtes sont composées de till.

Cette unité se situe généralement au-dessus du socle rocheux. Le dépôt de till est considéré comme un aquifère à nappe libre. Le till de faible épaisseur composé de sable fin à grossier de silteux à graveleux présente une épaisseur entre 0,5 à 9,8 m dans le secteur nord. En moyenne, l'épaisseur du till est d'environ 6,6 m dans le secteur du concasseur, de 4,0 m dans le secteur de la fosse et de 4,1 m dans le secteur des haldes. Le till dans le secteur des parcs à résidus est de faible épaisseur (entre 1 à 6 m) et est composé de sable fin à grossier avec un peu de silt et de gravier.

Les unités sont décrites de la façon suivante :

- 1A : till indifférencié moyen dont l'épaisseur est généralement supérieure à 1 m ;
- 1AR : till indifférencié mince dont l'épaisseur est inférieure à 1 m ; les affleurements rocheux sont abondants.

Les résultats des essais de perméabilité pour les puits aménagés dans cette unité ont permis de mesurer des conductivités hydrauliques variant de $2,11 \times 10^{-7}$ m/s à $1,21 \times 10^{-5}$ m/s, pour une valeur moyenne $1,76 \times 10^{-6}$ m/s (voir tableau 3).

3.3.3 UNITÉ 3 : ROC FRACTURÉ

Le roc fracturé est considéré comme un aquifère à nappe libre (affleurant) ou semi-captif (sous-jacent au till). La compilation des résultats des essais Lugeon (Hydro-Ressources, 2014) et des essais de perméabilité dans les puits au roc (DESSAU-NUTSHIMIT, 2012; et HydroRessources, 2014) montrent que les zones de fractures les plus perméables se situent dans la portion supérieure du roc, < 40 m, et pourraient correspondre à des horizons de roc plus altérés. La conductivité hydraulique de la portion supérieure du roc varie de $5,40 \times 10^{-9}$ m/s à $4,77 \times 10^{-5}$ m/s, pour une valeur moyenne de $1,41 \times 10^{-7}$ m/s. En assumant que le réseau de fracture est bien connecté dans la partie supérieure du roc, il est raisonnable d'assumer qu'à l'échelle régionale, cet horizon se comporte comme un milieu poreux équivalent où l'écoulement de l'eau souterraine est régit par le réseau de fractures.

Le roc dans le secteur du parc à résidus est composé de gabbro anorthosite de qualité mauvaise à bonne. Les valeurs des RQD mesurées par LVM en 2013 varient entre 35 % et 84 %. Le roc dans le secteur de la fosse est constitué du gabbro anorthositique massif entourant les deux côtés du corps minéralisé. Cette formation rocheuse entourant le minerai est démontrée comme ayant d'excellentes valeurs d'indice de qualité rocheuse (RQD) (Journeaux, 2013).

3.3.4 UNITÉ 4 : ROC SAIN

Le roc sain est considéré comme un aquitard semi-captif (sous-jacent au till). La compilation des résultats des essais Lugeon et des essais de perméabilité (Hydro-Ressources, 2014) montre que la conductivité hydraulique du roc varie beaucoup avec des valeurs entre $2,16 \times 10^{-9}$ m/s et $6,45 \times 10^{-7}$ m/s, pour une valeur moyenne de $4,23 \times 10^{-8}$ m/s. La variabilité de la conductivité hydraulique est attribuable à la présence de fractures en profondeur dans certains secteurs. La calibration du modèle permettra de valider quelle est la conductivité hydraulique la plus appropriée pour modéliser cette unité à l'échelle régionale.

Le tableau 3 présente les unités hydrostratigraphiques qui ont été utilisées pour représenter le système hydrogéologique de la région.

3.4 ÉLÉMENTS STRUCTURAUX

À la suite de l'analyse des cartes géologiques, aucun élément structural significatif n'a été noté. Des linéaments de direction NNO-SSE ont été identifiés sur la carte géologique, par contre les sondages réalisés n'ont pas interceptés de zones de failles importantes. Aucune zone de failles n'a donc été considérée dans le modèle conceptuel.

3.5 CHARGES HYDRAULIQUES

Dans le contexte de la présente étude, 62 puits ont fait l'objet de mesures des niveaux d'eau, 55 ont été sélectionnés pour le calage du modèle. La liste des puits et leurs élévations piézométriques qui serviront de cibles à atteindre pour la calibration du modèle sont présentées au tableau 4. La position de chacun des puits est présentée sur la carte 2.

Lors de la campagne de LVM en 2014, tous les niveaux d'eau ont été mesurés entre le 12 et le 20 août. Toutefois, compte tenu de l'étendue du site et du nombre important de puits d'observation, certaines données d'élévation piézométrique relevées lors d'études antérieures ont également été sélectionnées afin de compléter l'information dans certains secteurs. Les niveaux d'eau mesurés dans le secteur de la fosse et du parc à résidus sont près de la surface respectivement entre 0,80 et 3,06 m de profondeur et 0,18 m et 3,4 m de profondeur.

L'écoulement s'effectuerait vers le lac à Paul, en accord avec la topographie locale. Dans le secteur du parc à de résidus, l'écoulement est dirigé vers le lac Épinette.

3.6 ZONES DE RECHARGE

Lors d'une précipitation, la proportion de l'eau qui s'évapore, ruisselle et s'infiltré dépend d'un certain nombre de facteurs. Intuitivement, un taux de recharge à l'aquifère rocheux plus important sera observé aux endroits où l'épaisseur de dépôts meubles est faible, surtout si la conductivité hydraulique de ces dépôts est élevée. De plus, une topographie plane peut favoriser l'infiltration vers l'aquifère en minimisant le ruissellement. Dans les secteurs de milieux humides, déjà saturés en eau, la recharge sera beaucoup plus faible puisque l'eau s'accumulera sur place et/ou s'écoulera en surface. L'attribution des zones de recharge lors de la construction du modèle a donc été réalisée en considérant les facteurs suivants : la topographie, la piézométrie, la nature des dépôts meubles et le contexte hydrographique.

Dans le secteur à l'étude, les zones de recharge principales se situent dans le secteur nord, en amont hydraulique. On y retrouve principalement l'unité de till de faible épaisseur et des affleurements rocheux. Des zones de recharges secondaires peuvent être présentes dans les secteurs où des dépôts plus perméables sont identifiés.

Tableau 4 Liste des élévations piézométriques ciblées

SONDAGE	UNITÉ CRÉPINÉE	DATE DU RELEVÉ	ÉLÉVATION PIEZOMÉTRIQUE OBS, (M)
CDN-12-01	roc	janv-13	456,57
CDN-12-04	roc	dec 2012	432,17
CDN-12-06	roc	dec 2012	417,64
CDN-12-07	roc	dec 2012	435,7
CDN-12-14	roc	2012-07-11	443,55
CDN-12-16	roc	janv-13	412,74
CDN-12-27	roc	janv-13	480,03
CDN-12-29	roc	dec 2012	468,16
PP-1	roc	18-08-14	431,72
PZD-1	SI-S, G+SI	dec 2012	445,03
PZD-10	S+G+SI	dec 2012	445,65
PZD-11	S-SI+G	dec 2012	446,36
PZD-12	S-SI, SI	dec 2012	437,30
PZD-13	S-SI	20-08-14	447,76
PZD-14	S+SI-G, C	18-08-14	442,04
PZD-15	G+S	20-08-14	434,26
PZD-16	S-SI, C	20-08-14	427,55
PZD-18	C, S-G+SI	dec 2012	432,54
PZD-19	S-G+SI	dec 2012	401,88
PZD-2	S, C, SL-S	20-08-14	444,33
PZD-20	S-G+SI	20-08-14	414,03
PZD-21	S+G+SI	dec 2012	433,45
PZD-22	S, SI+S	dec 2012	429,80
PZD-23	SI	dec 2012	422,90
PZD-24	B+S	20-08-14	405,70
PZD-25	S, SI	17-08-14	413,66
PZD-26	roc	20-08-14	407,87
PZD-3	S-SI+G	20-08-14	445,29
PZD-4	S	18-08-14	439,38
PZD-5	G, SI+G	20-08-14	431,63
PZD-6	MO, R	20-07-12	445,18

Tableau 4 (suite) Liste des élévations piézométriques ciblées

SONDAGE	UNITÉ CRÉPINÉE	DATE DU RELEVÉ	ÉLÉVATION PIEZOMÉTRIQUE OBS, (M)
PZD-7	S-G+SI	20-08-14	406,9
PZD-8	S-G, R	20-08-14	446,16
PZR-27	roc	dec 2012	411,23
PZR-28	roc	dec 2012	405,67
PZR-29	roc	dec 2012	428,24
PZR-30	roc	dec 2012	403,82
TF-202-12	S-SI+G	25-11-12	416,04
TF-204-12	S-SI+G	25-11-12	406,17
TF-213-12	S-G+SI	29-09-12	426,30
TF-217-12	S-SI+G	17-08-14	406,08
TF-218-12	S-SI	25-11-12	407,66
TF-221-12	S	23-07-14	422,05
TF-222-12	S-SI	16-08-14	408,57
TF-224-12	S+G	12-08-14	426,42
TF-238-12	B, S	25-11-12	410,41
TF-240-12	S-SI	25-11-12	406,88
TF-242-12	S-G+B	25-11-12	410,81
TF-243-12	Roc	12-08-14	415,13
TF-402-12	S-SI+G	19-08-14	440,57
TF-403-12	S-SI+G	19-08-14	429,10
TF-404-12	S-SI+G	19-08-14	454,14
TF-501-12	S-S	17-08-14	420,12
TF-502-12	S-SI+G	17-08-14	419,32
TF-503-12	S-G	25-11-12	432,90

* Mo= Matière organique S=Sable SI=Silt G=Gravier B=Blocs C=Cailloux R= Roc

Selon le contexte hydrogéologique du secteur à l'étude, les lacs représenteraient des zones de résurgence et aucune recharge n'est anticipée sous ceux-ci. Une faible recharge est attendue dans les secteurs des cours d'eau et où des milieux humides sont présents.

Les valeurs initiales de recharge ont été évaluées à partir des données climatiques. Les données climatiques compilées par Environnement Canada entre 1961 et 1990 pour la station météorologique de Péribonka ont été utilisées afin d'obtenir la valeur moyenne de précipitation. Les précipitations totales annuelles pour une année normale étaient de 835 mm/an.

4 CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

La construction d'un modèle d'écoulement pour l'eau souterraine comprend les trois phases suivantes :

- étendue du domaine et construction du maillage;
- définition des différentes couches du modèle;
- mise en place des conditions limites.

4.1 ÉTENDUE DU DOMAINE ET CONSTRUCTION DU MAILLAGE

4.1.1 DISCRÉTISATION HORIZONTALE DU MAILLAGE

Le secteur retenu pour le modèle prend en compte les limites des bassins versants.

Les dimensions du modèle sont approximativement de 11,9 km dans l'axe nord/sud et d'environ 11,8 km dans l'axe est/ouest, avec une épaisseur totale de 640 m. Le coin inférieur gauche du modèle est situé aux coordonnées 276 133 E et 5 521 175 N (zone 7 MTM 7, NAD83). Le site à l'étude couvre une superficie de 83,88 km² discrétisée via un maillage triangulaire de 2 488 316 éléments et 1 292 280 nœuds. Cette triangulation irrégulière s'appuie sur l'ensemble des points où une information est disponible. Ainsi, le maillage est affiné au niveau des lacs et des forages. D'autre part, la méthode de résolution de l'équation de l'écoulement par éléments finis implique que les calculs s'effectuent aux nœuds de chaque élément. Chaque forage sera représenté sur un nœud du maillage. La qualité de la construction du maillage est validée en vérifiant qu'aucun élément ne possède un angle maximum supérieur à 120° et que le critère de Delaunay a été respecté. Une triangulation respecte le critère de Delaunay (1934) si aucun sommet des triangles du maillage n'est à l'intérieur des cercles circonscrits aux triangles.

4.1.2 DÉFINITION DES DIFFÉRENTES COUCHES DU MODÈLE

Le modèle réalisé étant tridimensionnel, la topographie du site a été implémentée grâce au LIDAR. La carte 8 montre une vue du maillage. La discrétisation verticale des différents horizons est reproduite pour les quatre unités définies dans le modèle conceptuel : dépôts juxtaglaciaires et till, horizon de roc fracturé, horizon de roc sain.

Le nombre de couches discrétisées (« layer ») dans chaque unité est résumé dans le tableau 5. Au total, le modèle est subdivisé verticalement en 29 couches. Celles-ci sont toujours définies par des plans (« slice ») supérieur et inférieur. Les conductivités hydrauliques moyennes établies dans le modèle conceptuel seront attribuées initialement pour chacune des unités définies. Les conductivités seront par la suite ajustées aux fins de calibration. La représentation spatiale de chacune des unités par couche est présentée sur les cartes 9 à 12.

Tableau 5 Sommaire des différentes couches

# COUCHE	ÉPAISSEUR DES COUCHES (m)	UNITÉ HYDROSTRATIGRAPHIQUE
1	0,2 à 56	Till et dépôts juxtaglaciaires/éoliens
2	0,25 à 3	Till
3 à 6	10	Roc fracturé
7 à 9	20	Roc sain
10 à 29	16,71 à 27	Roc sain

La discrétisation du domaine spatial associé au mode de résolution par éléments finis nécessite une continuité des différentes couches de simulation. La simulation numérique impose la continuité du maillage sur l'ensemble du domaine simulé.

Une première couche incluant les dépôts juxtaglaciaires, les dépôts éoliens et le till a d'abord été obtenue en soustrayant l'épaisseur de ceux-ci aux données numériques d'élévation topographique (DEM). Dans les secteurs où l'épaisseur des dépôts juxtaglaciaires est nulle, la continuité de la couche a été réalisée en attribuant localement une épaisseur fictive minimale (20 cm) et en attribuant les propriétés hydrauliques de la couche sous-jacente.

Cette opération a été répétée pour les autres couches. La couche du roc fracturé a été soustraite à l'élévation de la dernière couche du till et celle du roc sain a été soustraite à l'élévation de la dernière couche du roc fracturé. Chacune de ces couches a été subdivisée en sous-couches afin de permettre de tenir compte de la diminution de la conductivité hydraulique en profondeur et de sélectionner les nœuds se trouvant à l'élévation la plus près possible de la position réelle du point d'observation.

Au final, les couches 1 et 2 sont associées aux dépôts meubles, les couches 3 à 6 au roc fracturé et les couches 7 à 29 au roc sain.

4.2 CONDITIONS LIMITES

Les conditions aux limites définissent les entrées et les sorties d'eau imposées au système. Elles permettent d'intégrer les relations existantes entre le système aquifère modélisé et les réseaux hydrographiques ou aquifères adjacents au système étudié. Ces relations peuvent être simulées par l'implémentation de conditions de charges et de flux connus ou supposés. Le choix des conditions aux limites est une étape cruciale de la modélisation puisqu'elles influencent considérablement les modalités d'écoulement du système.

Les conditions limites du modèle ont été attribuées selon le réseau hydrologique du domaine d'étude. Les cartes 13 et 14 présentent les vues en plan des conditions limites appliquées sur la couche supérieure du modèle ainsi que sur les couches subséquentes.

4.2.1 CONDITIONS LIMITES EXTERNES

Des charges constantes égales à l'élévation ont été appliquées à tous les nœuds correspondant aux lacs et aux cours d'eau se trouvant aux limites du domaine.

FEFLOW attribue par défaut un flux nul à toute cellule se trouvant aux limites du domaine. Ainsi, aucune modification au modèle n'est nécessaire pour définir les autres limites externes du modèle, soit au sud et à l'est.

4.2.2 CONDITIONS LIMITES INTERNES

4.2.2.1 TYPE CHARGE CONSTANTE

Des charges constantes égales à l'élévation des lacs ont été attribuées à tous les nœuds de surface de la première couche correspondant à la position des lacs. Les valeurs d'élévation des lacs attribuées correspondent aux élévations estimées à partir du LIDAR (voir tableau 1).

4.2.2.2 TYPE DRAIN

Les conditions limites de type drain ont été utilisées pour représenter les cours d'eau de surface à l'intérieur du domaine. Ces types de frontières permettent de simuler les sorties d'eau du système d'eau souterraine. Les élévations des nœuds de type drain ont été estimées en se basant sur la topographie et correspondent à l'élévation de la couche n° 1.

5 CALIBRATION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

5.1 OBJECTIFS DE CALIBRATION

L'objectif de la calibration du modèle d'écoulement est de développer une approximation acceptable des niveaux d'eau souterraine observés et des débits mesurés d'un cours d'eau. Aux fins de ce modèle, même si une fluctuation naturelle des élévations de l'eau souterraine se produit en raison des conditions climatiques saisonnières, les conditions de l'eau souterraine observées et induites sont considérées comme étant statiques. Par conséquent, la calibration du modèle se fait en présumant que les élévations piézométriques mesurées sont représentatives du niveau statique et que les débits d'étiage des cours d'eau estimés (GENIVAR, 2013) sont représentatifs de débit de base du cours d'eau.

Puisque les débits d'étiage des cours d'eau ont été estimés sans aucune donnée d'observation locale, les résultats de débits d'étiage estimés sont des ordres de grandeur et devraient être considérés avec prudence et discernement (GENIVAR, 2013). Ces valeurs estimées peuvent tout de même servir de cible à atteindre pour la calibration du modèle afin de s'assurer que les débits de base simulés obtenus respectent minimalement les ordres de grandeur des estimations des méthodes hydrologiques.

Pour ces raisons, la calibration des élévations piézométriques a été priorisée. Les objectifs de calibration visent donc, en premier lieu, une calibration acceptable des élévations d'eau souterraine et, en deuxième lieu, la meilleure représentation possible des débits mesurés.

5.2 MÉTHODOLOGIE DE CALIBRATION

Un modèle calibré a été réalisé en utilisant une approche itérative où les paramètres d'entrée étaient modifiés manuellement et les statistiques de calibration étaient qualifiées de manière quantitative. La conductivité hydraulique et les valeurs de recharge furent les paramètres principaux du modèle modifiés pendant le processus de calibration.

Une comparaison des élévations simulées de l'eau souterraine a été effectuée avec les élévations mesurées disponibles pour l'eau souterraine. Les débits estimés de certains cours d'eau ont également été utilisés afin de vérifier la calibration de modèle. L'évaluation des statistiques de calibration des élévations de l'eau souterraine et des débits prend en considération plusieurs composantes, incluant : les valeurs résiduelles maximum et minimum, la moyenne résiduelle, la moyenne résiduelle absolue, la racine de l'erreur quadratique moyenne et la racine de l'erreur

quadratique moyenne (à l'échelle ou normalisé RMS [NRMS]). Les résiduels sont calculés comme la différence entre les élévations simulées et observées de l'eau souterraine. Les valeurs cibles acceptées par l'industrie pour le NRSM sont inférieures ou égales à 10 %.

5.3 RÉSULTATS DE LA CALIBRATION

5.3.1 CHARGES HYDRAULIQUES

Les élévations piézométriques simulées et observées de l'eau souterraine sont comparées pour évaluer la calibration du modèle. La valeur d'élévation piézométrique mesurée de chacun des puits a initialement été comparée avec la valeur de charge hydraulique calculée au centre de la crépine du puits. Pour les puits ouverts au roc, il a été présumé que les fractures de l'unité de roc fracturé remplissent le puits jusqu'à l'atteinte de la charge hydraulique correspondant à l'unité de roc fracturé. Ainsi, l'élévation piézométrique mesurée des puits ouverts au roc a été comparée à la charge hydraulique du centre de l'unité de roc fracturé. Le tableau 6 présente les profondeurs du centre des unités de chacun des puits comparés à celui des nœuds sélectionnés pour réaliser la calibration.

Les statistiques de calibration présentées au tableau 7 montrent que la calibration du modèle se trouve à l'intérieur de la plage de NRMS acceptée par l'industrie.

La figure 1 montre que la calibration des charges hydrauliques est satisfaisante. Le résultat de chacun des puits est présenté au tableau 8.

Tous les points se situent à l'intérieur des objectifs de calibration. Les puits TF-221-12, TF-403-12, PZR-30 et TF-503-12 présentent la plus grande différence, avec des valeurs supérieures à 8 m.

La carte 15 présente la carte piézométrique obtenue avec le modèle calibré en régime permanent. L'écoulement de l'eau souterraine suit la topographie telle que définie dans les hypothèses du modèle conceptuel initial.

5.3.2 DÉBITS DE BASE-COURS D'EAU

À partir du modèle réalisé, il est possible de calculer les valeurs de débits de base des cours d'eau. Ces valeurs sont obtenues en sélectionnant l'ensemble des nœuds constituant le cours d'eau et en effectuant un bilan des débits entrant et sortant. La somme obtenue correspond à une approximation des volumes d'eau souterraine contribuant au débit du ruisseau, soit l'équivalent du débit de base. Les débits obtenus lors de la calibration du modèle ont été comparés au débit d'étiage (Q10.7) estimé pour chacune des stations. Les résultats sont présentés au tableau 9. La figure 2 présente le graphique des débits simulés en comparaison des débits observés. Le tableau 10 montre les statistiques de calibration obtenues. Le NRMS est de 4,56 %, soit inférieur à 10 %. La calibration est donc jugée satisfaisante.

Tableau 6 Élévation des points d'observation sélectionnés à partir des profondeurs des principales fractures répertoriées

SONDAGE	UNITÉ CRÉPINÉE	ÉLÉVATION DE LA ZONE DE FRACTURE OU DE LA CRÉPINE (masl)	ÉLÉVATION DU NOEUDS DU PUIS OBS (m)	ÉCART NOEUD-ÉLÉVATION MILIEU CRÉPINE (m)
CDN-12-01	roc	431,42	436,07	-4,65
CDN-12-04	roc	406,53	411,18	-4,65
CDN-12-06	roc	359,9	364,8	-4,9
CDN-12-07	roc	409,12	412,52	-3,4
CDN-12-14	roc	418,24	422,14	-3,9
CDN-12-16	roc	346,82	342,22	4,6
CDN-12-27	roc	455,39	459,29	-3,9
CDN-12-29	roc	437,93	433,33	4,6
PP-1	roc	286,97	288,818	-1,848
PZD-1	SI-S, G+SI	445,4	445,4	0
PZD-10	S+G+SI	446,43	447,08	-0,65
PZD-11	S-SI+G	447,65	449,05	-1,4
PZD-12	S-SI, SI	437,23	437,88	-0,65
PZD-13	S-SI	448,56	448,16	0,4
PZD-14	S+SI-G, C	441,43	442,03	-0,6
PZD-15	G+S	434,85	436,25	-1,4
PZD-16	S-SI, C	427,58	428,58	-1
PZD-18	C, S-G+SI	431,86	433,26	-1,4
PZD-19	S-G+SI	394,84	389,09	5,75
PZD-2	S, C, SL-S	445,485	444,96	0,525
PZD-20	S-G+SI	414,68	416,08	-1,4
PZD-21	S+G+SI	433,775	434,2	-0,425
PZD-22	S, SI+S	428,23	431,93	-3,7
PZD-23	SI	424,73	425,33	-0,6
PZD-24	B+S	410,46	411,86	-1,4
PZD-25	S, SI	415,43	416,83	-1,4
PZD-26	roc	403,53	405,68	-2,15
PZD-3	S-SI+G	445,26	446,66	-1,4
PZD-4	S	439,82	439,22	0,6
PZD-5	G, SI+G	433,15	433,8	-0,65
PZD-6	MO, R	445,99	446,34	-0,35
PZD-7	S-G+SI	408,94	409,64	-0,7
PZD-8	S-G, R	446,36	446,86	-0,5
PZR-27	roc	363,41	373,06	-9,65
PZR-28	roc	329,135	319,46	9,675

Tableau 6 (suite) Élévation des points d'observation sélectionnés à partir des profondeurs des principales fractures répertoriées

SONDAGE	UNITÉ CRÉPINÉE	ÉLÉVATION DE LA ZONE DE FRACTURE OU DE LA CRÉPINE (masl)	ÉLÉVATION DU NOEUDS DU PUIS OBS (m)	ÉCART NOEUD-ÉLÉVATION MILIEU CRÉPINE (m)
PZR-29	roc	355	349,15	5,85
PZR-30	roc	341,75	339,4	2,35
TF-202-12	S-SI+G	393,955	396,91	-2,955
TF-204-12	S-SI+G	409,31	409,96	-0,65
TF-213-12	S-G+SI	425,49	426,4	-0,91
TF-217-12	S-SI+G	406,4	407,8	-1,4
TF-218-12	S-SI	407,65	408,3	-0,65
TF-221-12	S	424,7	425,6	-0,9
TF-222-12	S-SI	409,6	411	-1,4
TF-224-12	S+G	425,85	426,5	-0,65
TF-238-12	B, S	410,16	409,65	0,51
TF-240-12	S-SI	408,8	409,2	-0,4
TF-242-12	S-G+B	406,365	407,14	-0,775
TF-243-12	Roc	415,02	417,17	-2,15
TF-402-12	S-SI+G	442,45	443,1	-0,65
TF-403-12	S-SI+G	438,35	439	-0,65
TF-404-12	S-SI+G	453,85	453,55	0,3
TF-501-12	S-S	420,1	420,5	-0,4
TF-502-12	S-SI+G	421,15	421,8	-0,65
TF-503-12	S-G	432,95	432,58	0,37

Tableau 7 Statistiques de calibration (charges hydrauliques)

MESURE STATISTIQUE	UNITÉ	RÉSULTAT DU MODÈLE CALIBRÉ
Nombre de point d'observation		55
Résiduel maximum	m	11,98
Résiduel minimum	m	-8,76
Somme des résidus	m	22,19
Somme des résidus absolus	m	148,54
Écart type des résiduels	m	3,65
Moyenne absolue des résidus	m	2,70
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMS)	m	3,68
Racine de l'erreur quadratique moyenne à l'échelle (Normalized RMS)	%	4,70

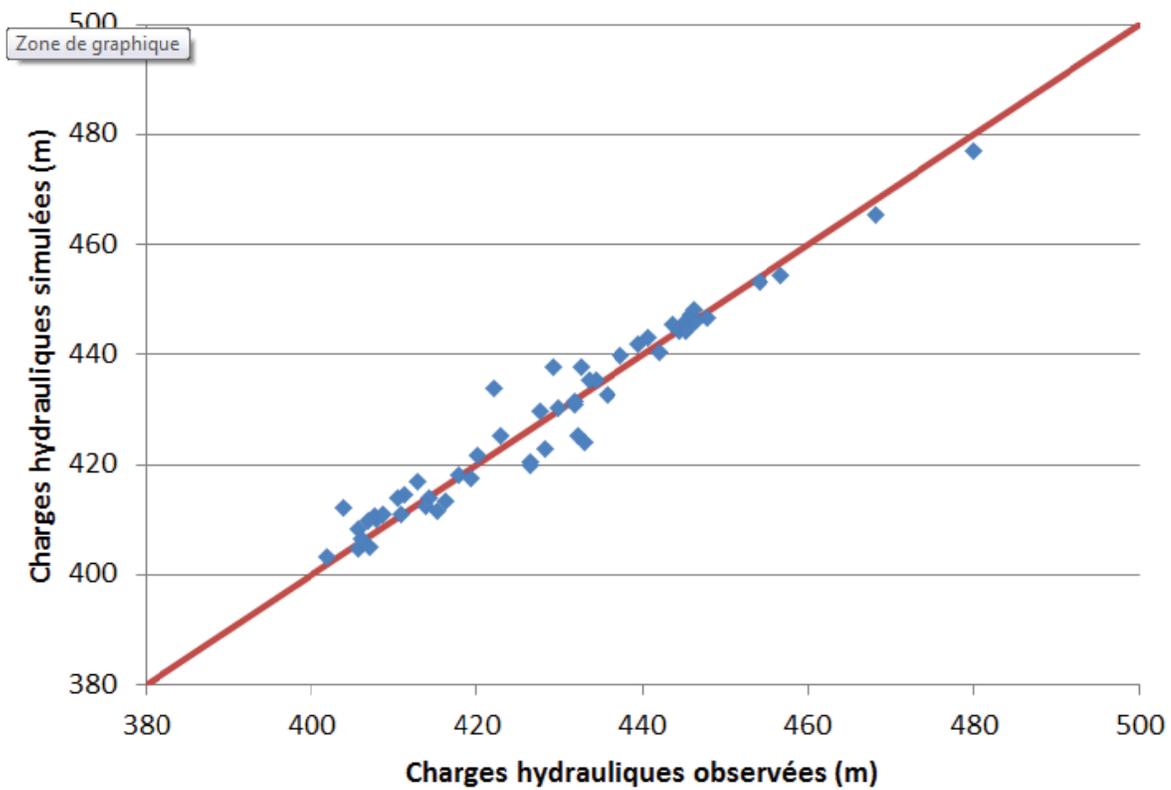


Figure 1 Résultats de la calibration des charges hydrauliques

Tableau 8 Calibration des charges hydrauliques

SONDAGE	CHARGE HYDRAULIQUE OBSERVÉE (masl)	CHARGE HYDRAULIQUE CALBRÉE (masl)	DIFFÉRENCE (m)
CDN-12-01	456,57	454,35	-2,22
CDN-12-04	432,17	425,20	-6,97
CDN-12-06	417,64	418,21	0,57
CDN-12-07	435,7	432,70	-3,00
CDN-12-14	443,55	445,35	1,80
CDN-12-16	412,74	416,87	4,13
CDN-12-27	480,03	476,86	-3,17
CDN-12-29	468,16	465,37	-2,79
PP-1	431,72	430,82	-0,90
PZD-1	445,03	445,81	0,78
PZD-10	445,65	447,21	1,56
PZD-11	446,36	446,03	-0,33
PZD-12	437,3	439,86	2,56
PZD-13	447,76	446,73	-1,03
PZD-14	442,04	440,36	-1,68
PZD-15	434,26	435,27	1,01
PZD-16	427,55	429,69	2,14
PZD-18	432,54	437,80	5,26
PZD-19	401,88	403,37	1,49
PZD-2	444,33	444,44	0,11
PZD-20	414,03	414,01	-0,02
PZD-21	433,45	435,49	2,04
PZD-22	429,8	430,41	0,61
PZD-23	422,9	425,33	2,43
PZD-24	405,7	404,82	-0,88
PZD-25	413,66	412,53	-1,13
PZD-26	407,87	409,97	2,10
PZD-3	445,29	444,87	-0,42
PZD-4	439,38	441,99	2,61
PZD-5	431,63	431,61	-0,02
PZD-6	445,18	444,28	-0,90
PZD-7	406,9	405,01	-1,89
PZD-8	446,16	448,24	2,08
PZR-27	411,23	414,47	3,24
PZR-28	405,67	408,41	2,74
PZR-29	428,24	422,94	-5,30
PZR-30	403,82	412,33	8,51
TF-202-12	416,04	413,33	-2,71
TF-204-12	406,17	405,70	-0,47
TF-213-12	426,3	420,39	-5,91

Tableau 8 (suite) Calibration des charges hydrauliques

SONDAGE	CHARGE HYDRAULIQUE		DIFFÉRENCE (m)
	OBSERVÉE (masl)	CALBRÉE (masl)	
TF-217-12	406,08	406,64	0,56
TF-218-12	407,66	410,58	2,92
TF-221-12	422,05	434,03	11,98
TF-222-12	408,57	411,15	2,58
TF-224-12	426,42	419,94	-6,48
TF-238-12	410,41	414,01	3,60
TF-240-12	406,88	409,78	2,90
TF-242-12	410,81	411,16	0,35
TF-243-12	415,13	411,64	-3,49
TF-402-12	440,57	443,10	2,53
TF-403-12	429,1	437,74	8,64
TF-404-12	454,14	453,16	-0,98
TF-501-12	420,12	421,64	1,52
TF-502-12	419,32	417,58	-1,74
TF-503-12	432,9	424,14	-8,76

Tableau 9 Comparaison des débits de base estimés et simulés

STATION	ID BASSIN VERSANT	[1] DÉBIT (Q10.7 (ESTIVAL))	MODÈLE CALBRÉ				[4]-[1] DIFFÉRENCE (M ³ /J)	% DIFFÉRENCE
			[2] exfiltration au cours d'eau (m ³ /j)	[3] Infiltration au cours d'eau (m ³ /j)	[4]=[2]-[3] Total Débit de base (m ³ /j)			
P1	4	211,5	243,63	0	243,63	32,13	15	
P2	3	203,04	233,82	0	233,82	30,78	15	
P3	1	304,56	150,65	0	150,65	153,91	51	
P4	1+2	642,96	482,19	0	482,19	160,77	25	
P5	25	296,1	201,02	0	201,02	95,08	32	
P6	24	329,94	271,69	0	271,69	58,25	18	
P7	28	67,68	101,51	0	101,51	33,83	50	
P8	27	42,3	17,895	0	17,895	24,41	58	
P9	1+2+26	846	841,25	0	841,25	4,75	1	
P10	5	93,06	40,61	0	40,61	52,45	56	
P11	21	431,46	370,3	0	370,3	61,16	14	
P12	22	186,12	188,82	0	188,82	2,70	1	
P13	18	439,92	473,22	0	473,22	33,30	8	
P14	19	634,5	512,61	0	512,61	121,89	19	
P15	16+19+18	1979,64	2009,8	0	2009,8	30,16	2	
P16	20	118,44	51,905	16,79	35,115	83,33	70	
P17	23	482,22	374	0	374	108,22	22	
P20	13	143,82	112,44	6,37	106,07	37,75	26	
M5	6	177,66	358,99	0	358,99	181,33	102	

Tableau 9 (suite) Comparaison des débits de base estimés et simulés

STATION	ID BASSIN VERSANT	[1] DÉBIT (Q10.7 (ESTIVAL))	MODÈLE CALBRÉ			[4]-[1] DIFFÉRENCE (M ³ /J)	% DIFFÉRENCE
			[2] exfiltration au cours d'eau (m ³ /j)	[3] Infiltration au cours d'eau (m ³ /j)	[4]=[2]-[3] Total Débit de base (m ³ /j)		
M6	6+7	905,22	1073,2	0	1073,2	167,98	19
M7	6+7+9	1243,62	1431,5	0	1431,5	187,88	15
M8	10	499,14	520,4	78,8	441,6	57,54	12
M9	11	549,9	358,89	0	358,89	191,01	35
M10	36	76,14	54,98	0	54,98	21,16	28
M11	35	76,14	55,17	0	55,17	20,97	28
M12	34	93,06	107,96	0	107,96	14,90	16
J1	29	67,68	70,303	0	70,303	2,62	4
J2	30	16,92	25,46	0	25,46	8,54	50
J3	31	186,12	192,55	0	192,55	6,43	3
J4	32	126,9	82,34	0	82,34	44,56	35
J5	33	42,3	52,965	0	52,965	10,67	25

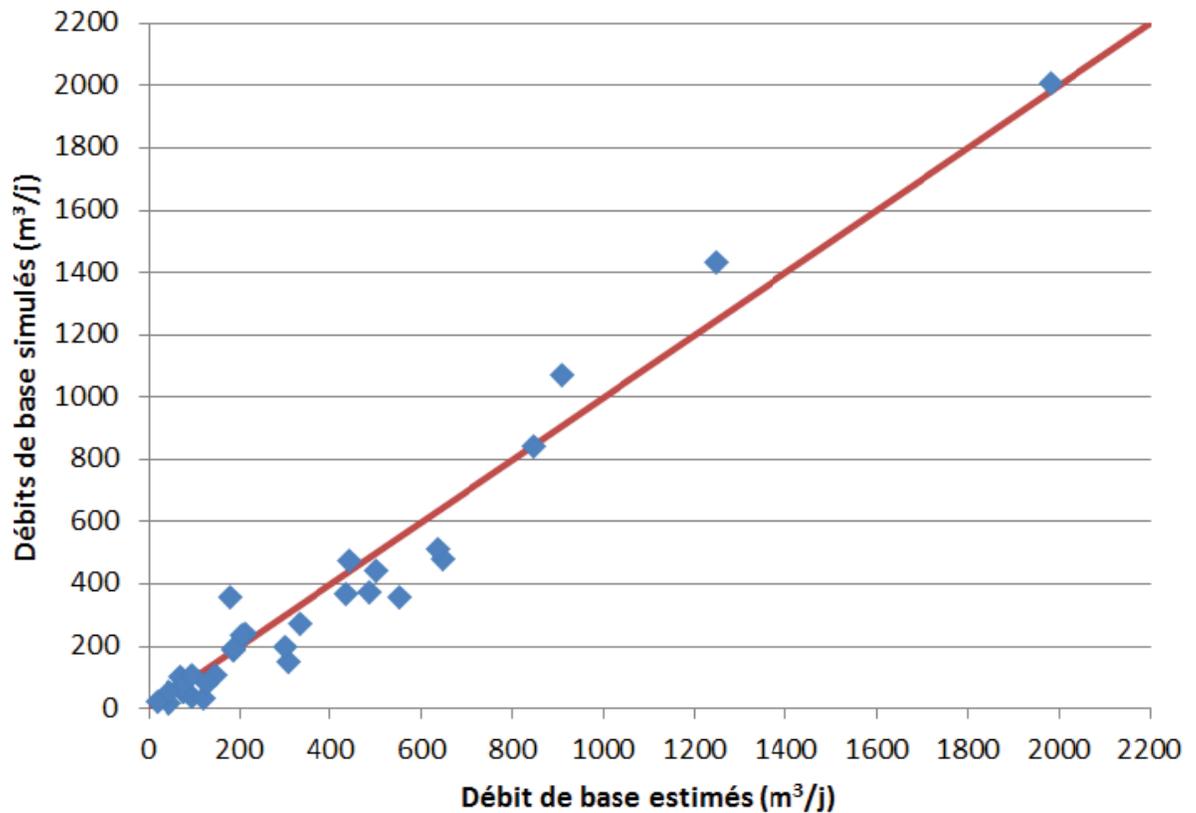


Figure 2 Comparaison des débits de base estimés et simulés

Tableau 10 Statistiques de calibration (débits de cours d'eau)

MESURE STATISTIQUE	UNITÉ	RÉSULTAT DU MODÈLE CALIBRÉ
Nombre de point d'observation		31
Résiduel maximum	m ³ /jour	191,01
Résiduel minimum	m ³ /jour	-187,88
Somme des résidus	m ³ /jour	553,95
Somme des résidus absolus	m ³ /jour	2040,45
Écart type des résiduels	m ³ /jour	87,77
Moyenne absolue des résidus	m ³ /jour	65,82
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMS)	m ³ /jour	89,57
Racine de l'erreur quadratique moyenne à l'échelle (Normalized RMS)	%	4,56

5.3.3 BILAN HYDRIQUE

Le tableau 11 présente le bilan hydrique pour le modèle calibré d'écoulement de l'eau souterraine en régime permanent. L'écart indiqué au tableau 11 indique que le bilan de masse est équilibré dans le modèle calibré. L'erreur de 0,02 % du bilan hydrique indique une calibration acceptable.

Tableau 11 Bilan hydrique

Flux entrant (m ³ /j)		Flux sortant (m ³ /j)	
Charge constante	920,73	Charge constante	31565
Recharge	30639		
FLUX ENTRANT TOTAL	31559,73	FLUX SORTANT TOTAL	31565
		Flux sortant – Flux entrant	6
			0,02 %

5.4 CONDITIONS FINALES DU MODÈLE CALIBRÉ

5.4.1 CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

Les valeurs de conductivité hydraulique des différentes unités du modèle ont été attribuées en fonction des données récoltées et des valeurs attribuées généralement pour ce type de matériau. Les valeurs de conductivité ont été raffinées durant la calibration du modèle. Le tableau 12 et les cartes 9 à 12 présentent la distribution des valeurs de conductivité hydraulique calibrée pour les unités définies. Une meilleure calibration a été obtenue en appliquant une anisotropie verticale de 1:10 à toutes les unités rocheuses. L'ajout d'une anisotropie verticale permet d'améliorer la calibration (NRMS= 4,9) pour un modèle sans anisotropie (KXX=KZZ), à une calibration (NRMS= 4,7) avec un modèle avec anisotropie (KZZ=KXX/10).

Tableau 12 Conductivités hydrauliques des quatre unités hydrogéologiques obtenues suite à la calibration

UNITÉ	COUCHE	PROFONDEUR (m)		CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE				ANISOTROPIE VERTICALE
				K calibrée (m/s)	K moy (m/s)	K min (m/s)	K max (m/s)	
1- Dépôt fluvioglaciers/éoliens (2be, 9)	1	0,2 à 56	K1	5,79E-06	1,53E-06	5,14E-07	2,55E-06	KZZ=KXX
2- Till (1AR, 1A)	2	0,25 à 3	K2	3,47E-06	1,76E-06	2,11E-07	1,21E-05	KZZ=KXX
3- Roc fracturé (0-40m)	3 à 6	40	K3	4,63E-07	1,41E-07	5,40E-09	4,77E-05	KZZ=KXX/10
4- Roc sain (40m+)	7 à 29	40+	K4	1,164E-08	4,23E-08	2,16E-09	6,45E-07	KZZ=KXX/10

5.4.2 RECHARGE

La recharge a été ajustée durant la calibration du modèle afin de développer une approximation acceptable des niveaux d'eau souterraine observés. La carte 16 illustre la localisation des zones de recharge après calibration.

Le tableau 13 présente la distribution des valeurs de recharge pour les cinq zones définies dans le modèle calibré.

Tableau 13 Recharge obtenue suite à la calibration

ZONE	DESCRIPTION	RECHARGE CALIBRÉE (MM/AN)
Zone 1	Unité de till 1AR	240
Zone 2	Unité de till 1A	201
Zone 3	Unité de dépôt juxtaglaciaire/éolien (2be, 9)	110
Zone 4	Cours d'eau	90
Zone 5	Lac/rivière Naja	0

La première zone correspond à celle pour laquelle l'infiltration est la plus élevée. La recharge est estimée à 29 % des précipitations totales, soit 240 mm/an. Cette alimentation a été appliquée à tous les hauts topographiques du secteur dont le sol est recouvert d'un till de faible épaisseur. La deuxième zone correspond aux secteurs recouverts d'un till se trouvant soit à mi-chemin des hauts topographiques ou dans les secteurs avec peu de dénivellation. L'épaisseur du till est généralement plus importante. La recharge est estimée à 24 % des précipitations, soit 201 mm/an. Dans ces deux premières zones, l'eau percole d'abord dans l'unité de till puis s'infiltre dans l'horizon de roc fracturé.

Bien qu'à l'échelle régionale, la perméabilité de l'unité de roc fracturé de l'horizon sous-jacent est assez faible, à l'échelle de l'affleurement, les discontinuités permettent une infiltration importante des pluies efficaces en sommet de montagne. Cette infiltration est par la suite confinée dans le réseau de fracture.

La troisième zone correspond aux secteurs où des dépôts fluvio-glaciaires ont été identifiés en bordure des principaux cours d'eau. La recharge appliquée dans ces secteurs correspond à 13 % des précipitations, soit 110 mm par an.

La quatrième zone est estimée à 11 % des précipitations, soit 90 mm par an. Cette alimentation a été appliquée à tous les cours d'eau. Finalement, une recharge nulle a été appliquée à tous les lacs considérant que ceux-ci sont en conditions de résurgence.

5.5 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES

Une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'étudier l'incertitude liée à la variation de certains paramètres du modèle. Les simulations suivantes ont été effectuées lors de l'analyse de sensibilité :

- **SS1** : diminution de la conductivité hydraulique des dépôts juxta-glaciaires à la valeur minimale ($K1=5,14E-07$ m/s);
- **SS2** : augmentation par un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique des dépôts juxta-glaciaires ($K1=5,79E-05$ m/s);
- **SS3** : diminution de la conductivité hydraulique du till à la valeur minimale ($K2=2,11E-07$ m/s);
- **SS4** : augmentation de la conductivité hydraulique du till à la valeur maximale ($K2=1,21E-05$ m/s);
- **SS5** : augmentation par un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique du roc fracturé ($K3=4,63E-06$ m/s);
- **SS6** : diminution par un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique du roc fracturé ($K3=4,63E-08$ m/s);
- **SS7** : augmentation par un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique du roc sain ($K4=1,16E-07$ m/s);
- **SS8** : diminution par un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique du roc sain ($K4=1,16E-09$ m/s);
- **SS9** : diminution de la recharge de 30 %;
- **SS10** : augmentation de la recharge de 30 %;
- **SS11** : augmentation de l'épaisseur du roc fracturé à 100 m.
- **SS12** : augmentation de la conductivité hydraulique du roc sain à la valeur du roc fracturé

Les résultats de l'analyse de sensibilité sur les charges hydrauliques et les débits de bases sont présentés aux tableaux 14 et 15. Les NMRS sont également indiqués pour chacune des simulations effectuées afin de juger de la qualité de la calibration.

Le modèle semble sensible à la variation de la conductivité hydraulique de l'unité de dépôt juxta-glaciaire (SS1, SS2) dans le secteur du parc à résidus. L'augmentation de la conductivité hydraulique des dépôts juxta-glaciaires induit un écoulement préférentiel dans cette unité et facilite l'exfiltration de l'eau souterraine vers les plans d'eau de surface. Dans le secteur du parc à résidus, les valeurs des charges hydrauliques obtenues sont plus faibles et les débits de base plus élevés.

Le modèle semble modérément sensible à la variation de la conductivité hydraulique de l'unité de till (SS3, SS4) dans le secteur de la fosse et de la halde à stériles. L'augmentation de la conductivité hydraulique du till induit un écoulement préférentiel dans cette unité et facilite l'exfiltration de l'eau souterraine vers les plans d'eau de surface où vers les dépôts juxta-glaciaires lorsque ceux-ci sont présents. L'unité de till est présente sur tout le domaine modélisé. Dans les secteurs où il n'est pas recouvert de dépôts juxta-glaciaires (p. ex. le secteur de la fosse), l'augmentation de la conductivité hydraulique du till favorise une diminution des charges hydrauliques et a peu d'influence sur les débits de base. Dans le secteur du parc à résidus, où le till est recouvert de dépôts juxta-glaciaires, la variation de la conductivité hydraulique du till a très peu d'influence sur la distribution des charges hydrauliques.

Le modèle semble fortement sensible à la variation de la conductivité hydraulique de l'unité de roc fracturé (SS5, SS6). L'augmentation de la conductivité hydraulique du roc fracturé induit un écoulement préférentiel dans cette unité et favorise un abaissement général des charges hydrauliques, surtout en sommet de montagne. L'augmentation de la conductivité hydraulique de l'unité de roc fracturé rend nul le débit de base de certains cours d'eau (J1, J2, J4, J5). Les valeurs de NMRS obtenues pour les charges hydrauliques et les débits de bases sont supérieures à la valeur cible de 10 %, indiquant une calibration satisfaisante.

Le modèle semble modérément sensible à la variation de la conductivité hydraulique de l'unité de roc sain (SS7, SS8). L'augmentation de la conductivité hydraulique du roc sain augmente l'écoulement dans cette unité et cause un abaissement générale des charges hydraulique, surtout en sommet de montagne. Les résultats de calibration très similaires de SS8 à ceux du modèle calibré appui le modèle conceptuel voulant que la conductivité hydraulique du roc diminue en profondeur.

Le modèle est sensible à la valeur de recharge appliquée (SS9, SS10). En général, l'augmentation de la recharge par 30 % favorise des charges hydrauliques plus élevées, alors qu'une diminution par 30 % favorise des charges hydrauliques plus faibles.

Tableau 15 Résultats de l'analyse de sensibilité sur les débits de base

STATION	ID BASSIN VERSANT	[1] DÉBIT (Q10.7 (ESTIVAL)) ¹ M ³ /J	[2] DÉBIT MOYEN ANNUEL ¹ M ³ /J	DÉBIT DE BASE (M ³ /J)													
				modèle calibré	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SS9	SS10	SS11	SS12	
P1	4	212	2100	244	238	252	218	307	51	200	222	245	193	290	262	72	
P2	3	203	1953	234	233	236	215	252	68	175	212	235	183	279	263	1	
P3	1	305	2938	151	147	157	172	151	140	112	122	153	110	186	147	37	
P4	1+2	643	6247	482	473	494	507	516	100	359	428	486	369	585	549	0	
P5	25	296	2912	201	202	198	204	214	79	207	174	204	136	260	170	93	
P6	24	330	3197	272	273	270	248	315	120	265	243	275	193	351	244	137	
P7	28	68	683	102	102	101	80	74	68	113	82	104	55	141	70	56	
P8	27	42	389	18	28	20	21	13	26	20	10	18	10	28	11	79	
P9	1+2+26	846	8217	841	836	868	776	925	486	670	767	846	633	1020	897	260	
P10	5	93	873	41	42	39	34	34	49	359	30	41	28	54	29	4	
P11	21	431	4190	370	383	331	325	405	268	332	352	372	266	471	348	295	
P12	22	186	1771	189	189	248	173	190	170	161	176	189	132	238	177	140	
P13	18	440	4277	473	503	438	476	495	530	412	497	470	348	596	519	531	
P14	19	635	6160	513	517	475	486	511	614	465	530	510	367	646	559	539	
P15	16+19+18	1980	19241	2010	1606	3892	1965	2118	2776	1835	2136	1995	1565	2415	2201	2373	
P16	20	118	1166	35	72	660	39	69	1	54	43	34	5	62	38	61	
P17	23	482	4683	374	171	765	367	388	472	360	391	371	307	421	395	426	
P20	13	144	1408	106	118	51	113	101	62	97	111	105	84	142	111	119	
M5	6	178	1763	359	306	370	367	388	503	319	359	367	277	454	403	262	
M6	6+7	905	8856	1073	911	1253	984	780	1078	576	709	692	571	807	799	674	
M7	6+7+9	1244	12148	1432	1192	1819	1384	1539	1950	1233	1416	1410	1120	1687	1564	1265	
M8	10	499	4856	442	422	304	513	408	792	512	425	442	395	567	475	266	
M9	11	550	5435	359	266	68	310	388	301	342	359	359	272	428	390	248	
M10	36	76	726	55	38	72	51	62	88	51	56	55	44	65	59	53	
M11	35	76	778	55	102	0	40	20	17	66	45	56	16	90	49	20	
M12	34	93	959	108	97	0	96	119	107	94	105	108	83	130	110	83	
J1	29	68	691	70	70	70	44	91	0	67	62	71	53	85	58	15	
J2	30	17	156	25	25	25	18	23	0	28	22	26	17	33	22	9	
J3	31	186	1866	193	194	182	161	209	112	176	159	196	135	248	163	75	
J4	32	127	1287	82	81	52	74	63	70	52	62	83	48	109	57	33	
J5	33	42	397	53	67	0	55	30	0	59	45	54	30	77	44	21	
				(NRMS)	4.56	6.08	20.94	4.49	5.37	13.95	6.44	5.2	4.66	8.07	7.11	5.43	11.4

¹ Étude hydrologique (GENIVAR, 2013a)

Le modèle semble sensible à la variation de l'épaisseur de l'unité de l'unité roc fracturé (SS11). L'augmentation de l'épaisseur de roc fracturé augmente l'écoulement dans cette unité et cause un abaissement général des charges hydraulique, surtout en sommet de montagne.

Le modèle semble très sensible à la variation de la conductivité hydraulique du roc sain (SS12). L'augmentation de la conductivité hydraulique du roc sain à celle du roc fracturé favorise un abaissement important des charges hydrauliques, surtout en sommet de montagne. Les valeurs de NMRS obtenues lors de la comparaison des charges hydrauliques et des débits de base sont supérieures à 10 %.

5.6 MODÉLISATION DE LA FOSSE

Les simulations numériques en régime permanent ont été complétées pour deux périodes différentes, soit à l'excavation complète de la mine (25 ans), et après 8 ans d'exploitation.

5.6.1 DISCRÉTISATION HORIZONTALE

Aucune modification n'a été apportée à la discrétisation horizontale du modèle.

5.6.2 DÉFINITION DES DIFFÉRENTES COUCHES DU MODÈLE

Aucune modification n'a été apportée aux différentes couches du modèle. Toutefois, les éléments se trouvant au-dessus du fond de la fosse ont été désactivés.

5.6.3 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES

Aucune modification n'a été apportée aux propriétés hydrauliques du modèle.

5.6.4 CONDITIONS LIMITES

Seules les conditions limites internes du modèle ont été modifiées pour simuler le nouveau régime d'écoulement associé à la présence d'une fosse.

Les données fournies par Cegertec WorleyParsons (2013) indiquent que l'eau des lacs situés au nord de la fosse sera détournée du lac Coyote vers le lac Kodiak, avant de s'écouler vers le lac à Paul. Des charges hydrauliques constantes égales à l'élévation du lac Kodiak, soit 336 m, ont été appliquées sur la couche supérieure pour représenter un cours d'eau entre le lac Kodiak et le lac de l'Ours Polaire. De plus, tous les nœuds de la couche supérieure qui sont associés à l'exutoire du lac Kodiak ont été convertis en charges constantes égales à l'élévation de surface afin de s'assurer d'inclure l'eau infiltrée dans ce cours d'eau dans le calcul du débit de dénoyage. Pour les autres émissaires qui n'existeront plus (lac de l'Ours Polaire, lac Coyote), il n'est pas nécessaire d'enlever les conditions limites de type drain puisque celle-ci se désactive s'il n'y a pas d'eau sortant à la surface du modèle.

Des charges constantes (type drain) ont été appliquées à tous les nœuds correspondant au fond de la fosse. Pour la simulation de la fosse finale (25 ans), des drains ont été appliqués jusqu'à une élévation de 15 m (couche 25), alors que pour la fosse intermédiaire (8 ans), des drains ont été appliqués jusqu'à une élévation de 215 m (couche 15).

La carte 17 montre une vue en plan des nouvelles conditions limites appliquées sur la couche supérieure.

5.6.5 RECHARGE

Aucune modification n'a été apportée à la recharge du modèle.

6 RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Les simulations numériques en régime permanent ont été complétées pour deux périodes différentes, soit à l'excavation complète de la mine (25 ans) et après 8 ans d'exploitation. À la fin de l'exploitation (25 ans), le niveau d'eau est maintenu à une élévation minimale de 15 mASL, correspondant à l'assèchement complet de la fosse. Les débits de dénoyage anticipés lors de chacune des périodes ont également été évalués lors des simulations. La géométrie finale de la fosse à chacune des périodes d'exploitation a été utilisée lors des simulations afin de déterminer les débits de pompage et l'étendue des impacts causés par le dénoyage. Le volume pompé comprend l'apport provenant de l'écoulement souterrain et la recharge provenant des précipitations.

6.1 MODIFICATION DE LA PIÉZOMÉTRIE RÉGIONALE

Les élévations piézométriques pour l'aquifère de roc fracturé dans des conditions complètes d'excavation lors du dénoyage sont montrées à la carte 18. Les rabattements simulés lors du dénoyage sont présentés à la carte 19. En condition d'excavation complète, la surface piézométrique régionale ne changera pas significativement, sauf à proximité de la fosse. Le rabattement augmente de façon significative près de la fosse, et ce, en raison de l'assèchement, puisque l'élévation de l'eau souterraine est à son plus bas au fond de la fosse. Les élévations de l'eau souterraine augmentent graduellement en s'éloignant de la fosse et atteignent des conditions statiques lorsque les effets de l'excavation et du dénoyage diminuent. La carte 19 montre que la courbe de rabattement de 0,5 m s'étendra jusqu'en bordure du lac à Paul. La présence de lacs au nord de la fosse limite l'étalement du cône de rabattement dans ce secteur. Le cône de rabattement s'étend jusqu'à environ 800 m de part et d'autre de la fosse.

Les figures 3 à 5 présentent des vues en coupe nord-sud (A-A') et est-ouest (B-B') de la distribution des charges hydraulique et de la position du niveau d'eau pour 1) le modèle calibré, 2) le modèle du dénoyage finale (fosse, 25 ans) et 3) le modèle du dénoyage intermédiaire (fosse, 8 ans). Il est possible de noter sur les figures 4 et 5 que la perte de charge hydraulique s'effectue principalement dans l'unité de roc sain, alors que le rabattement du niveau d'eau souterrain s'effectue dans l'unité de roc fracturé. Dans le roc sain, le niveau d'eau atteint la paroi de la fosse. La présence des lacs en périphérie de la fosse assure la recharge de l'aquifère et limite le rabattement de la nappe. L'élévation piézométrique reste au-dessus du lac à Paul au sud de la fosse.

Les simulations effectuées pour les conditions après 8 ans d'exploitation sont similaires à celles lors de l'exploitation finale. Les résultats sont présentés sur les cartes 20 et 21. Le cône de rabattement atteint les lacs situés au nord, mais n'atteint pas le lac à Paul. Le rabattement est moins important au niveau de la fosse puisqu'elle n'a pas atteint sa profondeur maximale.

6.2 DÉBITS DE DÉNOYAGE

Les débits de dénoyage ont été calculés en additionnant les quantités d'eau sortant de la fosse par les nœuds (type drain) et en y ajoutant les volumes d'eau provenant des précipitations.

Le tableau 16 présente les débits de dénoyage obtenus pour les deux périodes d'exploitation ayant fait l'objet d'une simulation. La quantité d'eau pompée dans la fosse est d'environ 5379 m³/j à la toute fin de l'exploitation et de 4975 m³/j après 8 ans d'excavation. Le volume d'eau provenant du ruissellement dans la fosse correspond à 60 % de l'eau pompée après 8 ans et à 55 % de l'eau pompée après 25 ans. L'apport d'eau provenant des eaux souterraines correspond à 40 et 45 % de l'eau pompée après 8 et 25 ans respectivement. Le peu de variation entre les résultats de 8 ans et 25 ans s'explique par le fait que l'apport d'eau souterraine provient principalement de l'unité de roc fracturé. Les figures 4 et 5 montrent que la portion de roc fracturé a déjà été excavée après 8 ans.

Tableau 16 Débits de dénoyages anticipés

8 ANS D'EXPLOITATION	
Eau pompée provenant du ruissellement au-dessus de la fosse (m ³ /jour)	2 970
Apport des eaux souterraines (m ³ /jour)	2 005
Débit de dénoyage anticipé (m ³ /jour)	4 975
Eau pompée provenant de la recharge au-dessus de la fosse (%)	60
Apport des eaux souterraines (%)	40
À LA FIN DE L'EXPLOITATION (25 ANS)	
Eau pompée provenant du ruissellement au-dessus de la fosse (m ³ /jour)	2 970
Apport des eaux souterraines (m ³ /jour)	2 409
Débit de dénoyage anticipé (m ³ /jour)	5 379
Eau pompée provenant de la recharge au-dessus de la fosse (%)	55
Apport des eaux souterraines (%)	45

6.3 IMPACTS SUR LES EAUX DE SURFACE

Il est possible de déterminer le risque d'impact sur les ruisseaux et les lacs à partir des simulations effectuées.

6.3.1 IMPACTS SUR LES COURS D'EAU

D'après l'étude hydrologique de réalisée en 2013 (GENIVAR, 2013a), le débit moyen annuel de la rivière Naja (P19) est de 85 769 m³/j, ce qui représente un apport d'eau vers le lac à Paul 16 fois supérieur au débit de dénoyage final (5379 m³/j). L'impact anticipé du dénoyage sur la rivière Naja est considéré négligeable. Celle-ci se situe à l'extérieur du cône de rabattement anticipé.

Les tableaux 17 et 18 présentent les valeurs des débits de base des cours d'eau simulées à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif (fosse après 8 ans et 25 ans). Les résultats obtenus pour le dénoyage final sont présentés sur la carte 22. Les volumes d'exfiltration représentent l'eau souterraine faisant résurgence dans le ruisseau, tandis que les volumes d'infiltration représentent l'eau du ruisseau s'infiltrant vers l'aquifère sous-jacent.

Selon les résultats obtenus pour le dénoyage final, le développement de la fosse pourrait affecter les débits de base des cours d'eau P1 à P10 et M5. La contribution des eaux souterraines aux débits de base des cours d'eau au sud de la fosse deviendrait quasi inexistante selon le modèle. Tous les autres débits de base des stations situées à l'extérieur des sous-bassins versants 1 à 6 et 24 à 27 ne subissent que des variations légères (1 à 3 %) ou nulle. Il est important de noter que ces réductions sont anticipées sur les débits de base, ceux-ci représentent environ 10 % du débit total moyen des ruisseaux. Les débits de base représentent une approximation de la contribution des eaux souterraines à l'écoulement des eaux de surface. L'impact de la réduction du débit de base sera moindre sur les débits moyens des cours d'eau. Les résultats pour l'exploitation après 8 ans sont légèrement plus faibles ou similaires.

Considérant que des modifications seront apportées aux bassins versants actuels et que les lacs au nord de la fosse seront connectés, les débits moyens de certains cours d'eau dans le secteur de la fosse seront modifiés. L'impact de la réduction des débits de base pourrait donc être négligeable sur les cours d'eau situés au nord, mais significatif pour ceux situés au sud. Le tableau 19 montre l'impact de la réduction des débits de base sur les débits moyens des cours d'eau en considérant les bassins versants actuels ainsi que les bassins versants modifiés. Les diminutions les plus importantes sont notées aux stations P6, P7 et P9, situées au sud de la fosse. Des diminutions de moins de 10 % sont notées pour les autres stations.

Tableau 17

Valeurs des débits de base simulées (stations) à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif, fosse 8 ans

Station	modèle calibré		modèle modifié (8 ans)							
	[1] Débit (Q10.7 (estival)) ¹ (m ³ /j)	[2] Débit moyen annuel ¹ (m ³ /j)	[3] Exfiltration au cours d'eau (m ³ /j)	[4] Infiltration à l'aquifère (m ³ /j)	[5]=[3]+[4] Total Débit de base (m ³ /j)	[6] Exfiltration au cours d'eau (m ³ /j)	[7] Infiltration au cours d'eau (m ³ /j)	[8]= [6]-[7] Total Débit de base (m ³ /j)	[9]=[8]-[5] Différence (m ³ /j)	[10]=[9]/[5] Réduction du débit de base (%)
P1	212	2100	244	0	244	149	8	141	103	42,0%
P2	203	1953	234	0	234	155	161	6	240	103,0%
P3	305	2938	151	0	151	136	0	136	15	10,0%
P4	643	6247	482	0	482	333	154	178	304	63,0%
P5	296	2912	201	0	201	103	28	75	126	63,0%
P6	330	3197	272	0	272	32	32	64	208	76,0%
P7	68	683	102	0	102	9	0	9	92	91,0%
P8	42	389	18	0	18	7	0	7	11	60,0%
P9	846	8217	841	0	841	18	0	18	823	98,0%
P10	93	873	41	0	41	5	0	5	36	87,0%
P11	431	4190	370	0	370	370	0	370	1	0,0%
P12	186	1771	189	0	189	189	0	189	0	0,0%
P13	440	4277	473	0	473	473	0	473	0	0,0%
P14	635	6160	513	0	513	513	0	513	0	0,0%
P15	1980	19241	2010	0	2010	2010	0	2010	0	0,0%
P16	118	1166	52	17	35	52	17	35	0	0,0%
P17	482	4683	374	0	374	374	1	373	1	0,0%
P20	144	1408	112	6	106	112	0	112	6	6,0%
M5	178	1763	359	0	359	342	0	342	17	5,0%
M6	905	8856	1073	0	1073	1054	0	1054	19	2,0%
M7	1244	12148	1432	0	1432	1404	0	1404	28	2,0%
M8	499	4856	520	79	442	435	0	435	77	1,0%
M9	550	5435	359	0	359	360	0	360	1	0,0%
M10	76	726	55	0	55	55	0	55	0	0,0%
M11	76	778	55	0	55	54	0	54	1	2,0%
M12	93	959	108	0	108	108	0	108	0	0,0%
J1	68	691	70	0	70	70	0	70	0	0,0%
J2	17	156	25	0	25	25	0	25	0	0,0%
J3	186	1866	193	0	193	192	0	192	1	0,0%
J4	127	1287	82	0	82	82	0	82	0	1,0%
J5	42	397	53	0	53	53	0	53	0	1,0%

Il y a plus d'eau qui s'infiltré dans le lac Ours Polaire que d'eau exfiltré suite à l'excavation de la fosse

¹ Étude hydrologique (Genivar, 2013)

Tableau 18

Valeurs des débits de base simulées (station) à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif, fosse 25 ans

Station	[1] Débit (Q10.7 (estival)) ¹		[2] Débit moyen annuel ¹	modèle calibré			modèle modifié (25 ans)				
	(m ³ /j)	(m ³ /j)		[3] Exfiltration au cours d'eau	[4] Infiltration à l'aquifère	[5]=[3]+[4] Total Débit de base	[6] Exfiltration au cours d'eau	[7] Infiltration au cours d'eau	[8]=[6]-[7] Total Débit de base	[9]=[8]-[5] Différence	[10]=[9]/[5] Réduction du débit de base (%)
P1	212	2100	244	0	244	142	11	131	113	46,3%	
P2	203	1953	234	0	234	148	154	6	240	102,4%	
P3	305	2938	151	0	151	130	0	130	21	13,8%	
P4	643	6247	482	0	482	318	153	166	316	65,6%	
P5	296	2912	201	0	201	94	45	49	152	75,5%	
P6	330	3197	272	0	272	28	0	28	243	89,5%	
P7	68	683	102	0	102	6	0	6	95	93,6%	
P8	42	389	18	0	18	6	0	6	12	67,5%	
P9	846	8217	841	0	841	14	0	14	827	98,3%	
P10	93	873	41	0	41	5	0	5	36	87,7%	
P11	431	4190	370	0	370	368	0	368	3	0,7%	
P12	186	1771	189	0	189	189	0	189	0	0,2%	
P13	440	4277	473	0	473	472	0	472	2	0,3%	
P14	635	6160	513	0	513	512	0	512	0	0,0%	
P15	1980	19241	2010	0	2010	2007	0	2007	3	0,1%	
P16	118	1166	52	17	35	52	17	35	0	0,2%	
P17	482	4683	374	0	374	374	0	374	0	0,0%	
P20	144	1408	112	6	106	110	7	104	3	2,4%	
M5	178	1763	359	0	359	333	0	333	26	7,3%	
M6	905	8856	1073	0	1073	1056	0	1056	17	1,6%	
M7	1244	12148	1432	0	1432	1405	0	1405	26	1,8%	
M8	499	4856	520	79	442	515	79	435	6	1,4%	
M9	550	5435	359	0	359	358	0	358	1	0,3%	
M10	76	726	55	0	55	55	0	55	0	0,4%	
M11	76	778	55	0	55	54	0	54	2	2,8%	
M12	93	959	108	0	108	107	0	107	0	0,5%	
J1	68	691	70	0	70	70	0	70	1	0,8%	
J2	17	156	25	0	25	25	0	25	0	0,7%	
J3	186	1866	193	0	193	191	0	191	2	1,0%	
J4	127	1287	82	0	82	81	0	81	1	1,2%	
J5	42	397	53	0	53	53	0	53	0	0,3%	

Il y a plus d'eau qui s'infiltre dans le lac Ours Polaire que d'eau exfiltré suite à l'excavation de la fosse

¹ Étude hydrologique (Genivar, 2013)

Tableau 19 Impact de la réduction des débits de base sur les débits moyens des cours d'eau dans le secteur de la fosse (bassins versants actuels et modifiés)

STATION	RÉDUCTION DÉBIT DE BASE (M ³ /J)	DÉBIT MOYEN ANNUEL		RÉDUCTION DU DÉBIT MOYEN	
		BV ACTUELS (m ³ /j)	BV MODIFIÉS (m ³ /j)	BV ACTUELS (%)	BV MODIFIÉS (%)
P1	113	2 100	6 152	5,37	1,83
P2	240	1 953	4 640	12,27	5,16
P3	21	2 938	1 849	0,71	1,12
P4	316	6 247	3 828	5,06	8,26
P5	152	2 912	6 826	5,22	2,22
P6	243	3 197	492	7,61	49,39
P7	95	683	389	13,92	24,44
P8	12	389	337	3,11	3,59
P9	827	8 217	294	10,06	100,00
P10	36	873	804	4,08	4,43
P20	3	1408	1408	0,18	0,18
M5	26	1763	2022	1,49	1,30

BV=Bassin versant

6.3.2 IMPACTS SUR LES LACS

Les tableaux 20 et 21 présentent les variations des apports d'eau souterraine aux lacs obtenues à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif (fosse après 8 ans et 25 ans). Comme mentionné précédemment, les volumes d'exfiltration représentent l'eau souterraine faisant résurgence dans le lac, tandis que les volumes d'infiltration représentent l'eau du lac s'infiltrant vers l'aquifère sous-jacent.

Selon les résultats du dénoyage final, la présence de la fosse limitera l'exfiltration des eaux souterraine vers les lacs situés au nord (Kodiak, Ours Polaire, Coyote, D, A, Loup) et favorisera l'infiltration de l'eau de surface de ceux-ci vers l'aquifère de till sous-jacent. Afin de quantifier les impacts sur les lacs, la réduction des apports d'eau souterraine au lac a été comparée à la quantité d'eau de surface totale reçue dans le bassin versant du lac (correspondant à la recharge du lac par les eaux de surface [précipitations-évapotranspiration]). Un pourcentage faible démontrera que malgré la diminution des exfiltrations, le bilan global d'eau du lac sera peu impacté. Un pourcentage élevé indique qu'une diminution des niveaux d'eau du lac pourrait se produire puisque le bilan global du lac serait négatif. Selon les résultats obtenus, les proportions de réduction d'apport d'eau vers les lacs par rapport aux volumes totales d'eau de surface reçue représenteraient 6 % pour le lac Kodiak, 19 % pour le lac Ours Polaire, 26 % pour le lac Coyote, 12 % pour le lac A, 4 % pour le lac D et 6 % pour le lac Loup. Tous les autres lacs ne présentent que des réductions négligeables par rapport au bilan d'eau global. La réduction des apports d'eau au lac à Paul représenterait 0,46 % des volumes d'eau total reçus au lac. Les résultats pour l'exploitation après 8 ans sont légèrement plus faibles ou similaires. La réduction des apports d'eau au lac à Paul représenterait 0,25 % des volumes d'eau total reçus au lac pour l'exploitation après 8 ans.

Tableau 20 Variation des apports d'eau souterraine à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif, fosse 8 ans

Lac	[1] Volume journalier d'apport d'eau de surface, sous-bassin versant actuel ¹ (m ³ /j)	[2] Volume journalier d'apport d'eau de surface, sous-bassin versant modifié ² (m ³ /j)	modèle calibré				modèle modifié (8 ans)				
			[3] exfiltration (m ³ /j)	[4] Infiltration (m ³ /j)	[5]=[3]+[4] Bilan total (m ³ /j)	[6] exfiltration (m ³ /j)	[7] Infiltration (m ³ /j)	[8]=[6]+[7] Bilan total (m ³ /j)	[9]=[8]-[5] variation d'apport d'eau au lac (m ³ /j)	[9]/[1] Proportion de la réduction par rapport à l'apport total d'eau aux bassins versants actuels (%)	[9]/[2] Proportion de la réduction par rapport à l'apport total d'eau aux bassins versants modifiés (%)
Lac à Paul	50496 ³	45515 ³	3619	0	3619	3505	1	3504	-115	0,23%	0,25%
Lac Kodiak	641	1837	244	0	244	149	8	141	-103	16,03%	5,59%
Lac Ours Polaire	592	1381	234	0	234	126	161	35	-269	45,38%	19,45%
Lac Coyote	1899	1147	296	0	296	163	154	9	-287	15,10%	25,01%
Lac D	900	567	151	0	151	136	0	136	-15	1,66%	2,64%
Lac A	271	247	168	0	168	144	0	144	-24	8,76%	9,64%
Lac Loup	530	604	359	0	359	333	0	333	-26	4,88%	4,28%
Lac du Grizzly	1270	1270	473	0	473	473	0	473	0	0,00%	0,00%
Rivière Neja	26359	23573	810	230	580	804	232	572	-7	0,03%	0,03%
Lac Épinette	13179	12427	521	30	491	521	30	491	0	0,00%	0,00%
Lac Siamois	548	4352	476	0	476	476	0	476	0	0,03%	0,00%
lac F	1886	1886	334	0	334	334	0	334	0	0,01%	0,01%
lac Lynx	2712	2910	345	0	345	345	0	345	-1	0,02%	0,02%
Lac de l'Ourson	432	432	112	6	106	112	6	105	-1	0,13%	0,13%

Il y a plus d'eau qui s'infiltre dans le lac Ours Polaire que d'eau exfiltré suite à l'excavation de la fosse

Exfiltration: Eau souterraine faisant résurgence dans les lacs

Infiltration: Eau du lac (eau de surface) s'infiltrant dans l'aquifère sous-jacent.

¹ Tableau 3.2, (GENIVAR, 2013)- évapotranspiration (45%)

² Tableau 4.2, (GENIVAR, 2013)- évapotranspiration (45%)

³ Inclut les sous-bassins versants (P5 à P9 +P19+P20) et la superficie du lac à Paul -évapotranspiration (45%)



Tableau 21

Variation des apports d'eau souterraine à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif, fosse 25 ans

Lac	[1] Volume journalier d'apport d'eau de surface, sous-bassin versant actuel ¹		[2] Volume journalier d'apport d'eau de surface, sous-bassin versant modifié ²		modèle calibré				modèle modifié (25 ans)				[9]/[2] Proportion de la réduction par rapport à l'apport total d'eau aux bassins versants modifiés
	(m ³ /j)	(m ³ /j)	(m ³ /j)	(m ³ /j)	[3] exfiltration	[4] Infiltration	[5]=[3]+[4] Bilan total	[6] exfiltration	[7] Infiltration	[8]=[6]+[7] Bilan total	[9]=[8]-[5] variation d'apport d'eau au lac	[9]/[1] Proportion de la réduction par rapport à l'apport total d'eau aux bassins versants actuels	%
Lac à Paul	50496 ³	45515 ³	3619	0	3619	0	3619	3429	18	3411	-208	0,41%	0,46%
Lac Kodiak	641	1837	244	0	244	0	244	142	11	131	-113	17,59%	6,14%
Lac Ours Polaire	592	1381	234	0	234	0	234	121	154	33	-267	45,14%	19,35%
Lac Coyote	1899	1147	296	0	296	0	296	155	152	3	-293	15,44%	25,57%
Lac D	900	567	151	0	151	0	151	130	0	130	-20	2,27%	3,60%
Lac A	271	247	168	0	168	0	168	139	0	139	-29	10,57%	11,62%
Lac Loup	530	604	359	0	359	0	359	324	0	324	-35	6,56%	5,76%
Lac du Grizzly	1270	1270	473	0	473	0	473	472	0	472	-2	0,13%	0,13%
Rivière Naja	38596	23573	810	230	580	230	580	798	234	564	-15	0,06%	0,07%
Lac Épinette	13179	12427	521	30	491	30	491	520	30	490	-1	0,01%	0,01%
lac Siamois	548	4352	476	0	476	0	476	476	0	476	0	0,08%	0,01%
lac F	1886	1886	334	0	334	0	334	333	0	333	0	0,02%	0,02%
lac Lynx	2712	2910	345	0	345	0	345	344	0	344	-1	0,04%	0,03%
Lac de l'Ourson	432	432	112	6	106	6	106	110	7	103	-3	0,65%	0,65%

Il y a plus d'eau qui s'infiltré dans le lac Ours Polaire que d'eau exfiltré suite à l'excavation de la fosse

Exfiltration: Eau souterraine faisant résurgence dans les lacs

Infiltration: Eau du lac (eau de surface) s'infiltrant dans l'aquifère sous-jacent.

² Tableau 4.2, (GENIVAR, 2013)- évapotranspiration (45%)³ Inclut les sous-bassins versants (P5 à P9 +P19+P20) et la superficie du lac à Paul -évapotranspiration (45%)

Une baisse du niveau moyen du lac situé au nord pourrait être observée, en raison de la réduction des apports d'eau souterraine vers les lacs et l'augmentation de l'infiltration de l'eau surface vers la fosse. Toutefois, tel que mentionné dans l'étude hydrologique (GENIVAR, 2013a), la variation du niveau d'eau dans les lacs Kodiak, de l'Ours Polaire et Coyote ne peut être évaluée pour le moment, puisque l'exutoire de ceux-ci devra être réaménagé en conditions futures. La variation du niveau d'eau dans ces lacs pourra néanmoins être contrôlée en fonction de la géométrie retenue lors de la conception du futur ouvrage d'évacuation.

Pour les autres lacs moins impactés (A, D, Loup), l'étude hydrologique (GENIVAR, 2013a) mentionne qu'une baisse de seulement quelques centimètres du niveau d'eau pourrait réduire de façon significative le débit évacué, conservant ainsi l'eau dans le lac.

6.4 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ SUR LES RÉSULTATS

Afin de vérifier l'influence des changements de conductivités hydrauliques et de recharge sur les résultats obtenus, des simulations additionnelles ont été effectuées.

Seuls les scénarios où une calibration satisfaisante, tant au niveau des charges hydrauliques, des débits d'eau de surface et du bilan de masse ont été utilisés. Il est important de préciser que les résultats de cette étude de sensibilité ne doivent être utilisés qu'à titre comparatif afin de mieux comprendre l'influence de certains paramètres sur les résultats. Les résultats du modèle calibré sont ceux correspondant le mieux au modèle conceptuel et pour lequel on obtient les meilleures statistiques de calibration.

Quatre scénarios ont été choisis aux fins de l'étude de sensibilité. Les simulations suivantes ont été effectuées:

- **SS4** : Augmentation de la conductivité hydraulique du till à la valeur maximale (1,21E-05 m/s)
- **SS7** : Augmentation de la conductivité hydraulique du roc sain d'un ordre de grandeur (1,16E-07 m/s)
- **SS10** : Augmentation de la recharge de 30%
- **SS11**: Augmentation de l'épaisseur de l'unité de roc fracturé (0-100m)

Les débits de dénoyage anticipés ont été recalculés pour chacune des simulations et sont présentés au tableau 22. Les valeurs de débit anticipé sont peu influencées par l'augmentation de la conductivité hydraulique du till et l'augmentation de la recharge. Toutefois, l'augmentation des valeurs de conductivité hydraulique des unités de roc fracturé et de roc sain augmente considérablement les valeurs de débits de dénoyage anticipés.

Tableau 22 Variation des débits de dénoyage selon le scénario

À LA FIN DE L'EXPLOITATION		DÉBIT DE DÉNOYAGE ANTICIPÉ (m ³ /jour)
Scénario calibré :	Meilleure calibration	5 379
Scénario SS4 :	Augmentation de la conductivité hydraulique du till à la valeur maximale	5 402
Scénario SS7 :	Augmentation de la conductivité hydraulique du roc sain d'un ordre de grandeur	10 087
Scénario SS10 :	Augmentation de la recharge de 30%	5 449
Scénario SS11 :	Augmentation de l'épaisseur de l'unité de roc fracturé (0-100m)	7 424

Ainsi, dans l'éventualité où la valeur de la conductivité du roc sain serait d'un ordre de grandeur plus élevé que le scénario initial (meilleure calibration), on obtiendrait un débit de dénoyage maximal de 10 087 m³/jour. Il semble toutefois peu probable que la conductivité du roc sain soit de 1,16E-7 m/s. En effet, les résultats des essais Lugeon (WSP, 2014) démontrent que la conductivité du roc sain diminue de manière importante avec la profondeur. Cette observation est d'ailleurs confirmée avec une meilleure calibration lorsqu'on tient compte de la diminution de la conductivité en profondeur (scénario calibré).

Les figures 6 et 7 présentent des vues en coupe nord-sud (A-A') de la distribution des charges hydraulique et de la position du niveau d'eau de chacun des scénarios modifiés en comparaison avec le modèle initial (fosse, 25 ans). Le tableau 23 montre l'impact anticipé sur les volumes d'eau dans les lacs pour les différents scénarios.

La distribution des charges hydrauliques et le rabattement du niveau d'eau des scénarios SS4 et SS10 sont similaires au modèle calibré. Par contre, des changements sont visibles lorsqu'on augmente la conductivité hydraulique du roc sain (SS7) ou lorsque qu'on augmente l'épaisseur de l'unité de roc fracturé à 100 m (SS11).

L'augmentation de la conductivité hydraulique du roc sain (SS7) favorise une perte de charge hydraulique verticale mieux répartie entre l'unité de roc sain et de roc fracturé et abaisse le niveau de la nappe au sud de la fosse. La présence des lacs en périphérie de la fosse continue d'assurer la recharge de l'aquifère et limite le rabattement de la nappe. En comparant les bilans d'eau (exfiltration + infiltration) et les apports d'eau de surface projetés (conditions futures) qui seront fournis aux sous-bassins versants des lacs, les réductions par rapport aux volumes totales d'eau reçus représenteraient 13 % pour le lac Kodiak, de 39 % pour le lac Ours Polaire, de 58 % pour le lac coyote, de 67 % pour le lac A, de 28 % pour le lac D, de 37 % pour le lac Loup et de 7 % pour le lac de L'Ourson. Tous les autres lacs ne présentent que des réductions négligeables du bilan d'eau.

Tableau 23 Impact anticipé sur les volumes d'eau des lacs, étude de sensibilité

Lac	modèle calibré		modèle modifié, SS4		modèle modifié, SS7		modèle modifié, SS10		modèle modifié, SS11		
	[1] Volume journalier d'apport d'eau de surface, sous-bassin versant actuel ¹	[2] Volume journalier d'apport d'eau de surface, sous-bassin versant modifié ²	Proportion de la réduction par rapport à l'apport total d'eau aux bassins versants modifiés-dénoyage final	[6] Variation d'apport d'eau au lac	[6]/[2] Proportion de la réduction par rapport à l'apport total d'eau aux bassins versants modifiés	[7] Variation d'apport d'eau au lac	[7]/[2] Proportion de la réduction par rapport à l'apport total d'eau aux bassins versants modifiés	[8] Variation d'apport d'eau au lac	[8]/[2] Proportion de la réduction par rapport à l'apport total d'eau aux bassins versants modifiés	[9] Variation d'apport d'eau au lac	[9]/[2] Proportion de la réduction par rapport à l'apport total d'eau aux bassins versants modifiés
	(m ³ /j)	(m ³ /j)	%	(m ³ /j)	%	(m ³ /j)	%	(m ³ /j)	%	(m ³ /j)	%
Lac à Paul	50496 ³	45515 ³	0,46%	-236	0,52%	-1350	2,97%	-176	0,39%	-651	1,43%
Lac Kodjak	641	1837	6,14%	-122	6,63%	-241	13,13%	-125	6,78%	-256	13,94%
Lac Ours Polaire	592	1381	19,35%	-348	25,19%	-541	39,19%	-284	20,57%	-596	43,17%
Lac Coyote	1899	1147	25,57%	-311	27,12%	-670	58,46%	-307	26,80%	-665	58,01%
Lac D	900	567	3,60%	-21	3,69%	-155	27,41%	-19	3,36%	-92	16,14%
Lac A	271	247	11,62%	-30	12,19%	-165	66,97%	-24	9,80%	-130	52,59%
Lac Loup	530	604	5,76%	-32	5,23%	-224	37,01%	-31	5,05%	-142	23,58%
Lac du Grizzly	1270	1270	0,13%	-3	0,24%	-25	1,99%	-3	0,21%	-2	0,15%
Rivière Neja	38596	23573	0,07%	-19	0,08%	-147	0,63%	-14	0,06%	-49	0,21%
Lac Epinette	13179	12427	0,01%	0	0,00%	-11	0,09%	-1	0,01%	-1	0,01%
lac Siamois	548	4352	0,01%	0	0,01%	-5	0,11%	0	0,01%	0	0,01%
lac F	1886	1886	0,02%	0	0,02%	-3	0,14%	0	0,02%	0	0,00%
lac Lynx	2712	2910	0,03%	-1	0,03%	-10	0,36%	-1	0,03%	-1	0,03%
Lac de l'Ourson	432	432	0,65%	-3	0,74%	-30	7,02%	-8	1,82%	-5	1,08%

Exfiltration: Eau souterraine faisant résurgence dans les lacs

Infiltration: Eau du lac (eau de surface) s'infiltrant dans l'aquifère sous-jacent.

¹ Tableau 3.2. (GENIVAR, 2013)- évapotranspiration (45%)

² Tableau 4.2. (GENIVAR, 2013)- évapotranspiration (45%)

³ Inclut les sous-bassin versant (P5 à P9 +P19+P20) et la superficie du lac à Paul -évapotranspiration (45%)



L'augmentation de l'épaisseur de roc fracturé (SS11) augmente l'écoulement préférentiellement horizontal dans cette unité et abaisse le niveau de la nappe au sud de la fosse. La présence des lacs en périphérie de la fosse continue d'assurer la recharge de l'aquifère et limite le rabattement de la nappe. En comparant les bilans d'eau (exfiltration + infiltration) et les apports d'eau de surface projetés (condition future) qui seront fournis aux sous-bassins versants des lacs, les réductions par rapport aux volumes totales d'eau reçus représenteraient 14 % pour le lac Kodiak, de 43 % pour le lac Ours Polaire, de 58 % pour le lac Coyote, de 53 % pour le lac A, de 16 % pour le lac D, de 24 % pour le lac Loup et de 1 % pour le lac de L'Ourson. Tous les autres lacs ne présentent que des réductions négligeables du bilan d'eau.

7 CONCLUSION

WSP a été mandatée afin de réaliser une modélisation hydrogéologique dans le cadre du futur projet minier du Lac à Paul. L'objectif des travaux est de préciser les impacts de dénoyage de la fosse sur le milieu environnant.

Le modèle conceptuel a été développé à partir des données récoltées lors des campagnes de terrain réalisées entre 2012 et 2014, ainsi qu'à partir des données disponibles sur la géologie du secteur. Le modèle conceptuel a permis de définir trois unités hydrostratigraphiques : (1) un horizon fluvioglaciale de sable avec un peu de silt à silteux; (2) un horizon de till à matrice sableuse et graveleuse; et (3) le roc. L'unité rocheuse a été subdivisée en deux unités afin de représenter une zone plus fracturée identifiée lors des travaux de terrain. Les premiers 40 m du roc sont considérés comme étant plus perméables. Le modèle a été calibré à partir de 55 niveaux d'eau relevés dans les puits du secteur à l'étude et à partir de 31 stations de débits d'eau de surface (débits estimés).

Le modèle conceptuel utilisé pour représenter le système hydrogéologique a été simplifié de manière à : 1) respecter le plus fidèlement possible les observations de terrain; et 2) produire des simulations conservatrices concernant l'impact du dénoyage de la fosse. Notamment, la présence de sédiments dans les lacs, possiblement moins perméables, n'a pas été incluse dans le modèle. La présence de sédiments diminue généralement l'infiltration de l'eau de surface vers l'aquifère.

Les simulations numériques en régime permanent ont été complétées pour deux périodes différentes, soit à l'excavation complète de la mine (25 ans) et après 8 ans d'exploitation.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Le modèle en régime permanent calibré obtenu représente de façon satisfaisante les conditions existantes au site minier et celui-ci répond aux normes de l'industrie.

Prédictions à 25 ans d'exploitation (exploitation finale)

- L'excavation complète de la mine a été simulée en considérant une élévation d'eau à 15 mASL au fond de la fosse puisque celle-ci sera asséchée par les activités de dénoyage.
- Le modèle prévoit que 5 379 m³ d'eau seront rejetés hors de la fosse sur une base quotidienne. 45 % de l'eau rejetée est liée à la recharge au-dessus de la fosse et 45 % aux apports d'eau souterraine.
- Le cône de rabattement prévu de 0,5 m atteindra les lacs situés en périphérie du site minier. Il s'étend jusqu'à environ 800 m de part et d'autre de la fosse.

- Selon les résultats obtenus pour le dénoyage final, le développement de la fosse pourrait affecter les débits de base des cours d'eau P1 à P10 et M5. Les réductions des débits de base pour ces stations se situent entre 7 % et 100 %. La plupart des cours d'eau touchés sont situés au sud de la fosse. Néanmoins, le débit de base de tous les cours d'eau situés à l'intérieur du cône de rabattement de 0,5 m diminuera. Toutefois, le débit de base représente environ 10 % du débit total du ruisseau, les impacts sur les débits totaux seront donc moindres.
- En considérant, la modification des bassins versants à la suite de l'aménagement des infrastructures, la réduction des débits moyens sera supérieure à 20 % pour les stations P7, P6 et P9.
- Les lacs situés au nord de la fosse (Kodiak, Ours Polaire, D, A du Loup) pourraient être affectés. Les pertes d'apport d'eau souterraine lors du dénoyage représentent entre 3,6 % et 25,6 % des apports d'eau de surface reçus par le lac. Les lacs les plus affectés seraient le lac Coyote (25,6 %) et le lac Ours Polaire (19,5 %).
- La réduction des apports d'eau au lac à Paul représenterait 0,46 % des volumes d'eau totaux reçus au lac. L'impact est donc considéré comme négligeable.
- La variation du niveau d'eau dans les lacs Kodiak, de l'Ours Polaire et Coyote ne peut être évaluée pour le moment, puisque l'exutoire de ceux-ci devra être réaménagé en conditions futures. La variation du niveau d'eau dans ces lacs pourra néanmoins être contrôlée en fonction de la géométrie retenue lors de la conception du futur ouvrage d'évacuation (GENIVAR, 2013a). Pour les autres lacs moins impactés (A, D, Loup), l'étude hydrologique (GENIVAR, 2013a) mentionne qu'une baisse de seulement quelques centimètres du niveau d'eau pourrait réduire de façon significative le débit évacué, conservant ainsi l'eau dans le lac.

Prédictions à 8 ans d'exploitation

- L'excavation complète de la mine a été simulée en considérant une élévation d'eau à 215 mASL au fond de la fosse puisque celle-ci sera asséchée par les activités de dénoyage.
- Le modèle prévoit que 4 975 m³ d'eau seront rejetés hors de la fosse sur une base quotidienne. 60 % de l'eau rejetée est liée à la recharge au-dessus de la fosse et 40 % aux apports d'eau souterraine.
- Le cône de rabattement prévu de 0,5 m atteindra les lacs situés au nord de la fosse, mais n'atteint pas le lac à Paul.
- Les impacts sur les cours d'eau et les lacs sont similaires à ceux observés lors du dénoyage final.
- La réduction des apports d'eau au lac à Paul représenterait 0,25 % des volumes d'eau totaux reçus au lac. L'impact est donc considéré comme négligeable.

Étude de sensibilité

Afin de vérifier l'influence des changements de conductivités hydrauliques et de recharge sur les résultats obtenus, des simulations additionnelles ont été effectuées. Les conclusions sont les suivantes :

- Les valeurs de débit de dénoyage anticipé sont peu influencées par l'augmentation de la conductivité hydraulique du till et l'augmentation de la recharge.
- Dans l'éventualité où la valeur de la conductivité du roc sain serait d'un ordre de grandeur plus élevé que le scénario initial (meilleure calibration), on obtiendrait un débit de dénoyage maximal de 10 087 m³/jour.
- Dans l'éventualité où l'épaisseur du roc fracturé est plus importante (100 m au lieu de 40 m), on obtiendrait un débit de dénoyage de 7 424 m³/jour.
- La variation de la conductivité hydraulique du till et l'augmentation de la recharge a peu d'influence sur les résultats obtenus pour les diminutions d'apports d'eau aux lacs.
- L'augmentation de la conductivité hydraulique du roc sain ou l'augmentation de l'épaisseur de la zone de roc fracturé (de 40 m à 100 m) a une influence importante sur la diminution des apports d'eau aux lacs.
- La réduction de l'apport d'eau au lac à Paul atteint un maximum de 2,97 % du volume total d'eau de surface reçu au lac lorsque la conductivité hydraulique du roc sain est augmentée à une valeur de 1,16E-7 m/s. Les impacts sur les lacs sont également plus importants en considérant ces conditions extrêmes.

Le fait de considérer une conductivité hydraulique unique pour le roc (1,16E-7 m/s) reste toutefois peu probable. En effet, les résultats des essais Lugeon (WSP, 2014) démontrent que la conductivité du roc sain diminue de manière importante avec la profondeur. Cette observation est d'ailleurs confirmée avec une meilleure calibration lorsqu'on tient compte de la diminution de la conductivité en profondeur (scénario calibré). Les valeurs obtenues pour ce cas précis représentent donc un cas extrême et peu réaliste.

Sommaire

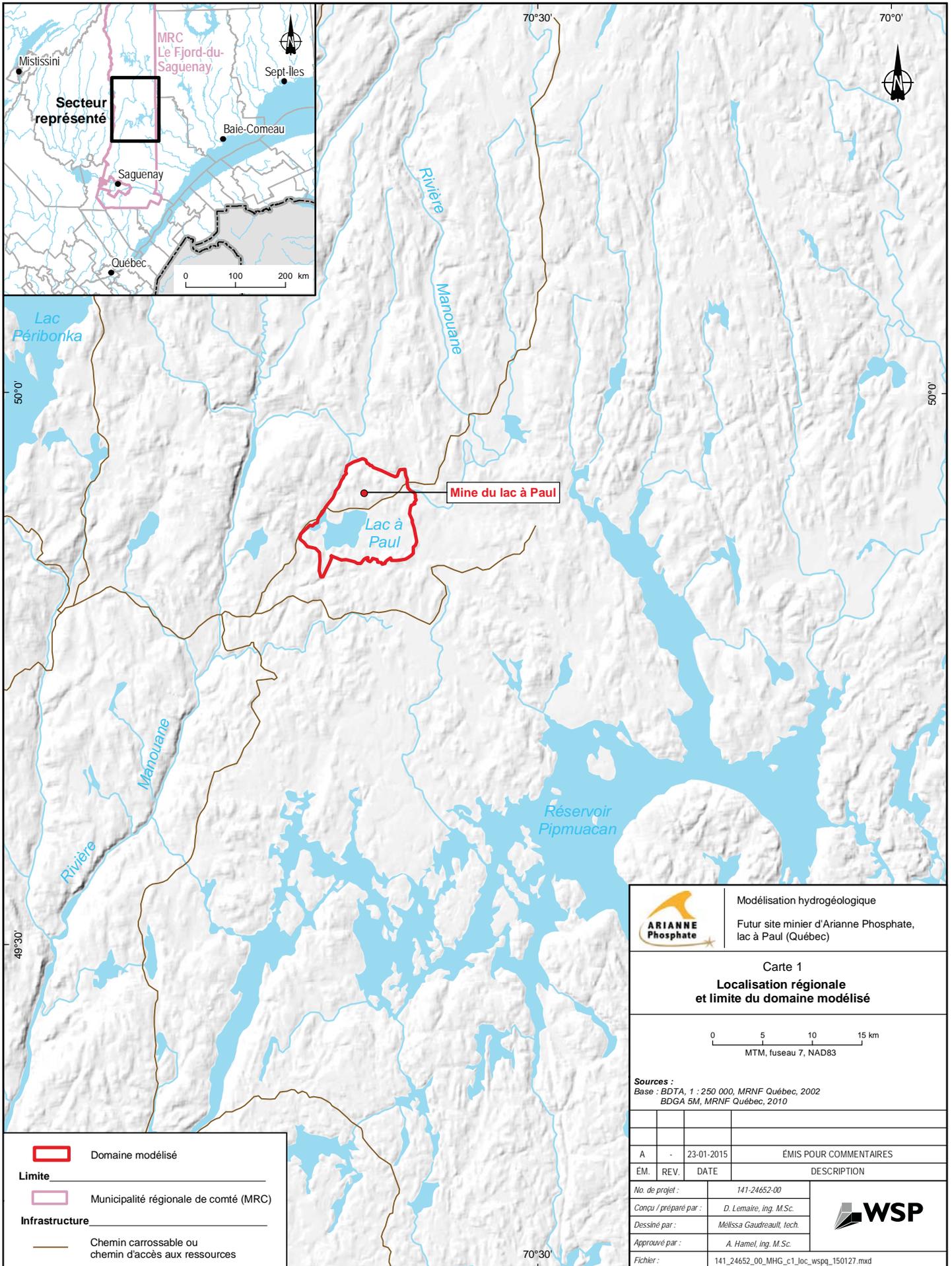
En conclusion, selon les résultats obtenus lors des différentes simulations (8 ans, 25 ans) ainsi que lors de l'étude de sensibilité, les débits de dénoyage anticipés se situeraient entre 5 000 et 7 500 m³/jour. Les débits de base de tous les cours d'eau à l'intérieur du cône de rabattement seront affectés. Certains lacs situés au nord de la fosse pourraient également affectés à divers degrés. Selon les résultats, le lac à Paul ne subirait aucun impact lié au dénoyage de la fosse.

8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON, M. P. AND WOESSNER, W. W. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. San Diego: Academic Press, 1992.
- BDTQ, 2007. Données digitalisées d'élévation topographique, échelle 1:20 000.
- Cegertec WorleyParsons, 2012. Données digitalisées des lacs et cours d'eau, 207090-19468-3200-CI-DGA-0001.
- CEGERTEC. 2013. Site Aménagement Lac à Paul Apatite Beneficiation Plant. Plan view. Plan d'ensemble du secteur minier. No 207090-19468-3200-CI-DGA-0001, Rév. 0B.
- DELAUNAY, B. (1934). Sur la sphere vide. Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk, 7(793-800), 1-2.
- DESSAU, 2012. Données digitalisées d'élévation bathymétrie des principaux lacs.
- DESSAU-NUTSHIMIT. 2012. Mine à ciel ouvert d'apatite – Lac à Paul. Inventaire du milieu – rapport principal. N/Réf. 068-P041458-0100-EN-R100-00 PRÉFINAL. 21 décembre 2012. 160 pages et annexes.
- Environnement Canada, 2013. Données météorologiques station Péribonca (1961-1990).
- GENIVAR. 2013a. Projet minier de Ressources d'Arianne au lac à Paul. Caractérisation hydrologique du secteur à l'étude, en conditions actuelles et futures. Rapport de GENIVAR Inc. à Ressources d'Arianne Inc. 55 p. et annexes.
- GENIVAR, 2013a. Projet de mine d'apatite du lac à Paul. Étude d'impact sur l'environnement. Rapport principal. Pagination multiple + 2 volumes annexes.
- GENIVAR, 2013c. Caractérisation environnementale complémentaire des sols. Étude d'impact sur l'environnement, Projet de mine d'apatite du lac à Paul.
- HYDRO-RESSOURCES, 2014. Étude hydrogéologique, Rapport technique. Dossier PR12-117, 59 pages et annexes.
- JOURNEAUX ass. Report on pit slope design, 2013. The Lac-a-Paul Apatite-ilmenite Project Arianne Resources inc, Report L-12-1558.

- LVM. 2014. Échantillonnage et analyse de la qualité de l'eau souterraine. Lac à Paul. 11 pages + 5 annexes.
- LVM, 2013. Étude géotechnique. Implantation d'une usine, Lac à Paul. REF : 153P-0001126-0-01-100-GE-R-0001-0A. 24 pages + 5 annexes.
- MDDEP. 2005. Directive 019 sur l'industrie minière. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 101 p.
- MFFP, 1993. Données digitalisées des dépôts quaternaires. Carte des dépôts de surface, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, Service des inventaires forestiers, feuillet 22E/15, échelle 1: 50 000
- ROUSSEAU BABIN. 2012. Données digitalisées d'élévation topographique (LIDAR).
- SIGEOM, 2014. Cartes géologiques
- WSP. 2014. Étude hydrogéologique. Futur site minier d'Arianne Phosphate. Lac à Paul. (Québec). Rapport de WSP à Arianne Phosphate inc. 82 p. et annexes.

CARTES



Modélisation hydrogéologique
Futur site minier d'Arianne Phosphate,
lac à Paul (Québec)

Carte 1
**Localisation régionale
et limite du domaine modélisé**



Sources :
Base : BDTA, 1 : 250 000, MRNF Québec, 2002
BDGA 5M, MRNF Québec, 2010

A	-	23-01-2015	ÉMIS POUR COMMENTAIRES
ÉM.	REV.	DATE	DESCRIPTION
No. de projet :		141-24652-00	
Conçu / préparé par :		D. Lemaire, Ing. M.Sc.	
Dessiné par :		Méïssa Gaudreault, tech.	
Approuvé par :		A. Hamel, Ing. M.Sc.	
Fichier :		141_24652_00_MHG_c1_loc_wspq_150127.mxd	



- Domaine modélisé
- Limite**
- Municipalité régionale de comté (MRC)
- Infrastructure**
- Chemin carrossable ou chemin d'accès aux ressources



49.56

49.55

49.54

49.53

49.52

49.51

Lithologie

- [Purple] [Light Purple] [Light Green] [Light Brown] [Light Blue] [Orange] [Green] [Dark Green]

Failles

- [Blue line with triangles]
- [Blue line with circles]

Infrastructures

- [Black line]
- [Dashed black line]

Composants

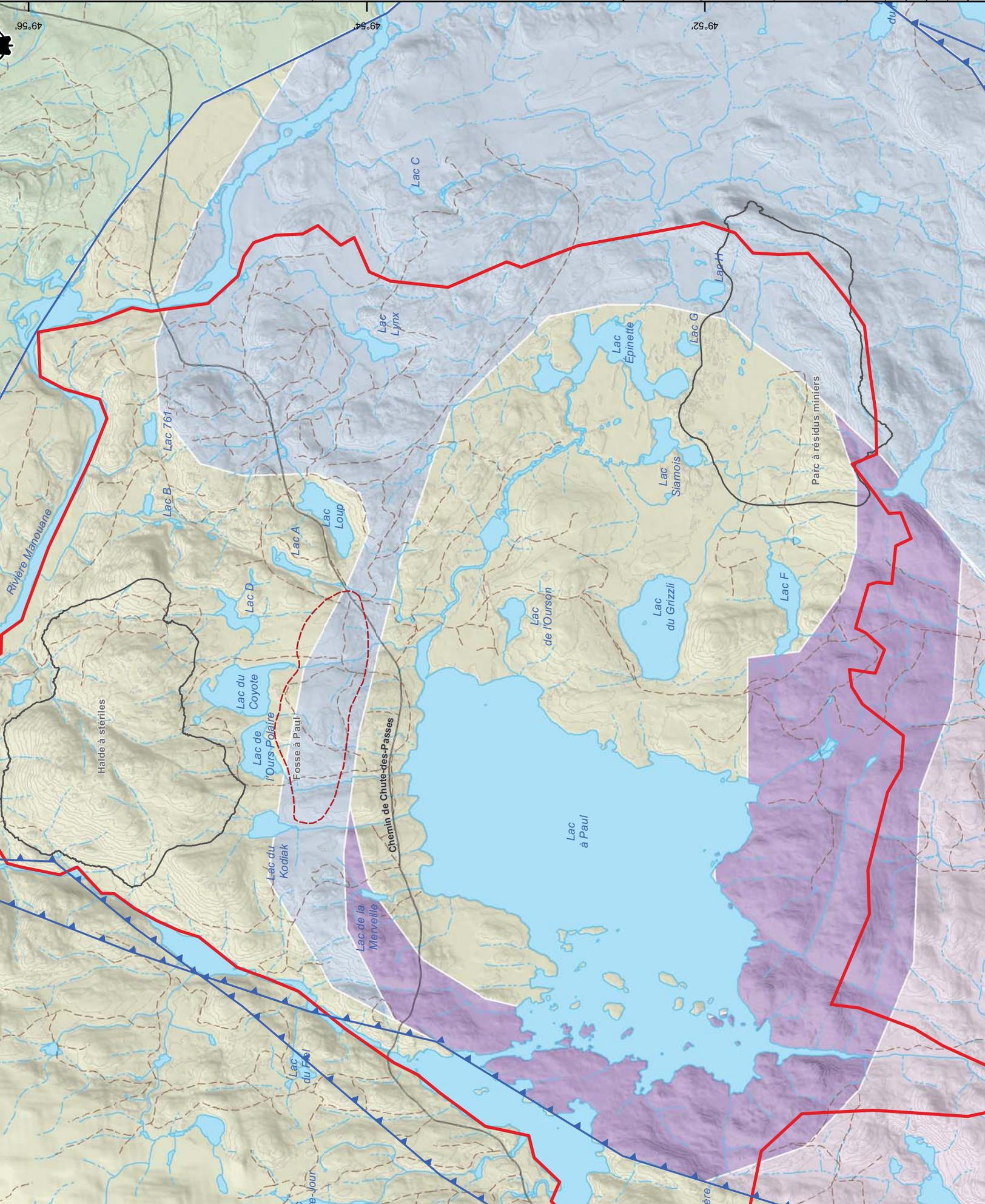
- [Red dashed line]
- [Black solid line]

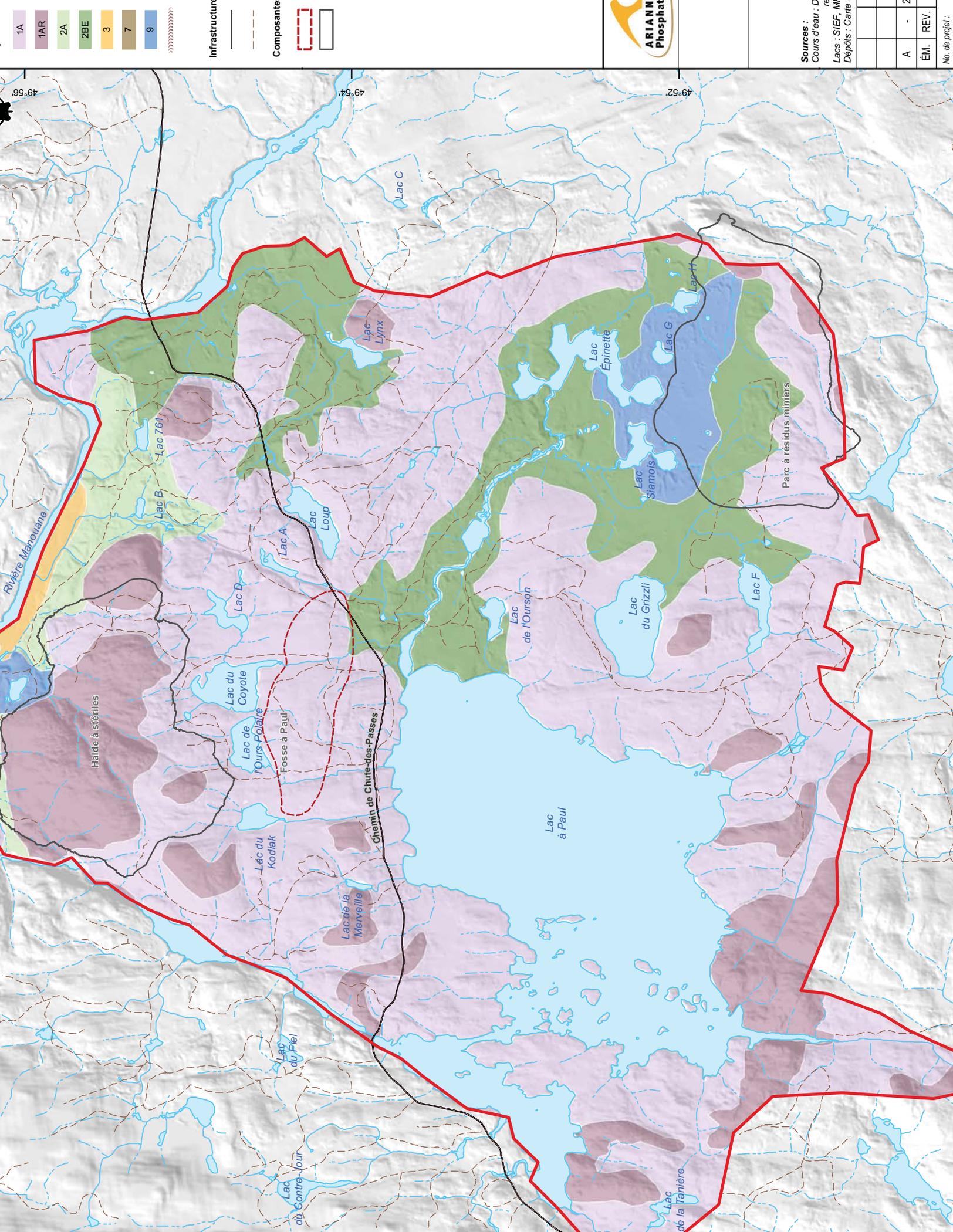
ARIANN Phosphat

Sources : SIG
 Géologie : D
 Cours d'eau : D
 re
 Lacs : SIEF, M

A	-	2	
ÉM.	REV.		

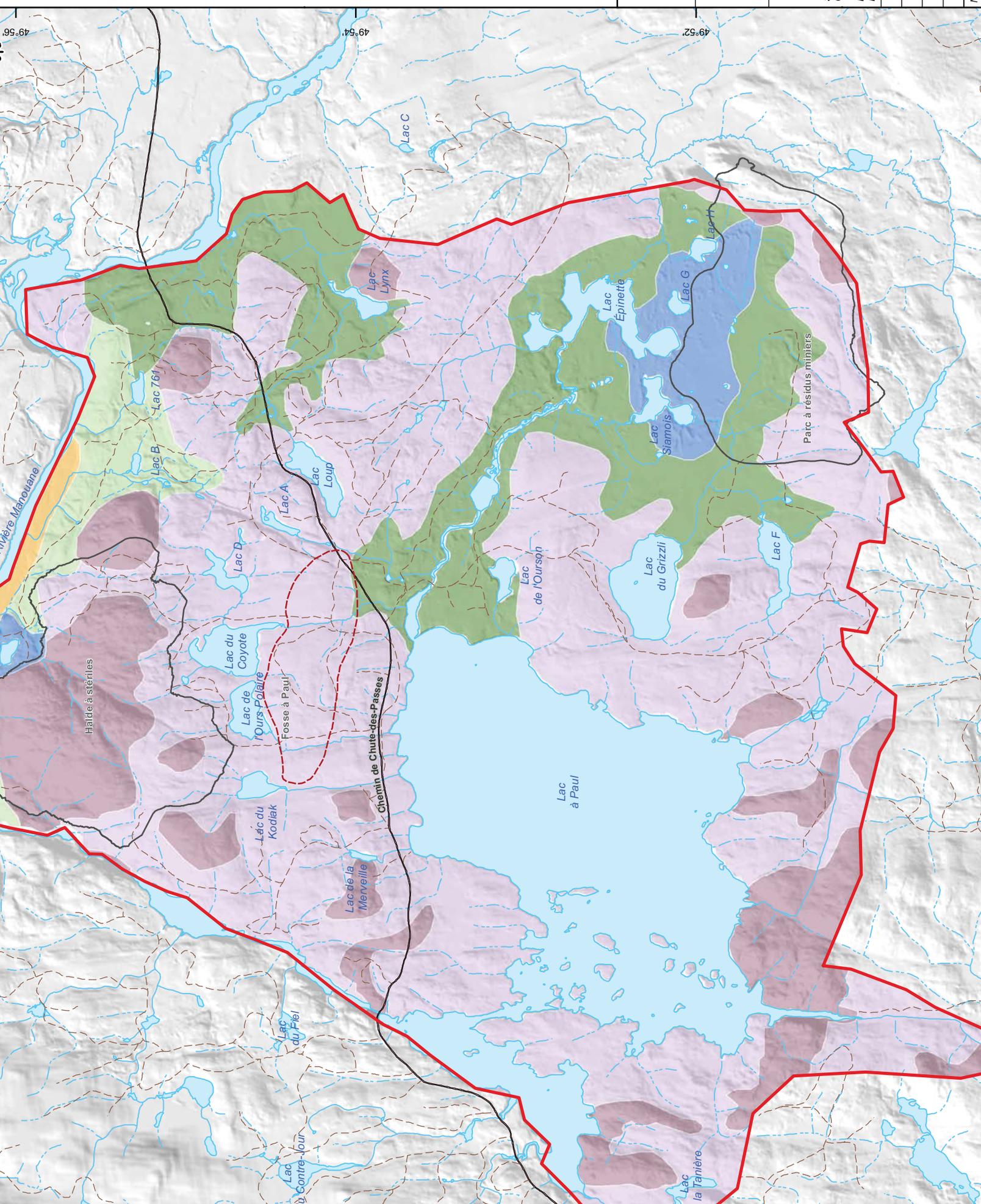
No. de projet :

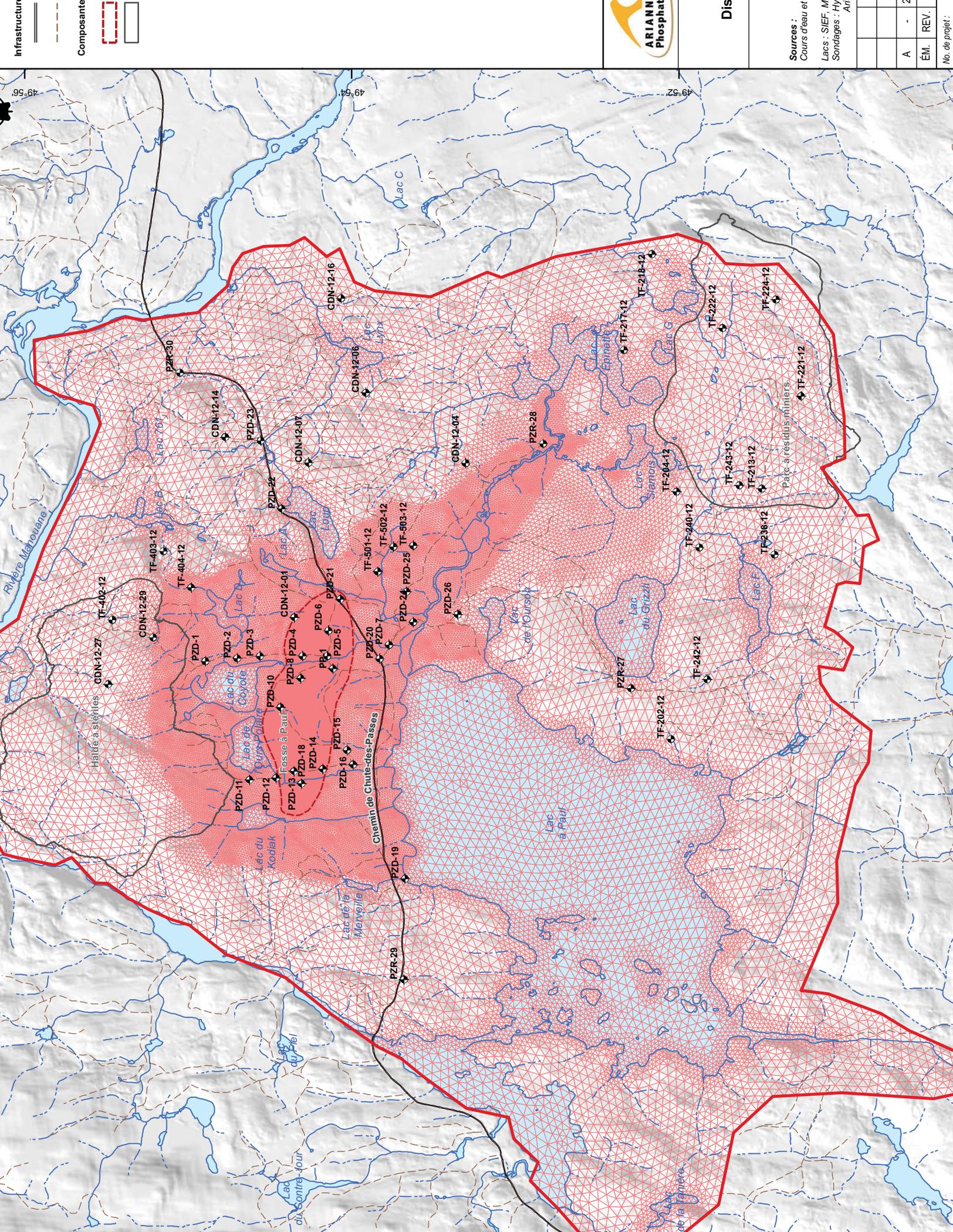




- 1A
- 1AR
- 2A
- 2BE
- 3
- 7
- 9

Infrastructure
Composante





Infrastructures
 Composante
 [Red dashed line symbol]
 [Black solid line symbol]



Dis

Sources : Cours d'eau et
 Lacs : SIEF, M
 Sondages : Hy
 Air
 No. de projet :

A	-	2	
ÉM.	REV.		

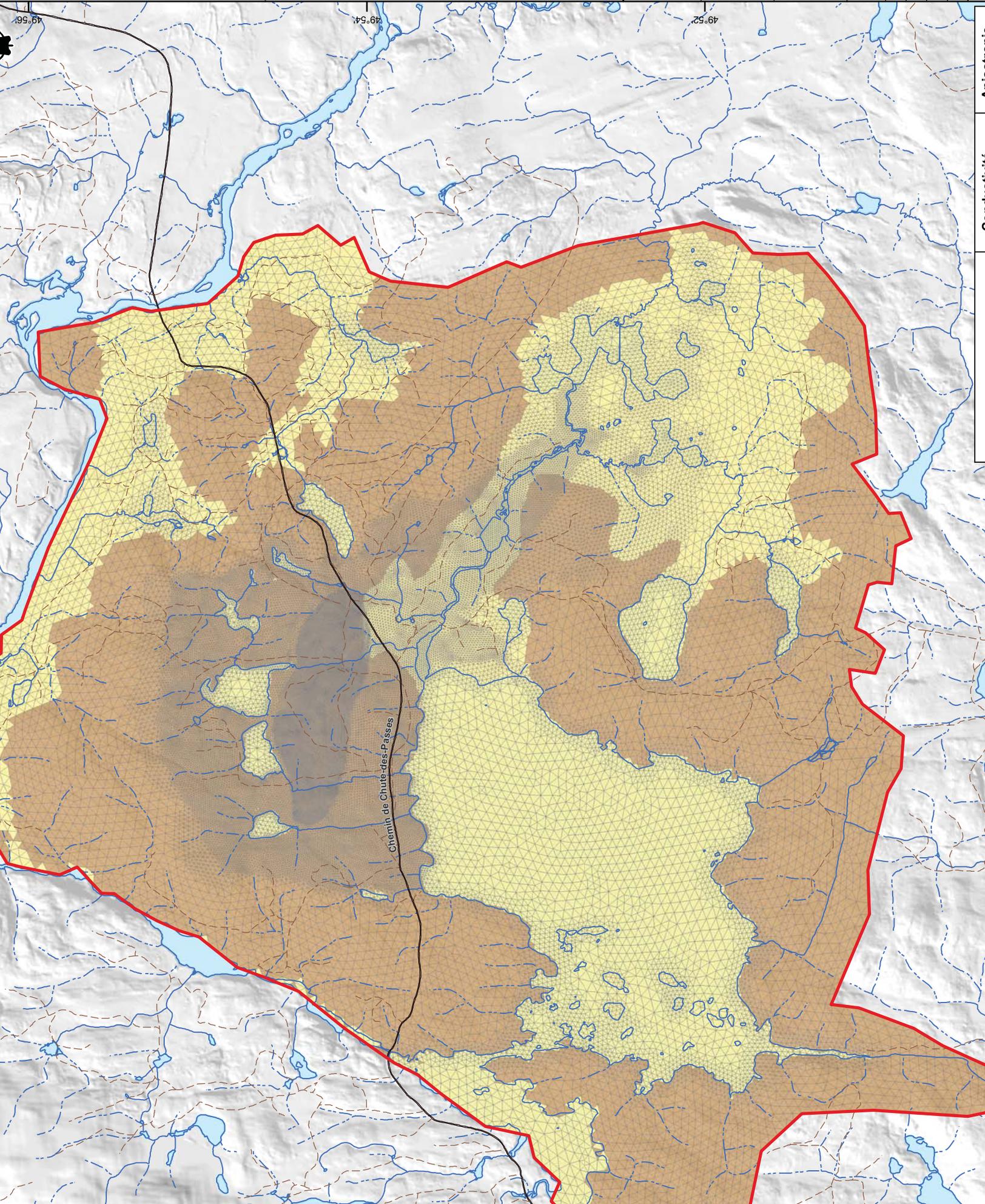
Composant



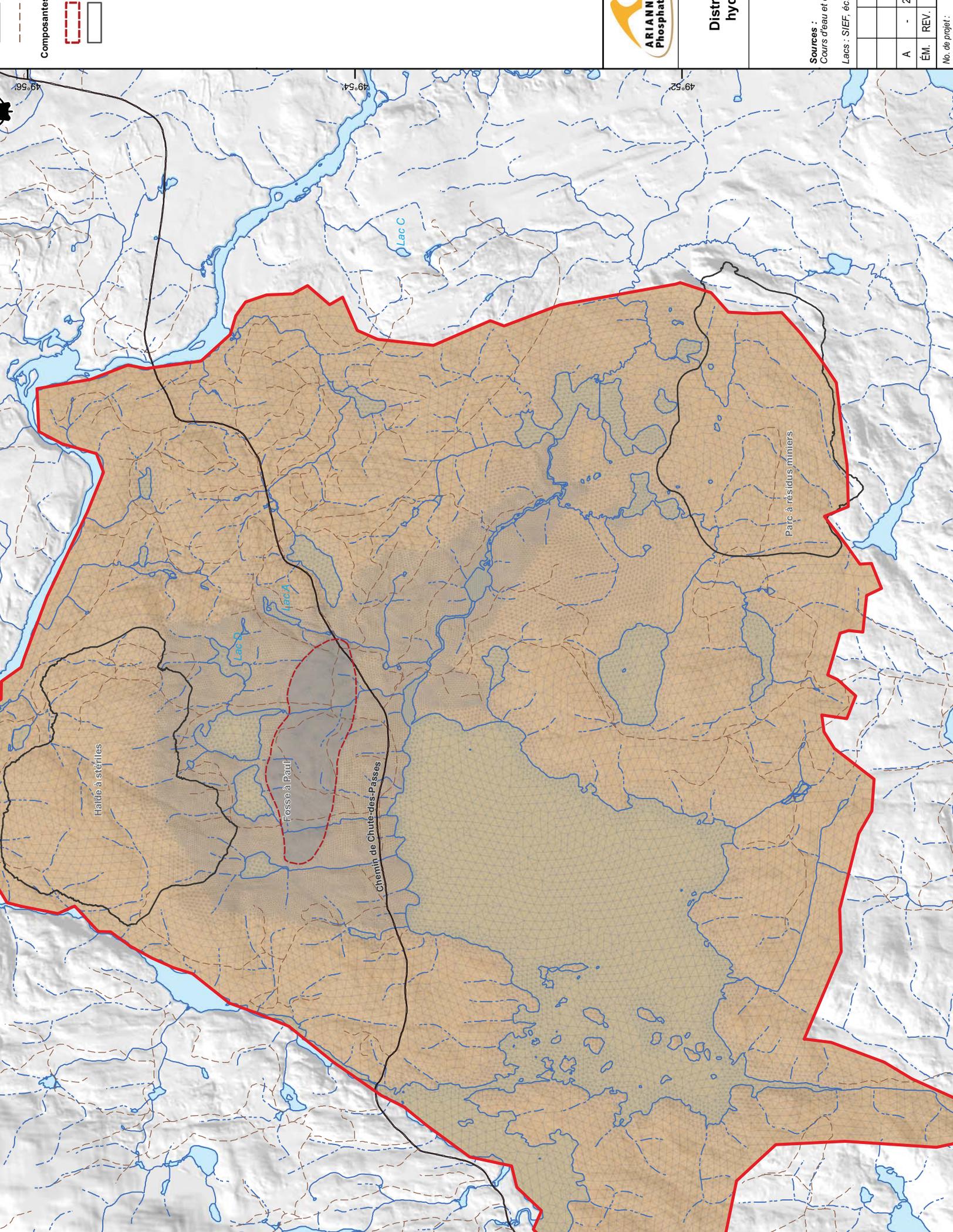
Distr
hyc

Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, M

A	-	2	
ÉM.	REV.		



No. de projet :



Composantes

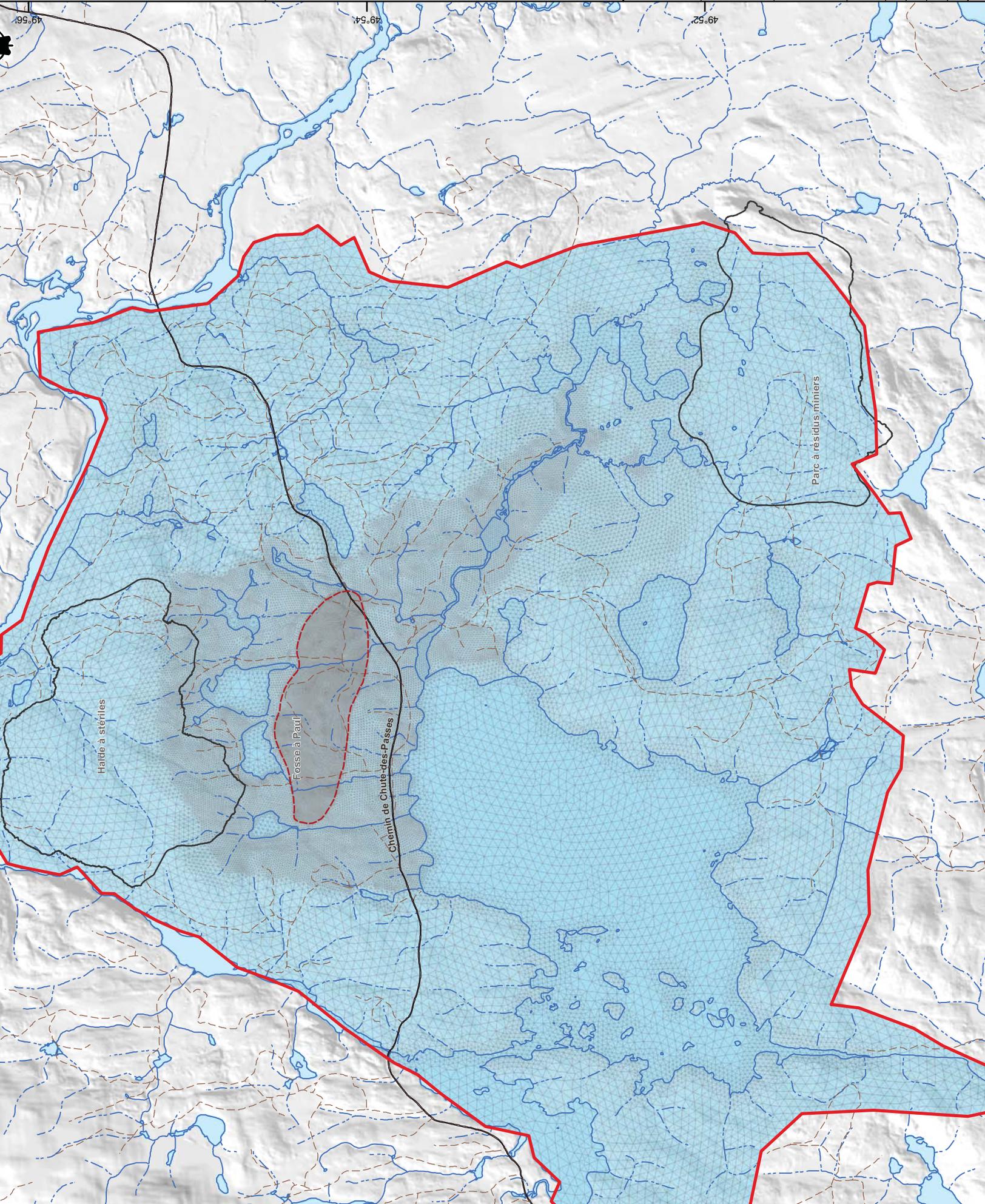
-
-
-

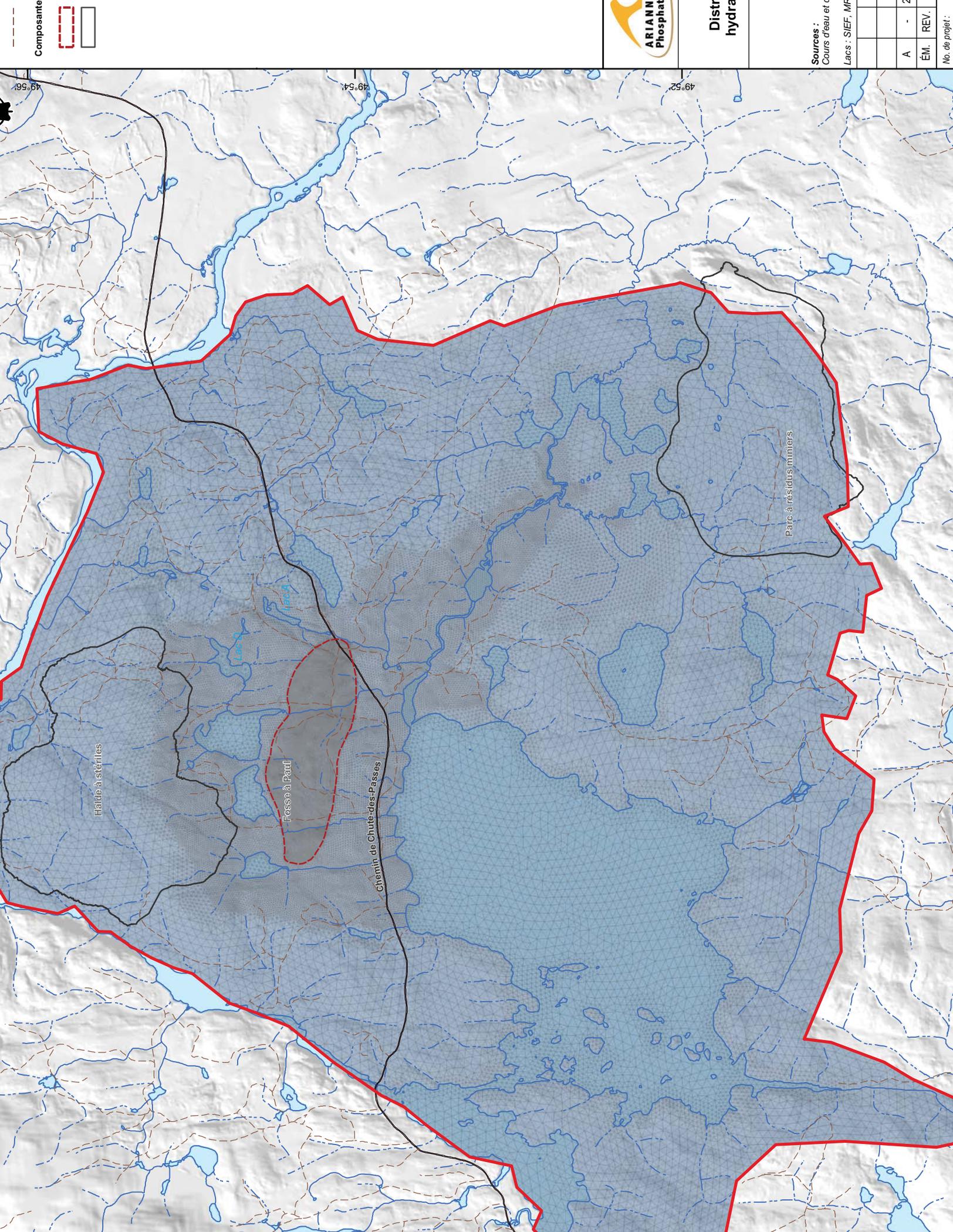


Distr
hyc

Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, etc

A	-	2	
ÉM.	REV.		
No. de projet :			





49°56'

49°54'

49°52'

Composante



Distr
hydra

Sources :
Cours d'eau et

Lacs : SIEF, MF

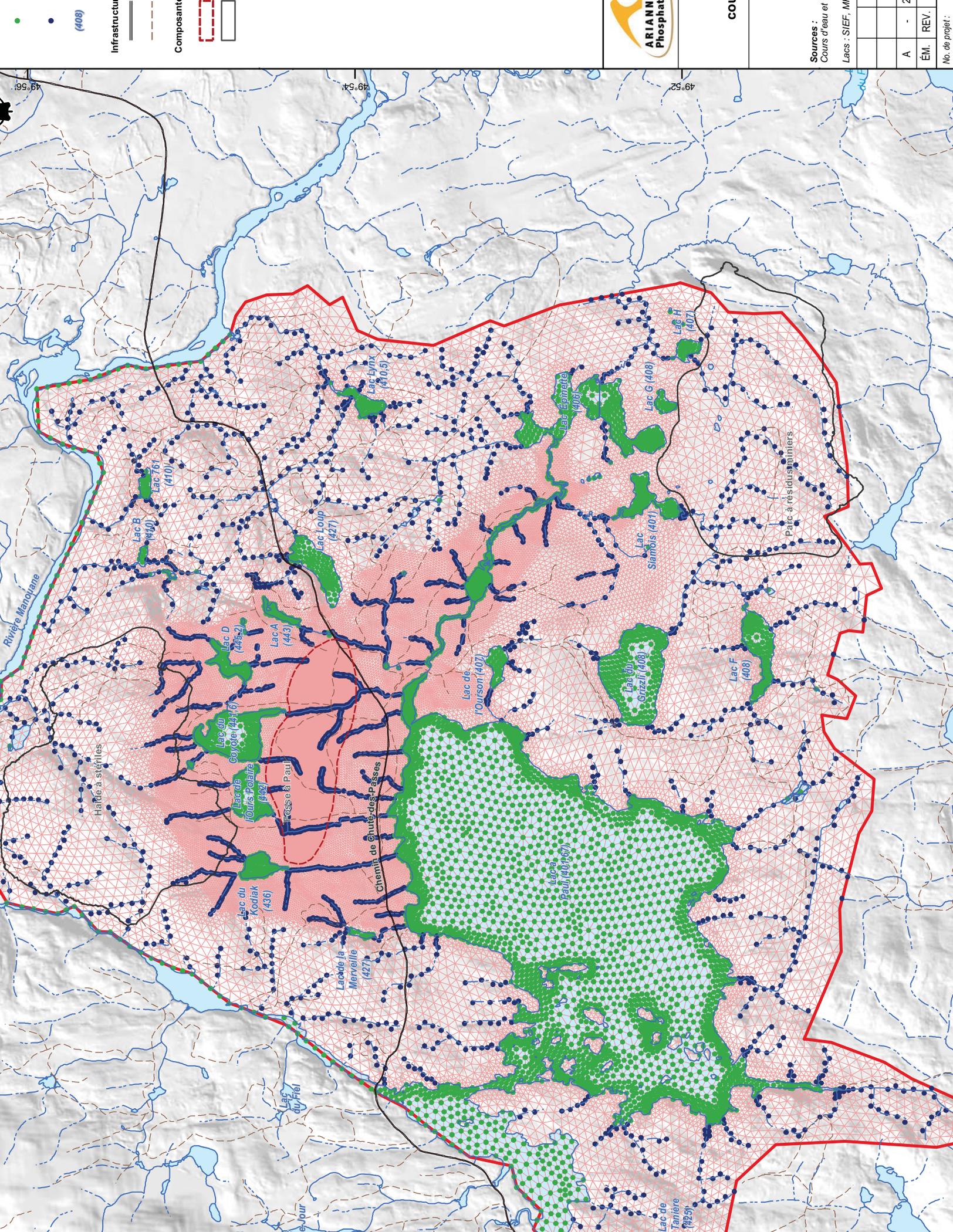
A	-	2	
ÉM.	REV.		
No. de projet :			

Haide à stériles

Fosse à Paul

Chemin de Chute-des-Passes

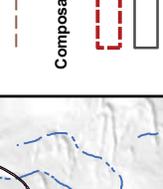
Parc à résidus miniers



(408)

Infrastructure

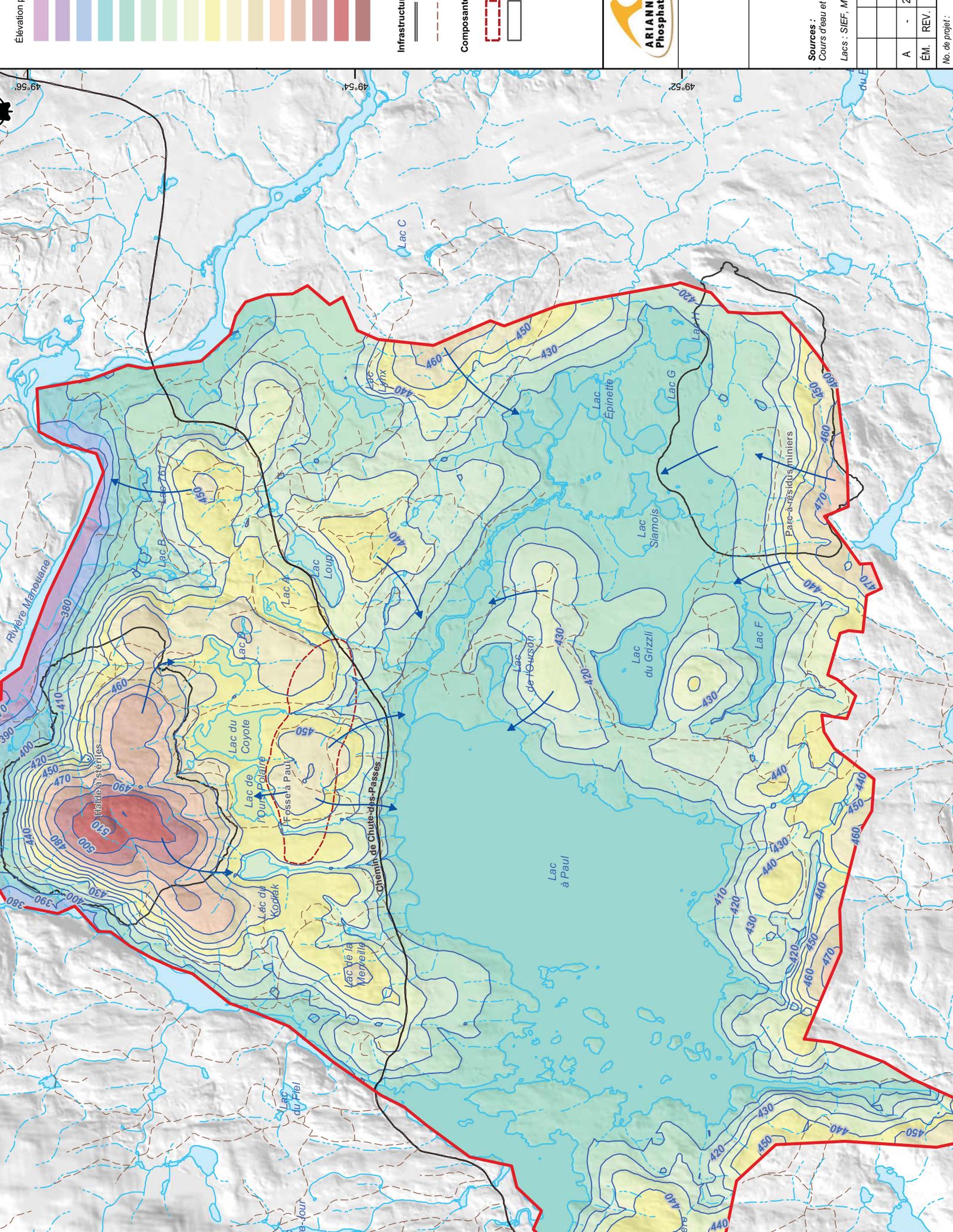
Composant



COI

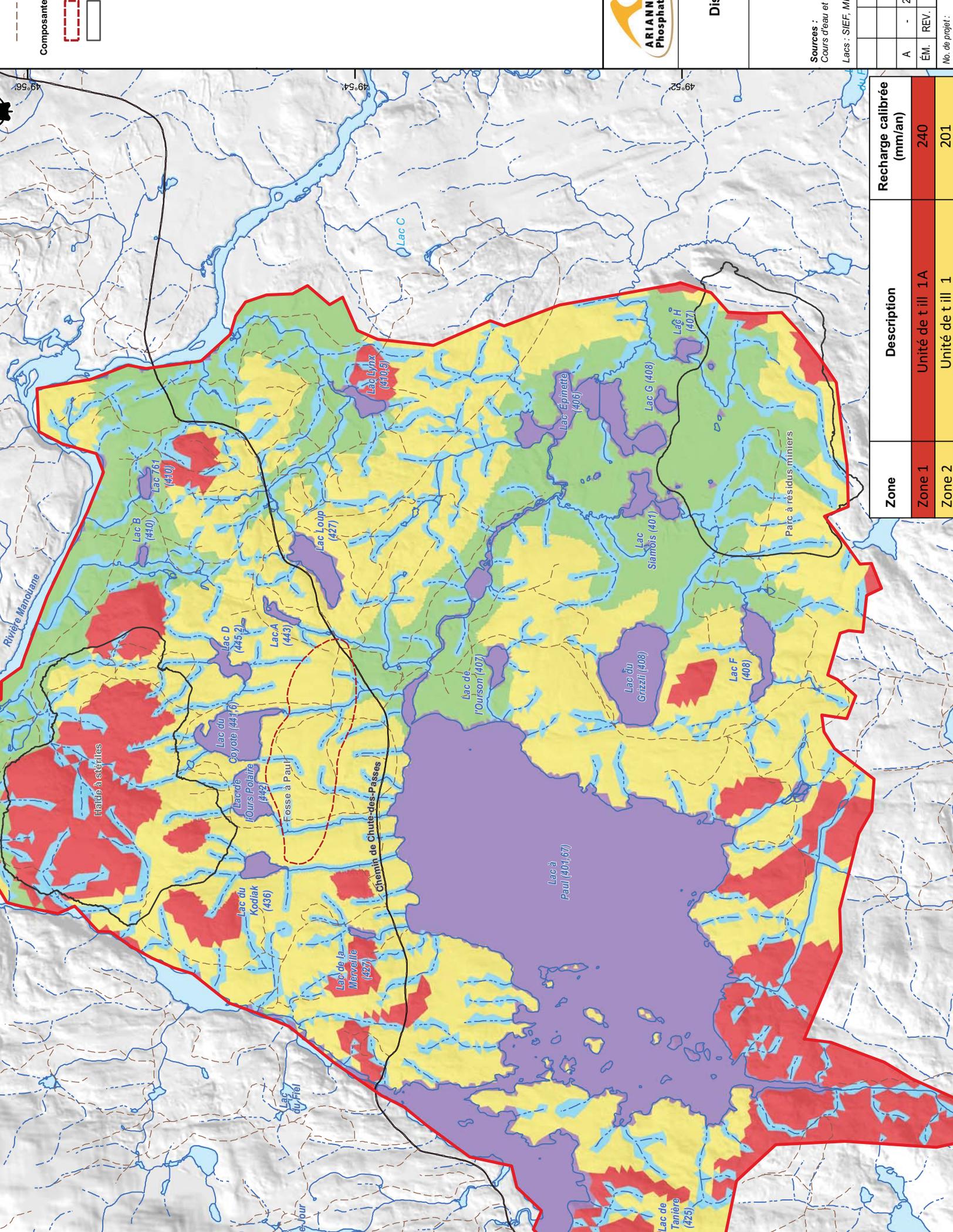
Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, MI

A	-	2	
ÉM.	REV.		
No. de projet :			



Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, M

A	-	2	
ÉM.	REV.		
No. de projet :			



Composante



Dis

Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, M

A	-	2
ÉM.	REV.	
No. de projet :		

Zone	Description	Recharge calibrée (mm/an)
Zone 1	Unité de t ill 1A	240
Zone 2	Unité de t ill 1	201

Haide à sténies

Rivière Manolane

Lac de Paul (401,67)

Chemin de Chute-des-Pesses

Parc à résidus miniers

Lac de Tanère (425)

Lac de la Manville (427)

Lac du Fiel

Lac du Kodlak (436)

Lac de la Fosse à Paul

Lac de l'Ourson (407)

Lac de Coyote (441,6)

Lac de l'Ourson (442)

Lac de Paul (443)

Lac de l'Ourson (445,2)

Lac du Siamois (401)

Lac du Grizzly (408)

Lac de l'Épinière (406)

Lac de l'Épinière (407)

Lac de l'Épinière (408)

Lac de l'Épinière (409)

Lac de l'Épinière (410)

Lac de l'Épinière (410,5)

Lac de l'Épinière (410,9)

Lac de l'Épinière (411)

Lac de l'Épinière (411,5)

Lac de l'Épinière (412)

Lac de l'Épinière (412,5)

Lac de l'Épinière (413)

Lac de l'Épinière (413,5)

Lac de l'Épinière (414)

Lac de l'Épinière (414,5)

Lac de l'Épinière (415)

Lac de l'Épinière (415,5)

Lac de l'Épinière (416)

Lac de l'Épinière (416,5)

Lac de l'Épinière (417)

Lac de l'Épinière (417,5)

Lac de l'Épinière (418)

Lac de l'Épinière (418,5)

Lac de l'Épinière (419)

Lac de l'Épinière (419,5)

Lac de l'Épinière (420)

Lac de l'Épinière (420,5)

Lac de l'Épinière (421)

Lac de l'Épinière (421,5)

Lac de l'Épinière (422)

Lac de l'Épinière (422,5)

Lac de l'Épinière (423)

Lac de l'Épinière (423,5)

Lac de l'Épinière (424)

Lac de l'Épinière (424,5)

Lac de l'Épinière (425)

Lac de l'Épinière (425,5)

Lac de l'Épinière (426)

Lac de l'Épinière (426,5)

Lac de l'Épinière (427)

Lac de l'Épinière (427,5)

Lac de l'Épinière (428)

Lac de l'Épinière (428,5)

Lac de l'Épinière (429)

Lac de l'Épinière (429,5)

Lac de l'Épinière (430)

Lac de l'Épinière (430,5)

Lac de l'Épinière (431)

Lac de l'Épinière (431,5)

Lac de l'Épinière (432)

Lac de l'Épinière (432,5)

Lac de l'Épinière (433)

Lac de l'Épinière (433,5)

Lac de l'Épinière (434)

Lac de l'Épinière (434,5)

Lac de l'Épinière (435)

Lac de l'Épinière (435,5)

Lac de l'Épinière (436)

Lac de l'Épinière (436,5)

Lac de l'Épinière (437)

Lac de l'Épinière (437,5)

Lac de l'Épinière (438)

Lac de l'Épinière (438,5)

Lac de l'Épinière (439)

Lac de l'Épinière (439,5)

Lac de l'Épinière (440)

Lac de l'Épinière (440,5)

Lac de l'Épinière (441)

Lac de l'Épinière (441,5)

Lac de l'Épinière (442)

Lac de l'Épinière (442,5)

Lac de l'Épinière (443)

Lac de l'Épinière (443,5)

Lac de l'Épinière (444)

Lac de l'Épinière (444,5)

Lac de l'Épinière (445)

Lac de l'Épinière (445,5)

Lac de l'Épinière (446)

Lac de l'Épinière (446,5)

Lac de l'Épinière (447)

Lac de l'Épinière (447,5)

Lac de l'Épinière (448)

Lac de l'Épinière (448,5)

Lac de l'Épinière (449)

Lac de l'Épinière (449,5)

Lac de l'Épinière (450)

Lac de l'Épinière (450,5)

Lac de l'Épinière (451)

Lac de l'Épinière (451,5)

Lac de l'Épinière (452)

Lac de l'Épinière (452,5)

Lac de l'Épinière (453)

Lac de l'Épinière (453,5)

Lac de l'Épinière (454)

Lac de l'Épinière (454,5)

Lac de l'Épinière (455)

Lac de l'Épinière (455,5)

Lac de l'Épinière (456)

Lac de l'Épinière (456,5)

Lac de l'Épinière (457)

Lac de l'Épinière (457,5)

Lac de l'Épinière (458)

Lac de l'Épinière (458,5)

Lac de l'Épinière (459)

Lac de l'Épinière (459,5)

Lac de l'Épinière (460)

Lac de l'Épinière (460,5)

Lac de l'Épinière (461)

Lac de l'Épinière (461,5)

Lac de l'Épinière (462)

Lac de l'Épinière (462,5)

Lac de l'Épinière (463)

Lac de l'Épinière (463,5)

Lac de l'Épinière (464)

Lac de l'Épinière (464,5)

Lac de l'Épinière (465)

Lac de l'Épinière (465,5)

Lac de l'Épinière (466)

Lac de l'Épinière (466,5)

Lac de l'Épinière (467)

Lac de l'Épinière (467,5)

Lac de l'Épinière (468)

Lac de l'Épinière (468,5)

Lac de l'Épinière (469)

Lac de l'Épinière (469,5)

Lac de l'Épinière (470)

Lac de l'Épinière (470,5)

Lac de l'Épinière (471)

Lac de l'Épinière (471,5)

Lac de l'Épinière (472)

Lac de l'Épinière (472,5)

Lac de l'Épinière (473)

Lac de l'Épinière (473,5)

Lac de l'Épinière (474)

Lac de l'Épinière (474,5)

Lac de l'Épinière (475)

Lac de l'Épinière (475,5)

Lac de l'Épinière (476)

Lac de l'Épinière (476,5)

Lac de l'Épinière (477)

Lac de l'Épinière (477,5)

Lac de l'Épinière (478)

Lac de l'Épinière (478,5)

Lac de l'Épinière (479)

Lac de l'Épinière (479,5)

Lac de l'Épinière (480)

Lac de l'Épinière (480,5)

Lac de l'Épinière (481)

Lac de l'Épinière (481,5)

Lac de l'Épinière (482)

Lac de l'Épinière (482,5)

Lac de l'Épinière (483)

Lac de l'Épinière (483,5)

Lac de l'Épinière (484)

Lac de l'Épinière (484,5)

Lac de l'Épinière (485)

Lac de l'Épinière (485,5)

Lac de l'Épinière (486)

Lac de l'Épinière (486,5)

Lac de l'Épinière (487)

Lac de l'Épinière (487,5)

Lac de l'Épinière (488)

Lac de l'Épinière (488,5)

Lac de l'Épinière (489)

Lac de l'Épinière (489,5)

Lac de l'Épinière (490)

Lac de l'Épinière (490,5)

Lac de l'Épinière (491)

Lac de l'Épinière (491,5)

Lac de l'Épinière (492)

Lac de l'Épinière (492,5)

Lac de l'Épinière (493)

Lac de l'Épinière (493,5)

Lac de l'Épinière (494)

Lac de l'Épinière (494,5)

Lac de l'Épinière (495)

Lac de l'Épinière (495,5)

Lac de l'Épinière (496)

Lac de l'Épinière (496,5)

Lac de l'Épinière (497)

Lac de l'Épinière (497,5)

Lac de l'Épinière (498)

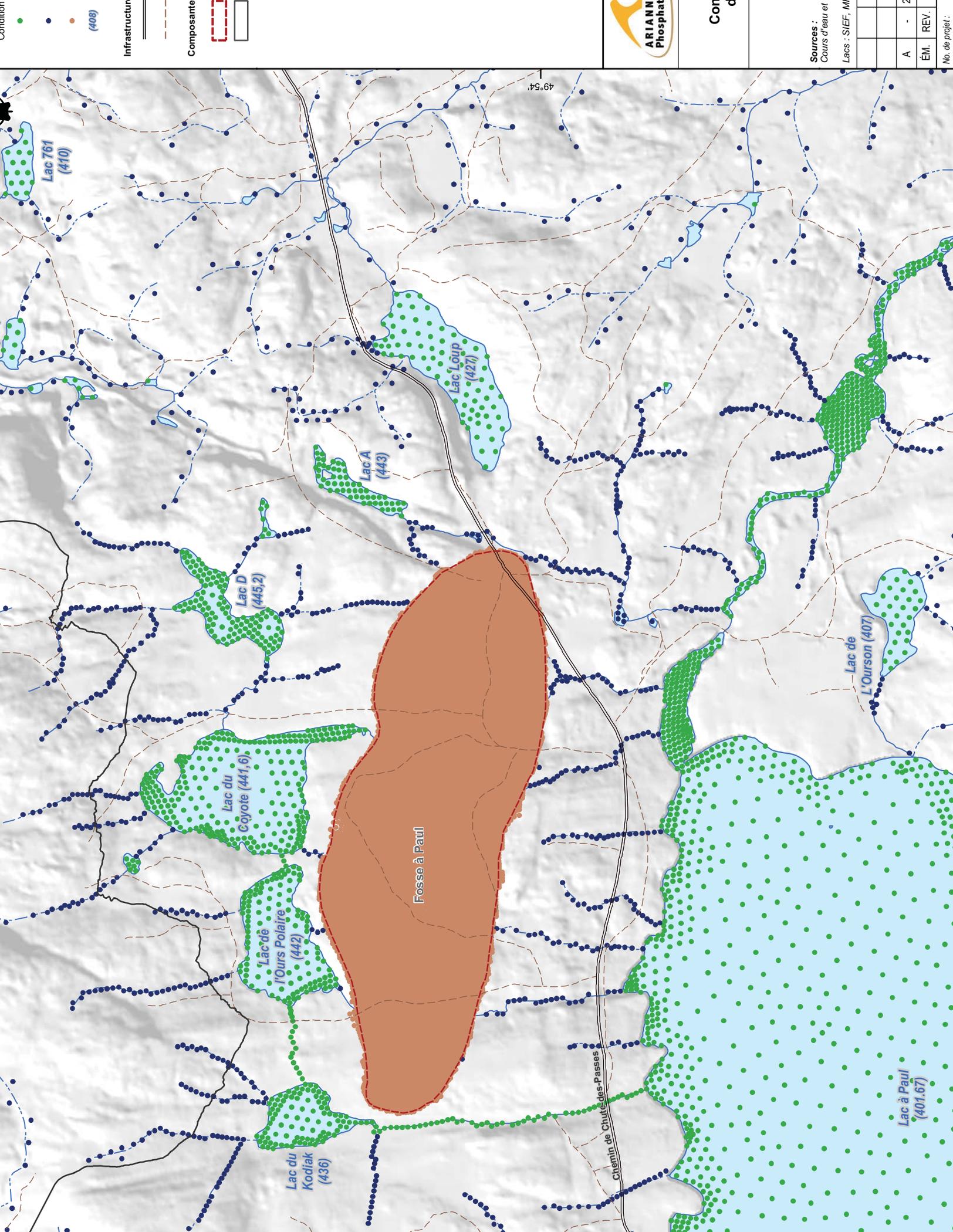
Lac de l'Épinière (498,5)

Lac de l'Épinière (499)

Lac de l'Épinière (499,5)

Lac de l'Épinière (500)

Lac de l'Épinière (500,5)



Coordonnées

-
-
-

(408)

Infrastructures

-
-

Composante

-
-

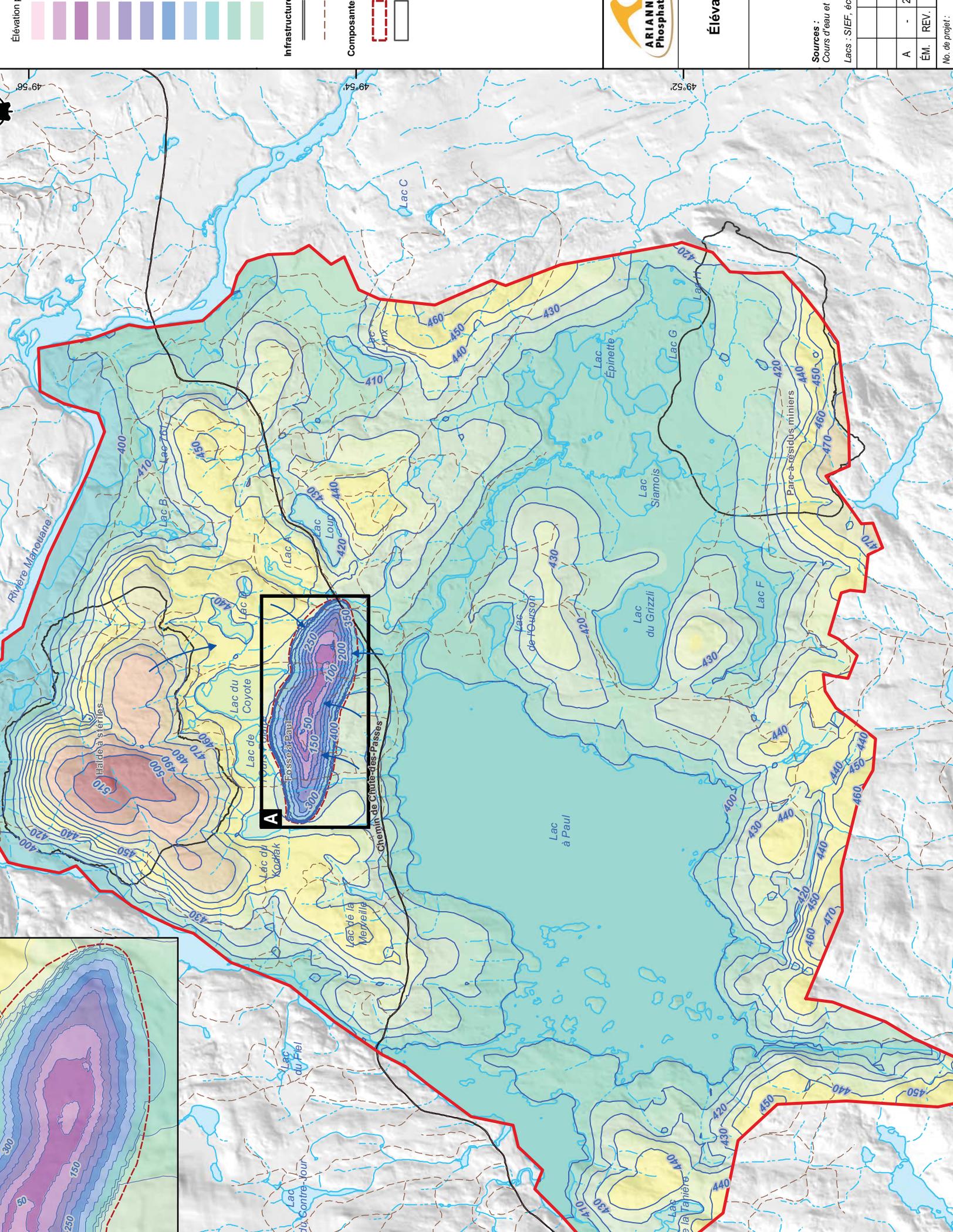


Contour

Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, M...

A	-	2	
ÉM.	REV.		

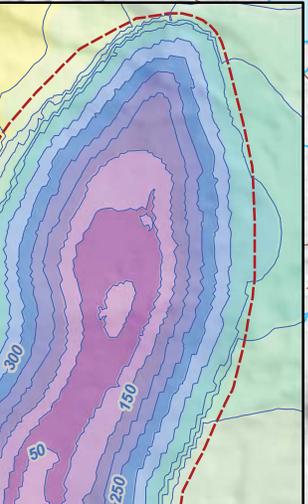
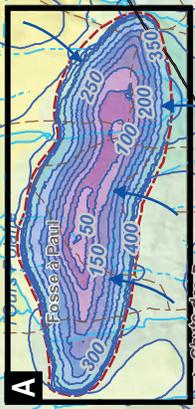
No. de projet :

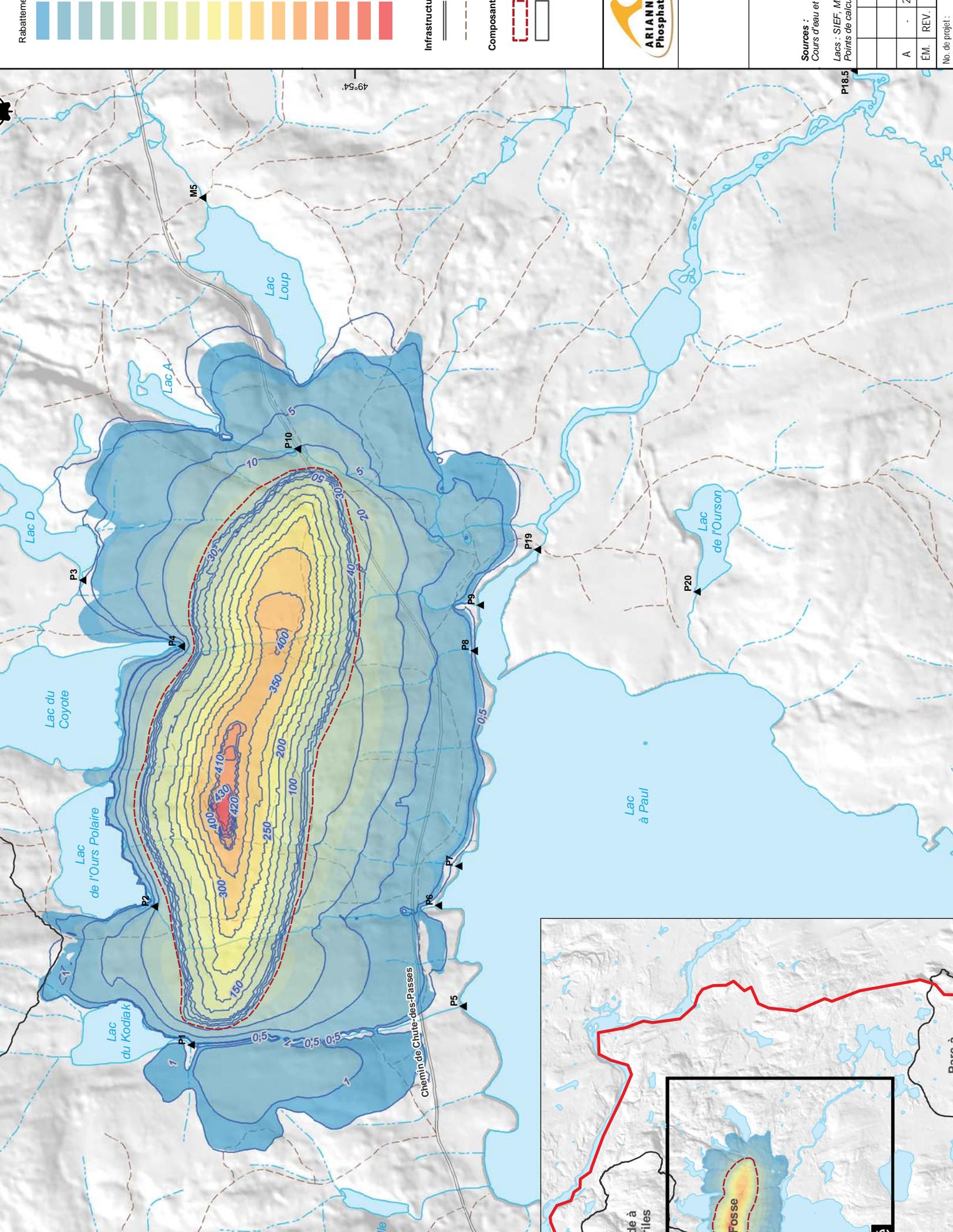


Éléva

Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, 60

A	-	2	
ÉM.	REV.		
No. de projet :			

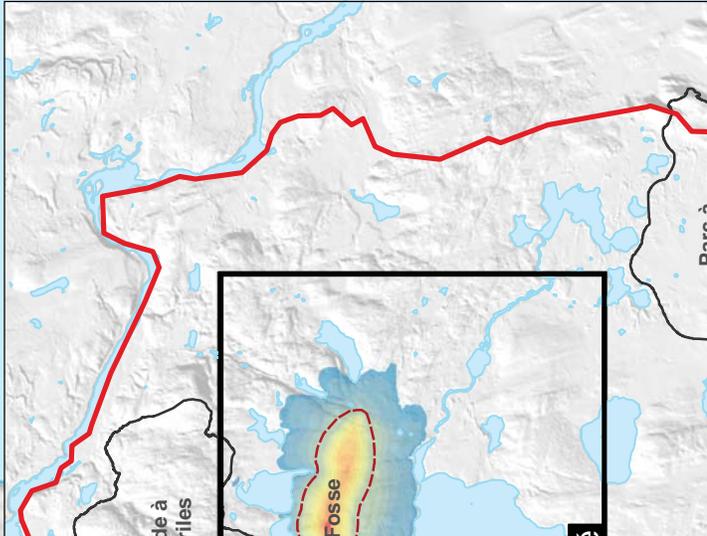




Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, M
Points de calcul

A	-	2	
EM.	REV.		

No. de projet :



49°54'

P18.5

Chemin de Chute-des-Passes

Lac à Paul

Lac de l'Ourson

Lac Loup

Lac A

Lac D

Lac du Coyote

Lac de l'Ours Polaire

Lac du Kodiak

de à rilles

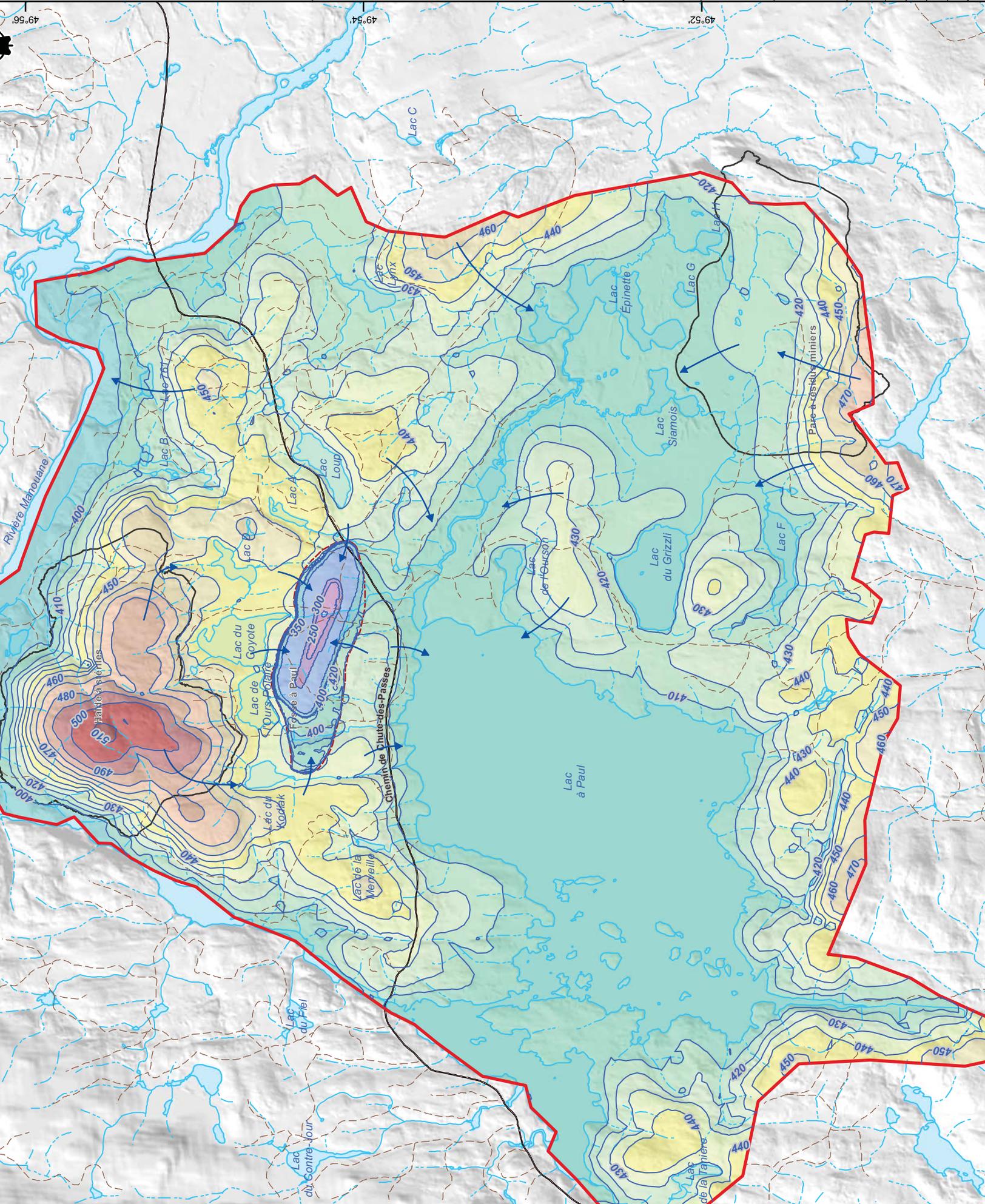
Fosse



Éléva

Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, M

A	-	2	
ÉM.	REV.		
No. de projet :			



49°56'

49°54'

49°52'

Rabattier

Infrastructure

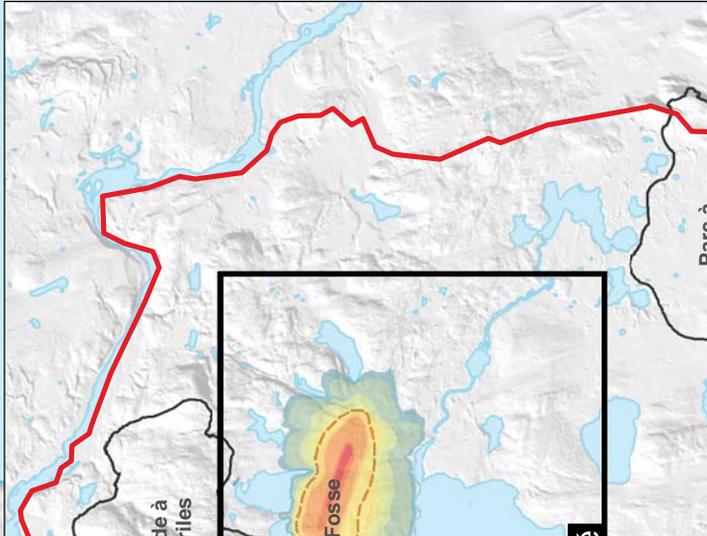
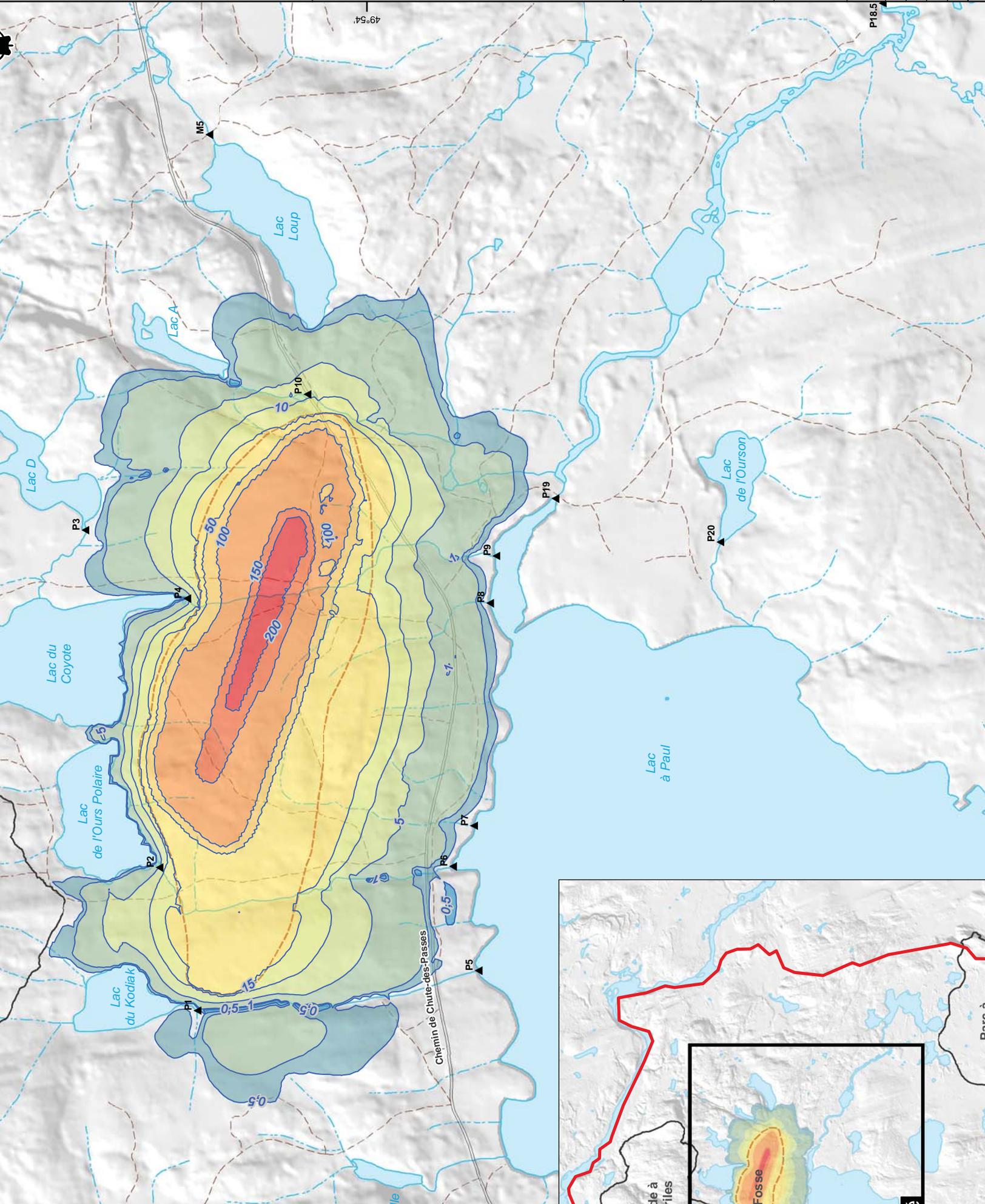
Composant

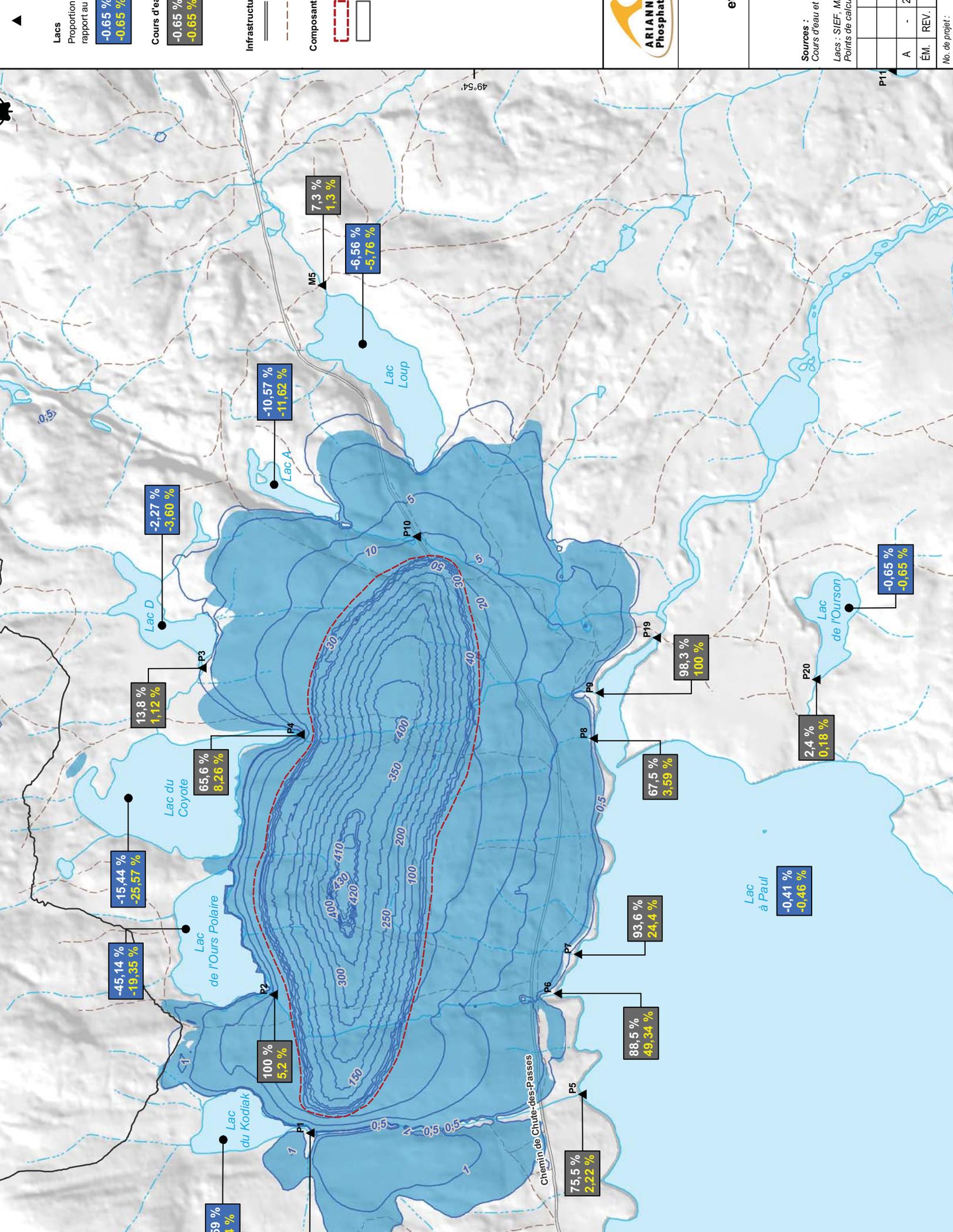


A	-	2
EM.	REV.	

Sources : Cours d'eau et
Lacs : SIEF, écos
Points de calcul

No. de projet :





Lacs
Proportion rapport au
-0.65 %
-0.65 %

Cours d'eau
-0.65 %
-0.65 %

Infrastructure
— — — — —

Composant
[Red dashed box] [Black box]



Sources :
Cours d'eau et
Lacs : SIEF, M
Points de calcul

	A	-	2
	ÉM.	REV.	
No. de projet :			

P3
-2,27 %
-3,60 %

P4
13,8 %
1,12 %

P2
-45,14 %
-19,35 %

P1
100 %
5,2 %

P1
99 %
1 %

Lac A
-10,57 %
-11,62 %

M5
7,3 %
1,3 %

-6,56 %
-5,76 %

P10
10
50
30
5
20
40

P8
67,5 %
3,59 %

P7
93,6 %
24,4 %

P6
88,5 %
49,34 %

P5
75,5 %
2,22 %

P9
98,3 %
100 %

P8
67,5 %
3,59 %

P7
93,6 %
24,4 %

P6
88,5 %
49,34 %

P5
75,5 %
2,22 %

P19
2,4 %
0,18 %

P20
2,4 %
0,18 %

Lac à Paul
-0,41 %
-0,46 %

Lac de l'Ourson
-0,65 %
-0,65 %

P11

Chemin de Chute-des-Passes

FIGURES

Figure 3 Modèle conceptuel en 3 dimensions.

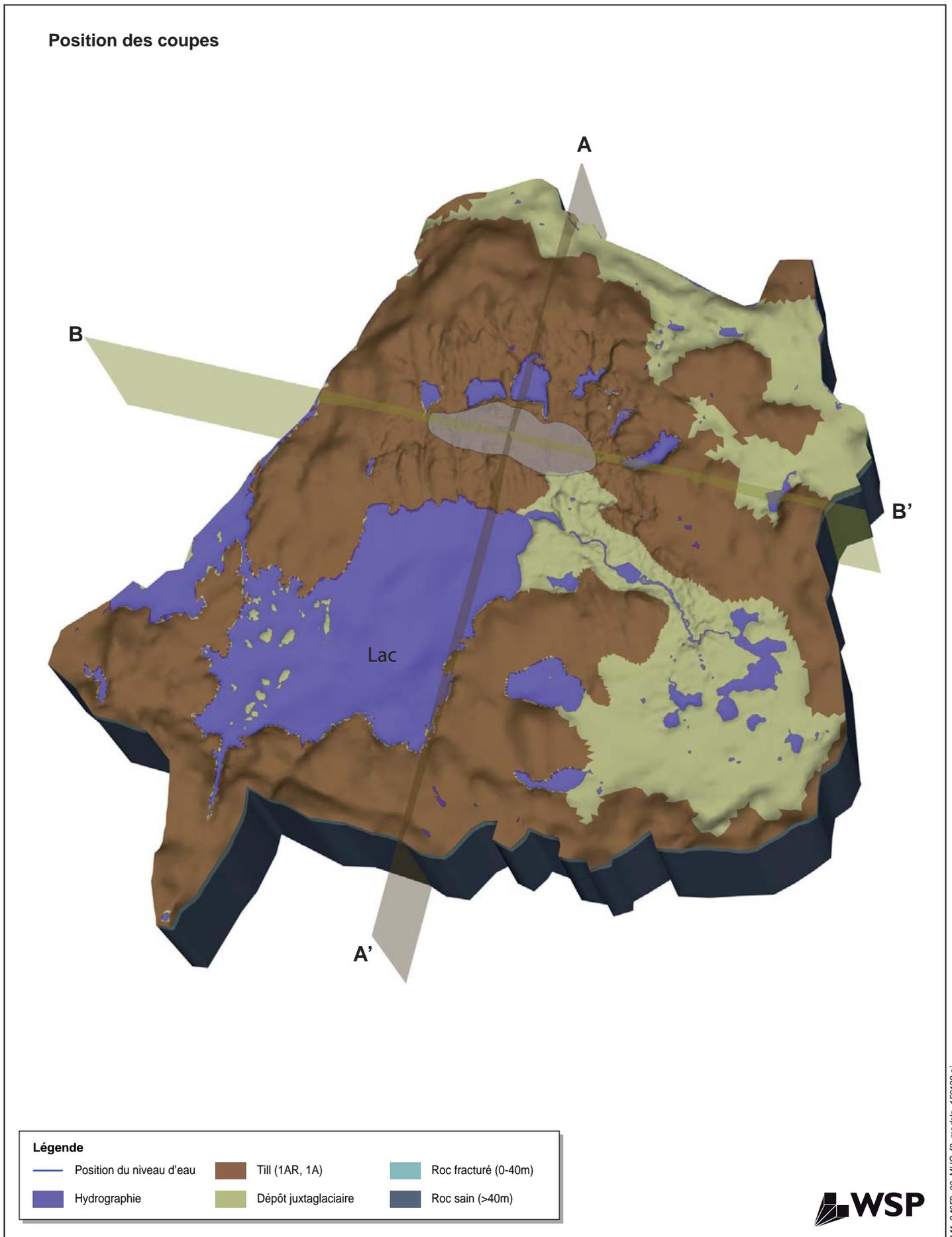
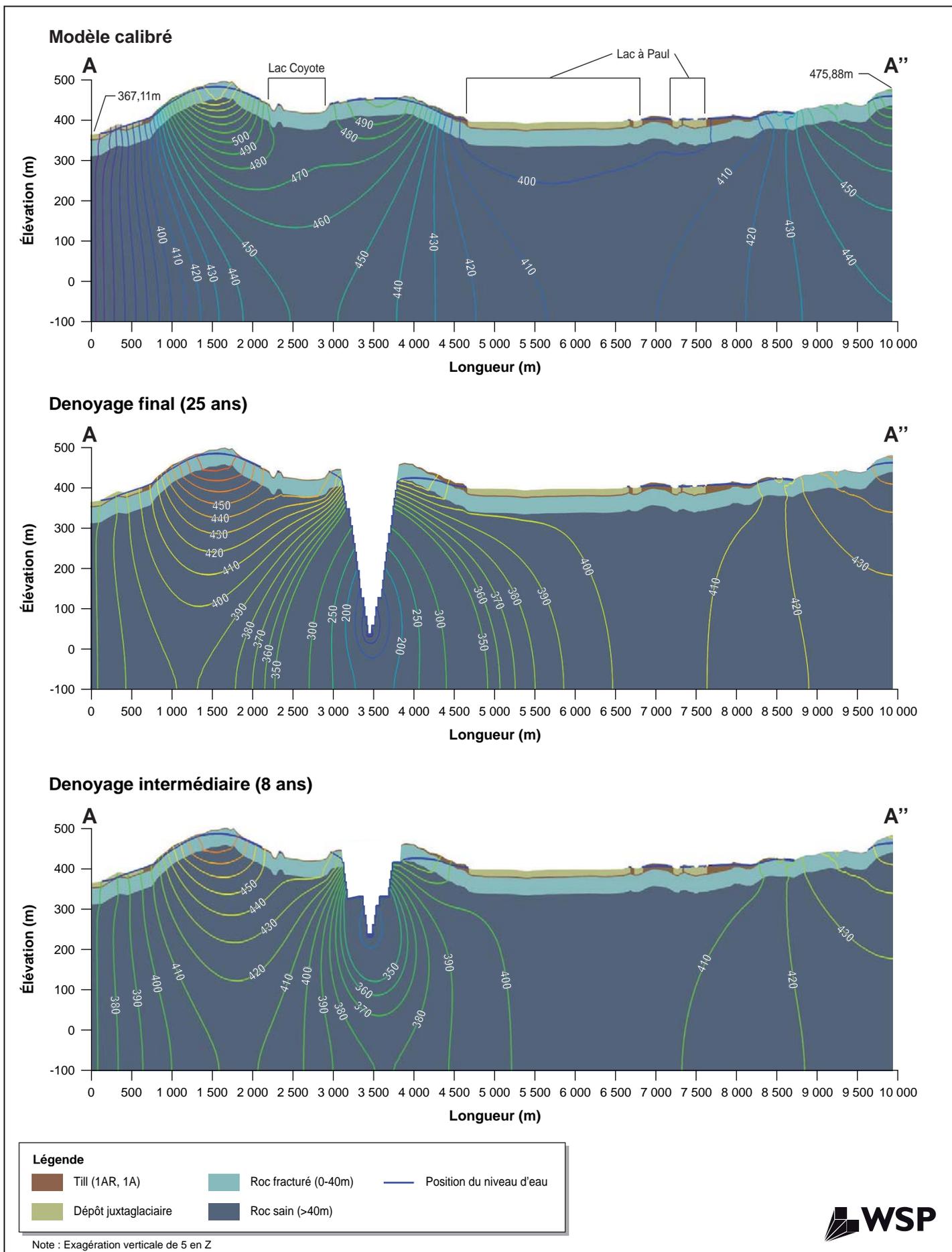


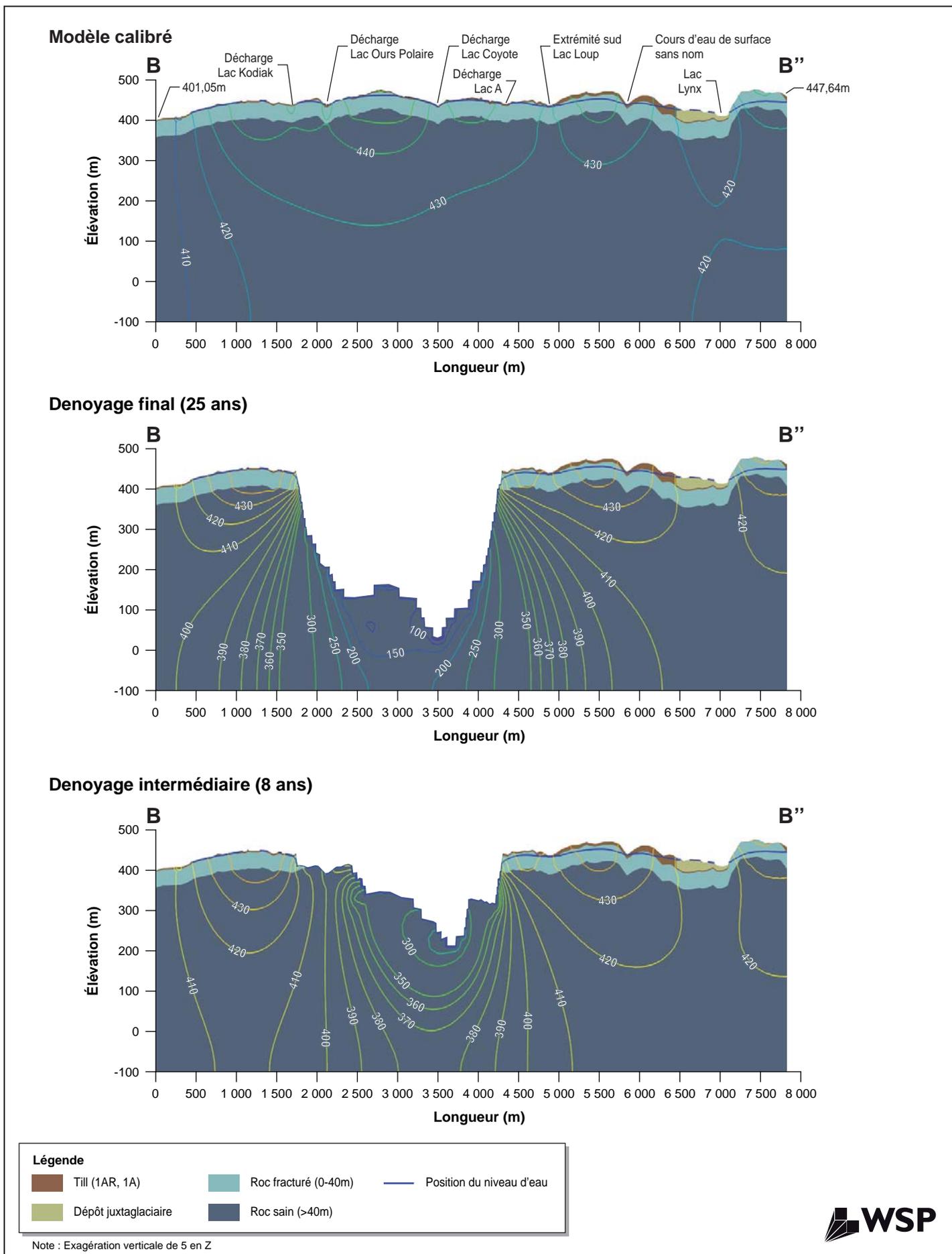
Figure 4 Distribution des charges hydrauliques, coupe A-A''



141_24652_00_MHG_f4_charges_hydraA_150128.ai



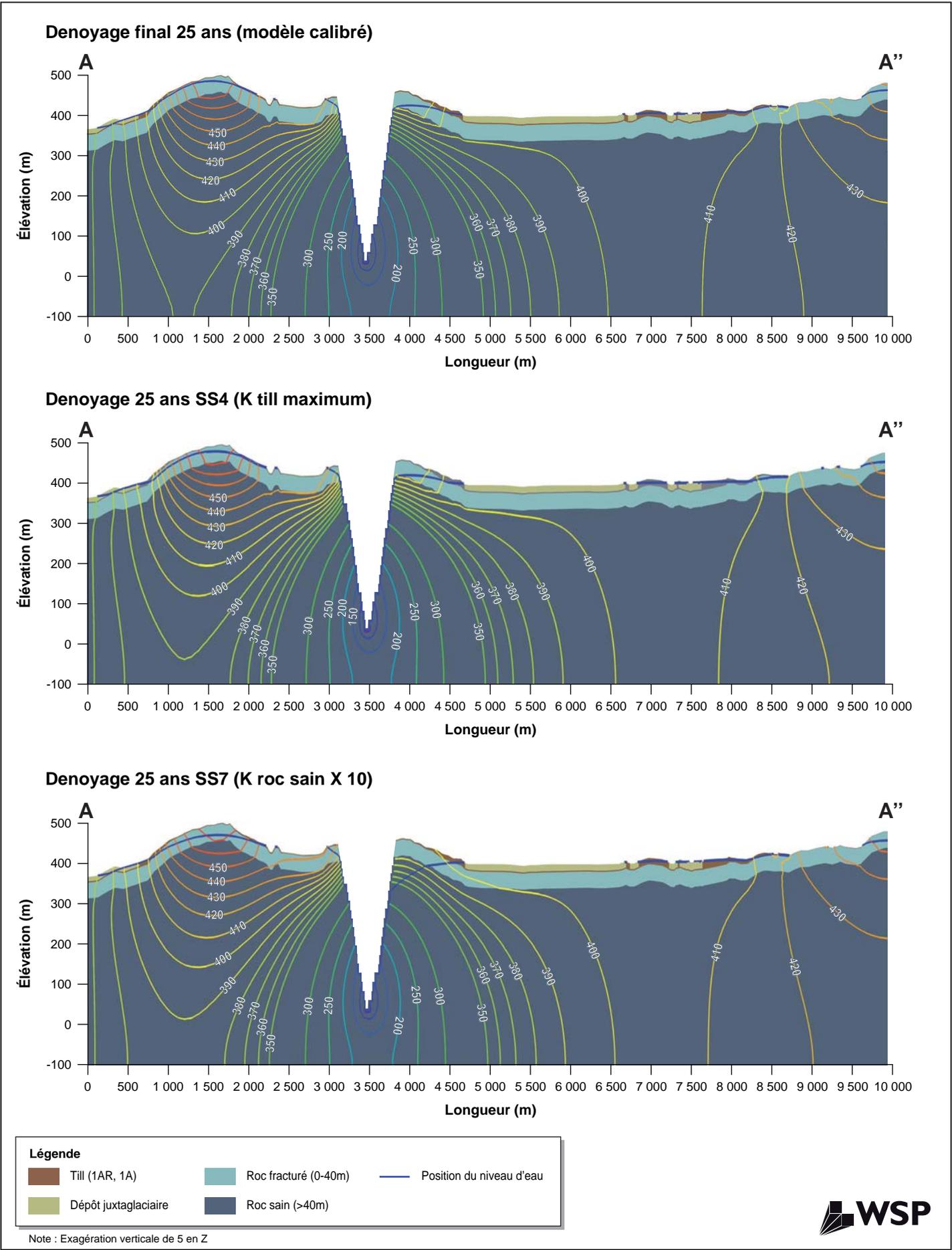
Figure 5 Distribution des charges hydrauliques, coupe B-B''



141_24652_00_M1FG_fs_charges_hydrBB_150128.ai



Figure 6 Étude de sensibilité (conductivité hydraulique)



141_24652_00_MHG_fb_sensib_160128.ai



Figure 7 Étude de sensibilité (recharge, épaisseur roc fracturé)

