GALAXY LITHIUM (CANADA) INC.
PROJET N^{O} : 201-11679-00

MINE DE LITHIUM BAIE-JAMES

MISE À JOUR DE L'ÉTUDE SPÉCIALISÉE SUR L'HYDROGÉOLOGIE

JUILLET 2021

MINE DE LITHIUM BAIE-JAMES

MISE À JOUR DE L'ÉTUDE SPÉCIALISÉE SUR L'HYDROGÉOLOGIE

GALAXY LITHIUM (CANADA) INC.

PROJET N^{O} : 201-11679-00
DATE : JUILLET 2021

WSP CANADA INC.
1135, BOULEVARD LEBOURGNEUF
QUÉBEC (QUÉBEC) G2K 0M5
CANADA

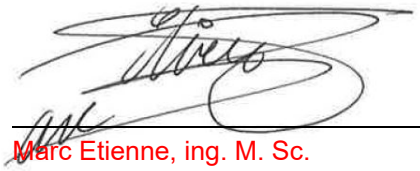
TÉLÉPHONE : +1 418 623-2254
TÉLÉCOPIEUR : +1 418 624-1857
WSP.COM

SIGNATURES

PRÉPARÉ PAR

Samuel Bottier, M. Sc. — 22-07-2021 — Date

RÉVISÉ PAR



Marc Etienne, ing. M. Sc.
(OIQ nº 127061) — 22-07-2021 — Date

APPROUVÉ PAR

Dominique Thiffault, B. Sc.
Directrice du projet — 22-07-2021 — Date

Le présent rapport a été préparé par WSP Canada inc. pour le compte de Galaxy Lithium (Canada) inc. conformément à l'entente de services professionnels. La divulgation de tout renseignement faisant partie du présent rapport incombe uniquement au destinataire prévu. Son contenu reflète le meilleur jugement de WSP Canada inc. à la lumière des informations disponibles au moment de la préparation du rapport. Toute utilisation que pourrait en faire une tierce partie ou toute référence ou toutes décisions en découlant sont l'entière responsabilité de ladite tierce partie. WSP Canada inc. n'accepte aucune responsabilité quant aux dommages, s'il en était, que pourrait subir une tierce partie à la suite d'une décision ou d'un geste basé sur le présent rapport. Cet énoncé de limitation fait partie du présent rapport.

L'original du document technologique que nous vous transmettons a été authentifié et sera conservé par WSP pour une période minimale de dix ans. Étant donné que le fichier transmis n'est plus sous le contrôle de WSP et que son intégrité n'est pas assurée, aucune garantie n'est donnée sur les modifications ultérieures qui peuvent y être apportées.

ÉQUIPE DE RÉALISATION

GALAXY LITHIUM (CANADA) INC.

Directeur général Canada	Denis Couture, ing.
Directrice SSE	Gail Amyot, ing. M. Sc.
Directeur de projet civil / géotechnique	Patrick Gince, ing.

WSP CANADA INC. (WSP)

Directrice du projet	Dominique Thiffault, B. Sc..
Rédaction	Samuel Bottier, M. Sc.
Révision	Marc Etienne, ing. M. Sc.
Cartographie	Alain Lemay, D.E.C.
Édition	Linette Poulin Cathia Gamache

Référence à citer :

WSP. 2021. *MINE DE LITHIUM BAIE-JAMES. MISE À JOUR DE L'ÉTUDE SPÉCIALISÉE SUR L'HYDROGÉOLOGIE.* RAPPORT PRODUIT POUR GALAXY LITHIUM (CANADA) INC. 98 PAGES ET ANNEXES.

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION 1

1.1 MISE EN CONTEXTE 1

1.2 OBJECTIFS 2

2 MÉTHODOLOGIE – MODÉLISATION NUMÉRIQUE 5

2.1 ÉTAPES REQUISES 5

2.2 CHOIX DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT 6

2.3 APPROCHE AVEC UN MILIEU POREUX ÉQUIVALENT 6

3 DESCRIPTION DU SITE / MODÈLE CONCEPTUEL 7

3.1 TOPOGRAPHIE 7

3.2 HYDROLOGIE ET BILAN HYDRIQUE 7

3.3 UNITÉS HYDROSTRATIGRAPHIQUES 13

3.4 DESIGN DES INFRASTRUCTURES SIMULÉES 21

3.5 PIÉZOMÉTRIE 23

3.6 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES MATÉRIAUX 30

4 CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT 35

4.1 ÉTENDUE DU DOMAINE ET CONSTRUCTION DU MAILLAGE 35

4.2 CONDITIONS LIMITES 35

5 CALIBRATION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT 41

5.1 OBJECTIFS DE CALIBRATION 41

5.2 MÉTHODOLOGIE DE CALIBRATION 41

5.3 RÉSULTATS DE LA CALIBRATION 42

5.4 CONDITIONS FINALES DU MODÈLE CALIBRÉ 47

5.5 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES 53

TABLE DES MATIÈRES (suite)

6 SIMULATIONS PRÉDICTIVES 57

6.1 MODIFICATION DU MODÈLE POUR LES OPÉRATIONS (ANNÉES 0-20) 57

6.2 MODIFICATION DE LA PIÉZOMÉTRIE RÉGIONALE 63

6.3 DÉBIT DE DÉNOYAGE 69

6.4 IMPACTS SUR LES EAUX DE SURFACE 70

6.5 RÉSULTATS DES DÉBITS DE PERCOLATION DU MODÈLE CALIBRÉ 71

7 MODÉLISATION DU TRANSPORT 73

7.1 MODIFICATIONS APPORTÉES AU MODÈLE D'ÉCOULEMENT 73

7.2 MODIFICATIONS APPORTÉES POUR L'AJOUT DU TRANSPORT 73

7.3 RÉSULTATS SIMULATIONS DE TRANSPORT 74

8 CONCLUSION 93

8.1 MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE 93

8.2 IMPACTS ANTICIPÉS DES INFRASTRUCTURES 94

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 97

TABLE DES MATIÈRES (suite)

TABLEAUX

TABLEAU 1 LISTE DES STATIONS ET DÉBITS ESTIMÉS.....8
TABLEAU 2 ÉLÉVATION DU NIVEAU D'EAU DES LACS.....8
TABLEAU 3 ÉVALUATION DES PRÉCIPITATIONS EFFICACES (MM/AN).....13
TABLEAU 4 RELEVÉS PIÉZOMÉTRIQUES EFFECTUÉS SUR LE SITE D'ÉTUDE.....27
TABLEAU 5 ÉVALUATION DES GRADIENTS VERTICAUX.....30
TABLEAU 6 COMPILATION DES DONNÉES DE CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES (M/S).....31
TABLEAU 7 SOMMAIRES DES RÉSULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE.....31
TABLEAU 8 RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ.....32
TABLEAU 9 COMPILATION DES DONNÉES DE POROSITÉS DES DIFFÉRENTES UNITÉS.....33
TABLEAU 10 VALEUR TYPIQUE D'EMMAGASINEMENT SPÉCIFIQUE.....34
TABLEAU 11 CALIBRATION DES CHARGES HYDRAULIQUES.....42
TABLEAU 12 STATISTIQUES DE CALIBRATION (CHARGES HYDRAULIQUES).....43
TABLEAU 13 COMPARAISON DES DÉBITS DE BASE ESTIMÉS ET SIMULÉS.....47
TABLEAU 14 BILAN HYDRIQUE DU MODÈLE CALIBRÉ.....47
TABLEAU 15 CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES, POROSITÉ TOTALE ET EMMAGASINEMENT SPÉCIFIQUE CALIBRÉS ET MESURÉS DES DIFFÉRENTES UNITÉS HYDROSTRATIGRAPHIQUES.....48
TABLEAU 16 DIFFÉRENCES ENTRE LES CHARGES HYDRAULIQUES OBSERVÉES ET SIMULÉES POUR LES SCÉNARIOS TESTÉS.....53
TABLEAU 17 COMPARAISON DES DÉBITS ESTIMÉS AUX DÉBITS SIMULÉS POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS TESTÉS.....54
TABLEAU 18 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES MATÉRIAUX COMPOSANT LES INFRASTRUCTURES.....57
TABLEAU 19 DÉBIT DE DÉNOYAGE ANTICIPÉ POUR LE MODÈLE CALIBRÉ.....69
TABLEAU 20 VARIATION DES DÉBITS DE DÉNOYAGE SELON LE SCÉNARIO.....70

TABLEAUX (SUITE)

TABLEAU 21 VALEURS DES DÉBITS DE BASE SIMULÉS À PARTIR DU MODÈLE CALIBRÉ....71
TABLEAU 22 DÉBIT DE PERCOLATION DU MODÈLE CALIBRÉ POUR LE SECTEUR DES HALDES DE CODÉPOSITION ET DU BASSIN....71
TABLEAU 23 DÉBIT DE PERCOLATION DU MODÈLE CALIBRÉ POUR LE SECTEUR DES HALDES À STÉRILES ET RÉSIDUS MINIERS....72
TABLEAU 24 CONCENTRATIONS IMPOSÉES....74
TABLEAU 25 POROSITÉ EFFICACE TYPIQUE....74
TABLEAU 26 CRITÈRE D'EAU DE SURFACE ET D'EAU SOUTERRAINE POUR L'ARSENIC....81
TABLEAU 27 CRITÈRE D'EAU DE SURFACE ET D'EAU SOUTERRAINE POUR LE CUIVRE....89
TABLEAU 28 CONCENTRATIONS PROJETÉES EN MÉTAUX AU COURS D'EAU CE2 PROVENANT DES INFRASTRUCTURES....92

TABLE DES MATIÈRES (suite)

FIGURES

FIGURE 1 CALIBRATION DES CHARGES HYDRAULIQUES 44

FIGURE 2 DISTRIBUTION DES CHARGES HYDRAULIQUES, COUPE 1.....59

FIGURE 3 DISTRIBUTION DES CHARGES HYDRAULIQUES, COUPE 2.....61

FIGURE 4 VUE EN COUPE DE L'ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN ARSENIC DANS LE SECTEUR DE LA HALDE NORD-EST. 79

FIGURE 5 VUE EN COUPE DE L'ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN CUIVRE DANS LE SECTEUR DE LA HALDE NORD-EST. 87

FIGURE 6 CONCENTRATION EN ARSENIC PROJETÉE (MG/L) DANS LE COURS D'EAU CE2 90

FIGURE 7 CONCENTRATION EN CUIVRE PROJETÉE (MG/L) DANS LE COURS D'EAU CE2 90

TABLE DES MATIÈRES (suite)

CARTES

CARTE 1	LOCALISATION RÉGIONALE DU SITE MINIER	3
CARTE 2	LOCALISATION DES SONDAGES	9
CARTE 3	LOCALISATION DES LACS, DES STATIONS ET DES BASSINS VERSANTS	11
CARTE 4	CARTE DES DÉPÔTS DE SURFACE	15
CARTE 5	CARTE GÉOLOGIQUE	17
CARTE 6	CARTE DE L'ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS ARGILEUX	19
CARTE 7	CARTE PIÉZOMÉTRIE AU ROC	25
CARTE 8	CONDITIONS LIMITE SUPÉRIEURES	37
CARTE 9	CONDITIONS LIMITES INFÉRIEURES	39
CARTE 10	PIÉZOMÉTRIE MODÈLE CALIBRÉ	45
CARTE 11	ZONE DE CONDUCTIVITÉ DU MODÈLE CALIBRÉ	49
CARTE 12	RECHARGE DU MODÈLE CALIBRÉ	51
CARTE 13	CARTE PIÉZOMÉTRIQUE À LA FIN DES OPÉRATIONS	65
CARTE 14	RABATTEMENT	67
CARTE 15	VUE EN PLAN DES CONCENTRATIONS EN ARSENIC DANS LES DÉPÔTS DE SURFACE	75
CARTE 16	VUE EN PLAN DES CONCENTRATIONS EN ARSENIC DANS LE ROC DE SURFACE	77
CARTE 17	VUE EN PLAN DES CONCENTRATIONS EN ARSENIC DANS LES DÉPÔTS DE SURFACE	83
CARTE 18	VUE EN PLAN DES CONCENTRATIONS EN ARSENIC DANS LE ROC DE SURFACE	85

TABLE DES MATIÈRES (suite)

ANNEXE

A DESIGN DE LA HALDE DE MORT TERRAIN ET DU BASSIN PROVENANT DE GOLDER (2020)

1 INTRODUCTION

1.1 MISE EN CONTEXTE

Galaxy Lithium (Canada) inc. (Galaxy) est une filiale de Galaxy Resources Limited, une importante société minière sur le marché du lithium. Actuellement, Galaxy Resources Limited exploite une mine de spodumène en Australie et deux projets sont en développement : un au Québec et l'autre en Argentine.

Galaxy agit à titre d'initiateur du projet mine de lithium Baie-James, situé dans la région administrative du Nord-du-Québec. Le site minier à l'étude se trouve à environ 10 km au sud de la rivière Eastmain et à quelque 100 km à l'est de la baie James, à la même latitude que le village cri d'Eastmain. La propriété minière (claims) de Galaxy se trouve sur des terres de catégorie III selon la Convention de la Baie-James et du Nord québécois (CBJNQ). Les terres sous claims miniers sont facilement accessibles par la route Billy-Diamond (anciennement la route de la Baie-James), qui traverse la propriété à proximité du relais routier du km 381 (carte 1).

Le projet prévoit l'exploitation d'une fosse de façon conventionnelle, d'où environ 2 Mt par année de pegmatites à spodumène seront extraites pour ensuite être dirigées vers un concentrateur. Outre ces installations, le site accueillera notamment des aires d'accumulation (mort-terrain, terre végétale, stériles/résidus, minerai, concentré), des bassins de rétention, une unité de traitement d'eau, des bâtiments administratifs, un campement pour les travailleurs, des ateliers et entrepôts ainsi qu'un dépôt d'explosifs. La période d'exploitation prévue est de 18 ans.

Le projet mine de lithium Baie-James est assujetti à la procédure provinciale d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement, comme prévu à l'article 153 du chapitre II de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE). L'annexe A de la LQE liste les projets obligatoirement soumis à la procédure d'évaluation et d'examen, dont « tout projet minier, y compris l'agrandissement, la transformation ou la modification d'une exploitation minière existante ». Conjointement à la LQE, l'annexe 1 du chapitre 22 de la CBJNQ dresse une liste de projets soumis au processus d'évaluation, dont les projets d'exploitation minière. Le projet est également assujetti à une évaluation environnementale fédérale, comme prévu à l'article 13 de la Loi canadienne sur l'évaluation environnementale (LCEE 2012) (L.C. 2012, ch. 19, art. 52), puisque l'extraction de minerai dépassera 3 000 tonnes (t)/jour (article 16(a)) et que la capacité de l'usine de concentration dépassera 4 000 t/jour (article 16(b) du Règlement désignant les activités concrètes (DORS/2012-147)).

Galaxy a fait appel à WSP Canada Inc. (WSP) afin de l'accompagner dans la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement (ÉIE) pour ce projet. WSP a donc documenté l'état de référence de l'hydrogéologie sur le territoire à l'étude en 2018 (WSP, 2018c).

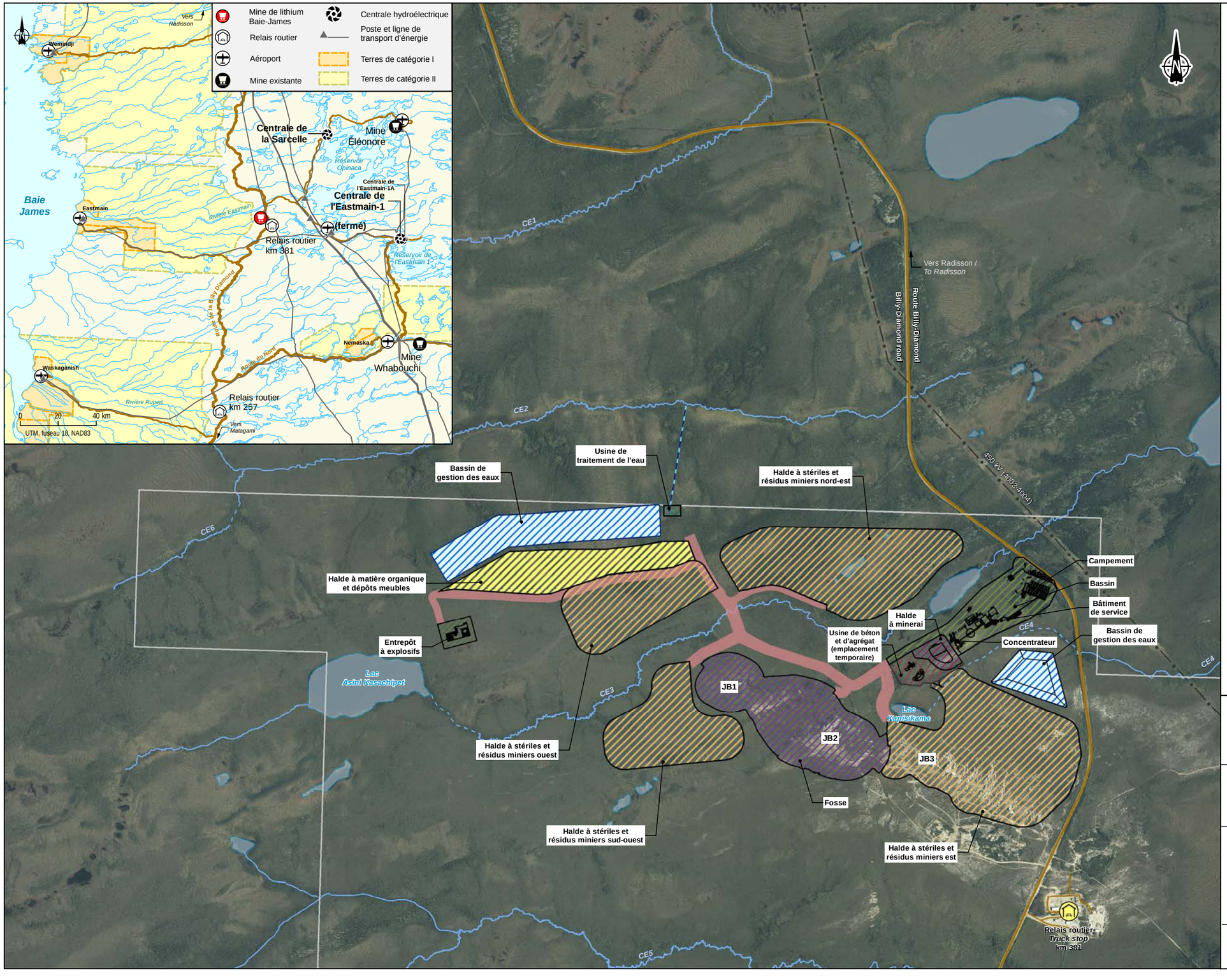
De nouvelles campagnes d'échantillonnage ont été réalisées à l'été 2020 et à l'hiver 2021 par SNC-Lavalin (SNC-Lavalin, 2020 et SNC-Lavalin, 2021) afin de collecter de nouvelles informations concernant la stratigraphie à l'endroit des futures infrastructures. La carte 2 présente la localisation de l'ensemble des sondages disponibles sur le site. Une mise à jour du modèle hydrogéologique a donc été réalisée afin de considérer les nouvelles données disponibles et les nouveaux emplacements des différentes infrastructures minières. Les remarques et questions posées dans le cadre du processus d'analyse de l'ÉIE par les autorités fédérales et provinciales ont également été prises en compte dans la mise à jour de l'étude.

Le rapport présente donc une mise à jour de l'étude hydrogéologique réalisée en 2018.

1.2 OBJECTIFS

Les objectifs principaux de l'étude hydrogéologique sont les suivants :

- mise à jour des caractéristiques géologique et hydrogéologique des dépôts meubles et du roc dans le secteur choisi pour l'aménagement de la fosse et des haldes de stériles;
- évaluer le débit de dénoyage de la fosse et étudier l'effet du cône de rabattement sur les lacs environnants ainsi que sur les cours d'eau à partir d'un modèle numérique;
- évaluer le débit de percolation sous les différentes infrastructures minières : haldes de résidus et de stériles (haldes de codéposition) et bassins;
- effectuer une modélisation de transport pour évaluer l'impact des haldes de codéposition sur le milieu.



- Limite de propriété

Composantes du projet

- Route
- Effluent minier
- Usine de traitement de l'eau
- Secteur administratif et industriel
- Fosse
- Halde à minerai
- Halde à stériles
- Halde à matière organique
- Entrepôt à explosifs
- Bassin de rétention d'eau
- Câble de fibre optique

Infrastructures

- Route principale
- Route d'accès
- Ligne de transport d'énergie
- Relais routier

Hydrographie

- CE3 — Numéro de cours d'eau
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent
- Plan d'eau

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 1
Localisation du site et des infrastructures

Sources :
Othoimage : Microsoft Bing (ESRI, 2017)
Gestim : MRNF Québec, 210315
Canvec, 1 : 50 000, RNCan, 2015
BDGA, 1 : 1 000 000, RNCan, 2011
Terres de catégorie / Category land : Carto-Média, 2001
Données du projet / Project data : Galaxy 2021

0 200 400 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc1_wspT340_Loc_210720.mxd

wsp

2 MÉTHODOLOGIE – MODÉLISATION NUMÉRIQUE

2.1 ÉTAPES REQUISES

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

- élaboration du modèle conceptuel initial basé sur les données disponibles;
- construction du modèle hydrogéologique numérique afin d'obtenir une représentation la plus fidèle possible au modèle conceptuel élaboré;
- détermination de l'étendue de la zone d'étude;
- identification du contexte géologique et des propriétés hydrogéologiques des unités hydrostratigraphiques;
- attribution des conditions hydrogéologiques à chacune des unités hydrostratigraphiques (aquifères et aquitards) dans l'horizon de subsurface;
- analyse du mouvement régional de l'eau souterraine, incluant les élévations de l'eau souterraine;
- 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;
- calibration des paramètres hydrauliques du modèle numérique afin d'être fidèle au réseau d'écoulement d'eau souterraine dans le secteur d'étude.

Le modèle hydrogéologique a été élaboré à partir des données récoltées lors des campagnes de terrain et des études antérieures disponibles. Voici un résumé des données utilisées :

- données numérisées d'élévation topographique (LiDAR - Light Detection and Ranging - 2017);
- données numérisées d'élévation topographique (CanVec+, 1/50 000, RNCan, 2014);
- données numérisées des dépôts quaternaires, à partir de photographies aériennes (WSP, 2018b);
- cartes géologiques (SIGEOM);
- base de données (Excel) des forages d'exploration dans le secteur de la mine (Galaxy, 2017);
- données numérisées des cours d'eau (CanVec+, 1/50 000, RNCan, 2014);
- données numérisées des lacs (CanVec+, 1/50 000, RNCan, 2014);
- étude hydrologique (WSP, 2018a);
- étude hydrogéologie (WSP, 2018c);
- données numérisées des futures infrastructures (fosse et halde de codéposition), (G Mining Services inc. (GMSI), 2021 et Golder, 2020).

2.2 CHOIX DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

Pour simuler l'écoulement de l'eau souterraine, un code numérique est requis pour reproduire les charges hydrauliques, leur distribution spatiale et leur variation dans le temps. Le code numérique choisi doit permettre de répondre aux objectifs de l'étude. Il doit pour cela être capable de représenter au mieux le modèle conceptuel qui a été défini. Le modèle numérique a été construit avec le logiciel FEFLOW – Finite Element Subsurface Flow System (version 7.4).

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 permanents que transitoires de l'eau souterraine dans des aquifères captifs, semi-captifs et libres. 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 non confinées en régime permanent ont été utilisées pour calibrer le modèle.

2.3 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 DESCRIPTION DU SITE / MODÈLE CONCEPTUEL

L'élaboration du modèle conceptuel est l'étape la plus importante de la réalisation d'une modélisation. Elle permet d'identifier et de décrire les différents aspects du système hydrogéologique. La construction d'un modèle d'écoulement pour l'eau souterraine comprend les trois phases suivantes :

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

3.1 TOPOGRAPHIE

La zone d'étude est localisée dans la partie nord de la province naturelle des hautes-terres de Mistassini. Cette province naturelle correspond à un plateau dont l'inclinaison est légèrement orientée vers l'ouest, soit vers la Baie-James (Li et Ducruc, 1999). Cette région est parsemée de collines rocheuses qui sont séparées par des dépressions dont l'étendue varie de quelques centaines de mètres à plus de 10 km. La propriété minière est située à la limite nord de cette province, presque à la jonction de la province des Collines de la Grande Rivière. À l'intérieur de la zone modélisée, l'élévation varie entre 191 m et 246 m, pour un dénivelé total de 55 m. La topographie de la zone d'étude est présentée sur la carte 2.

La topographie du site a été interpolée à partir des informations disponibles pour la zone d'étude :

- données numérisées d'élévation topographique (LIDAR - Light Detection and Ranging, 2017);
- données numérisées d'élévation topographique (CanVec+, 1/50 000, RNCan, 2014).

3.2 HYDROLOGIE ET BILAN HYDRIQUE

Le réseau hydrographique sur le Bouclier canadien présente une configuration intimement liée à l'expression en surface des larges structures géologiques qui ont façonné le paysage.

3.2.1 HYDROLOGIE

La zone d'étude se situe à l'intérieur du bassin versant de la rivière Eastmain. Ce dernier, d'une superficie d'environ 46 000 km², draine les eaux de nombreux lacs et rivières. La zone d'étude comprend le relais routier du km 381 de la route Billy-Diamond, et inclut cinq cours d'eau nommés CE1 à CE5 pour les besoins de l'étude. Les cours d'eau CE1 et CE2 s'écoulent vers l'ouest en direction de la rivière Miskimatao, puis rejoignent la rivière Eastmain. Les cours d'eau CE3, CE4 et CE5 s'écoulent quant à eux vers l'est, pour rejoindre la rivière Eastmain.

La localisation des lacs et des cours d'eau est présentée sur la carte 3. Le tableau 1 présente les débits estimés et le tableau 2 présente les élévations estimées des lacs. Les valeurs de débits moyens et de base sont négatives puisqu'elles correspondent aux flux d'eau souterraine alimentant les cours d'eau.

Les valeurs positives correspondent quant à elles à des zones où les cours d'eau alimentent l'aquifère. Dans le cadre du présent projet, l'ensemble des cours d'eau est alimenté par l'aquifère d'où les valeurs négatives.

Tableau 1 Liste des stations et débits estimés

Site de mesure	Débit d'étiage (Q 10,7 estival) (m^3/j)	Débit d'étiage (Q 10,7 annuel) (m^3/j)	Débit moyen annuel (m^3/j)
Station jaugeage CE2 (sonde 2)	-1 382	-605	-14 364
Station jaugeage CE3 (sonde 3)	-864	-432	-9 475
Station jaugeage CE4 (sonde 4)	-173	-86	-1 951
Station jaugeage CE5 (sonde 5)	-2 938	-1 296	-30 528

Source : WSP, 2018a.

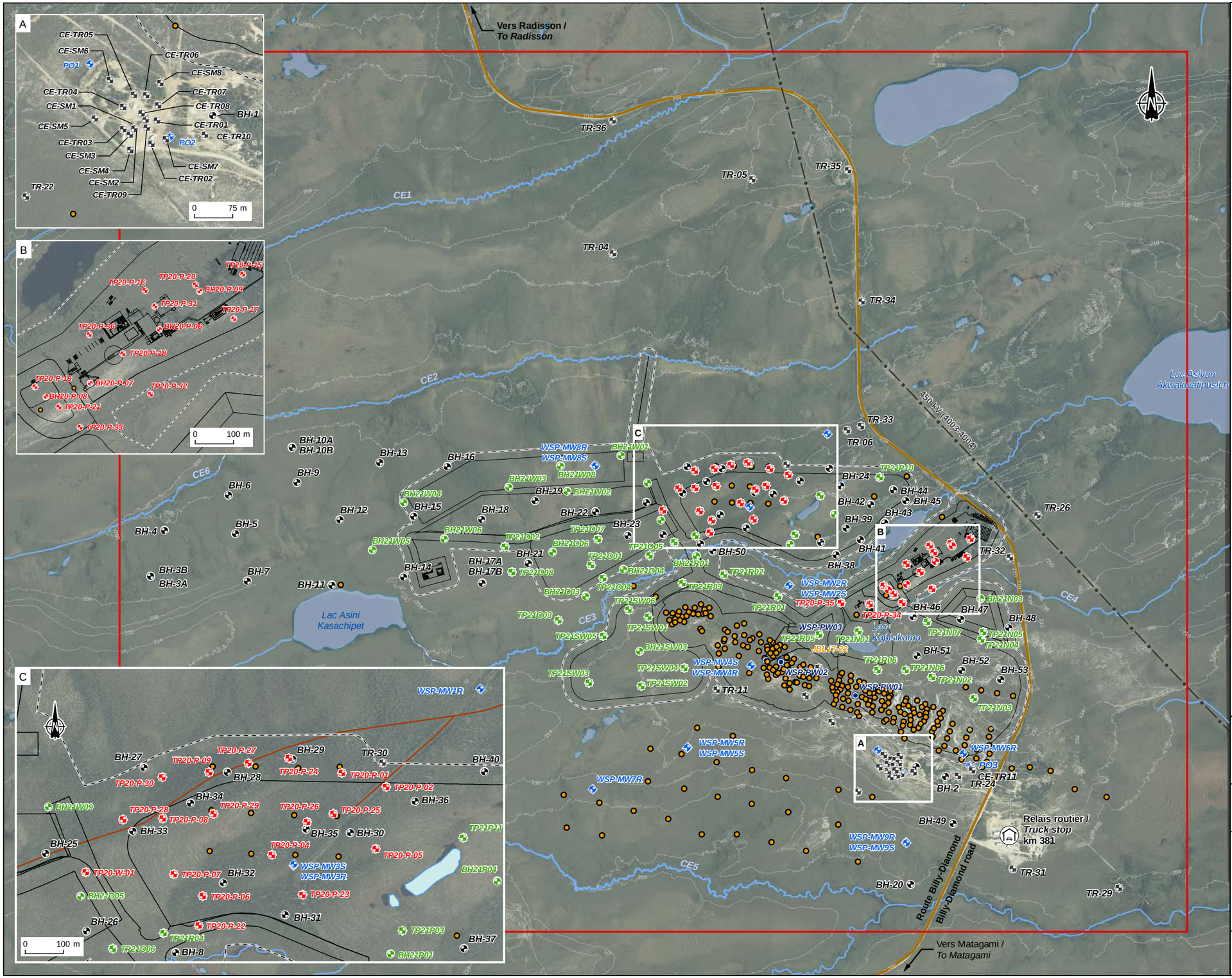
Tableau 2 Élévation du niveau d'eau des lacs

Nom du lac	Élévation du niveau d'eau estimée à partir du LiDAR (m)
Lac Asini Kasachipet	211,4
Lac Kapisikama	213,7
Lac Asiyan Akwakwatipusich	200,4
Élargissement du cours d'eau CE3	206,66
Lac 1	205,2
Lac 2	199,5

3.2.2 BILAN HYDRIQUE

Le bilan hydrique permet de déterminer la recharge sur l'ensemble du site à l'étude. En effet, lors de précipitations, ce n'est pas l'ensemble des précipitations qui participe à la recharge de la nappe. Une partie s'écoule par ruissellement et une partie repart dans l'atmosphère par évapotranspiration. De nombreux facteurs sont à prendre en compte. Naturellement, le taux de recharge de l'aquifère rocheux sera plus élevé aux endroits où l'épaisseur de dépôts meubles est faible, surtout si la conductivité hydraulique de ces dépôts est élevée. Une topographie plane aura également tendance à favoriser la recharge, car le taux de ruissellement sera plus faible. Par contre, dans les milieux humides déjà saturés en eau, la recharge sera beaucoup plus faible puisque l'eau s'écoulera en surface et/ou s'accumulera sur place.

L'évapotranspiration peut être déterminée par la formule de Thornthwaite et Mather (1957). Cette formule se sert des précipitations mensuelles, des températures mensuelles ainsi que de la latitude de la station météorologique. Les précipitations mensuelles utilisées correspondent aux précipitations moyennes sur la période 1976-2017 enregistrées à la station de La Grande Rivière A. Le tableau 3 présente les résultats obtenus d'évapotranspiration et de précipitations efficaces. Ces dernières correspondent à la somme des eaux de ruissellement et de la recharge, donc à la quantité d'eau disponible pour infiltration.



GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 2
Sondages hydrogéologiques

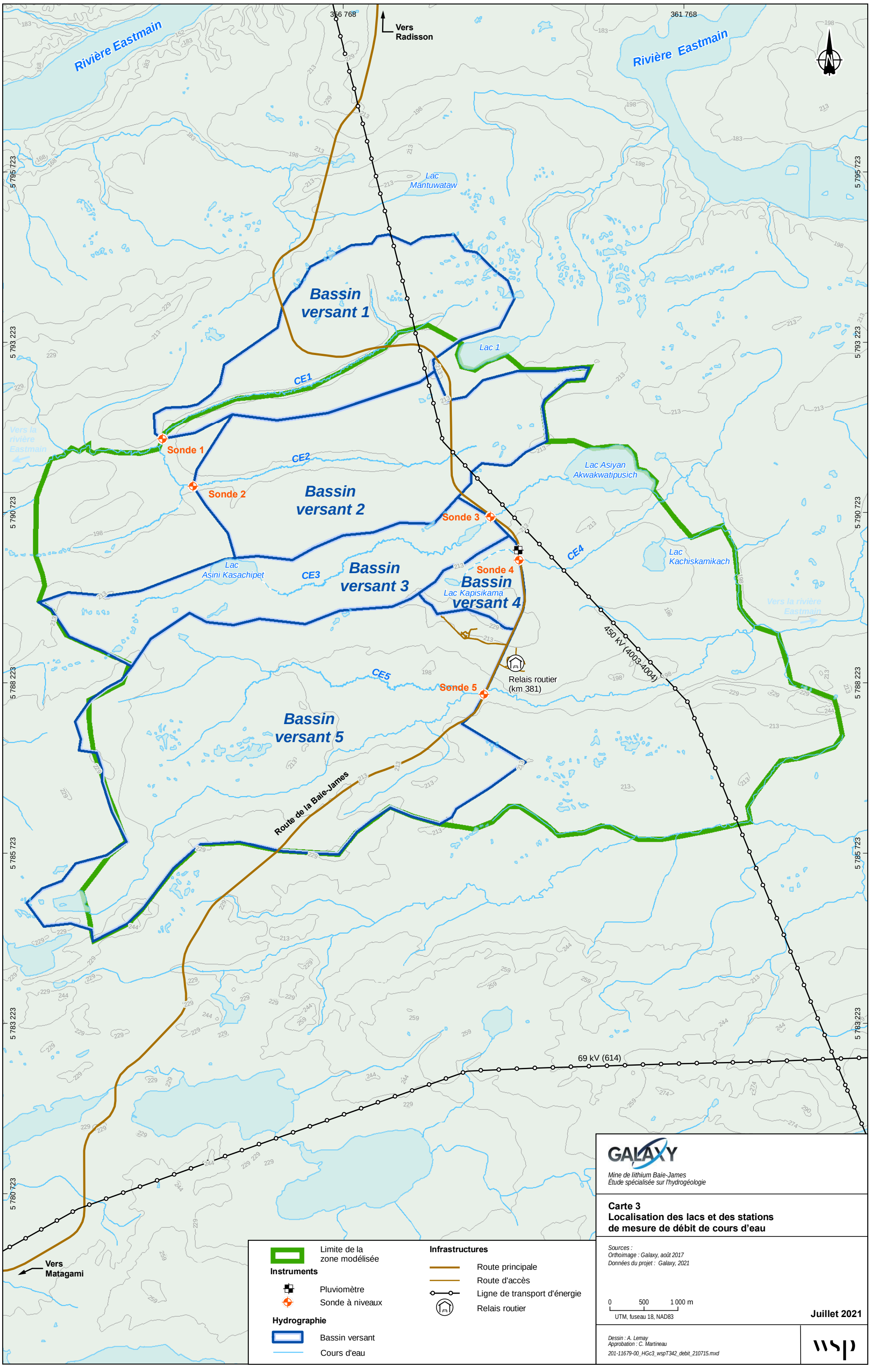
Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 240 480 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc2_wspT341_sondage_210715.mxd

wsp



Route principale
Route d'accès

Tableau 3 Évaluation des précipitations efficaces (mm/an)

Mois	Précipitations mensuelles moyennes (mm)	Températures mensuelles moyennes (°C)	Évapotranspiration potentielle moyenne (mm)	Précipitations efficaces (mm)
Janvier	31,8	-23,2	0,0	31,8
Février	21,8	-21,6	0,0	21,8
Mars	29,3	-14,6	0,0	29,3
Avril	31,5	-4,9	0,0	31,5
Mai	40,3	4,3	47,0	0,0
Juin	64,8	10,5	92,5	0,0
Juillet	79,5	13,7	113,3	0,0
Août	85,2	12,9	98,9	0,0
Septembre	106,9	7,4	55,8	51,1
Octobre	86,5	1,2	12,8	73,7
Novembre	66,3	-6,3	0,0	66,3
Décembre	40,1	-17,1	0,0	40,1
Année	**683,9**	**-3,1**	**420,3**	**345,7**

Source : Environnement Canada, Station La Grande Rivière A (1976-2017).

Les précipitations efficaces sont donc en moyenne de 345,7 mm/an. Parmi ces 345,7 mm, une partie ruissellera et une partie s'infiltrera et participera à la recharge. Le taux de ruissellement varie en fonction de la pente et du type de sols. Le coefficient de ruissellement a été estimé à partir des valeurs tirées du manuel de conception des ponceaux (MTMDET, 2017). Les sols présents sur le site varient du type A à AB pour l'unité de till et de C à CD pour l'unité argileuse. La pente sur l'ensemble du site, quant à elle, varie de moins de 3 % notamment dans les zones argileuses, à plus de 8 % dans la zone où sera située la future fosse. À partir de ces données, le coefficient de ruissellement varie entre 0,07 et 0,51, ce qui donne des valeurs de ruissellement allant de 50 à 350 mm/an.

À partir de ces éléments, on peut estimer que la recharge pourrait varier entre 6 mm/an et 307 mm/an. La calibration du modèle, présentée à la section 5.4, permettra de définir les valeurs des différentes zones de recharge.

3.3 UNITÉS HYDROSTRATIGRAPHIQUES

Le modèle conceptuel utilisé pour représenter le système hydrogéologique a été simplifié, tout en s'assurant de respecter le plus fidèlement possible les observations de terrain. Ces simplifications sont nécessaires puisque l'étendue du modèle couvre une superficie 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/extrapolées 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 du modèle n'influenceront pas l'écoulement dans le secteur d'intérêt.

Dans la région, la couverture de matériaux glaciaires est plutôt discontinue et est caractérisée par une trainée de till déposée à l'abri de protubérances rocheuses. Sur les terrains plus bas, entre les crêtes de roc et de till, une couche de dépôts marins tapisse les sols. Il s'agit d'argile mise en place dans les eaux calmes et profondes de la mer de Tyrell. Par la suite, plusieurs tourbières se sont développées sur la surface mal drainée des dépôts marins très compacts (WSP, 2018b). La carte 4 présente la répartition des dépôts de surface ainsi que leur épaisseur sur la zone modélisée.

La région d'étude se situe dans les basses terres de la Baie-James. Cette région est caractérisée par un relief légèrement ondulé. Le substrat est composé de roches d'âge archéen appartenant à la Province du Supérieur. Le secteur à l'étude recoupe deux sous-provinces, soit la sous-province de Némiscau au sud et celle de La Grande au nord.

On y trouve essentiellement des roches métasédimentaires telles que des paragneiss et des schistes de même que des roches volcaniques mafiques et intermédiaires tels que des basaltes, des andésites, des roches volcanoclastiques et localement roches volcaniques alcalines. On retrouve aussi des roches ignées en quantité plus faible, telles que des granites et des granodiorites (SIGEOM, 2018). La carte 5 présente les différentes unités géologiques de la zone d'étude.

3.3.1 TOURBIÈRE

Plusieurs tourbières se sont développées sur la surface mal drainée des dépôts marins très compacts. Il s'agit de tourbières ombrotrophes et minérotrophes ouvertes, arbustives ou boisées. Elles sont vastes et très nombreuses, si bien qu'elles recouvrent les dépôts sur près de 72 % du territoire cartographié (WSP, 2018b). Quelques tourbières se sont aussi développées dans les dépressions du roc et du till. L'abondance de ces milieux humides témoigne des mauvaises conditions de drainage des sols.

Cette unité est caractérisée par des dépôts organiques pouvant atteindre une épaisseur de 4 m. Elle n'a pas été caractérisée par des essais de nature hydrogéologiques sur le site à l'étude.

3.3.2 SABLE LITTORAL

On retrouve, dans certains secteurs, des dépôts sableux mis en place lors du retrait de la mer de Tyrell. Ces dépôts littoraux recouvrent les dépôts marins. Lors des travaux d'investigation, ils ont été identifiés au sud de la fosse (PO1, PO2).

3.3.3 DÉPÔTS ARGILEUX

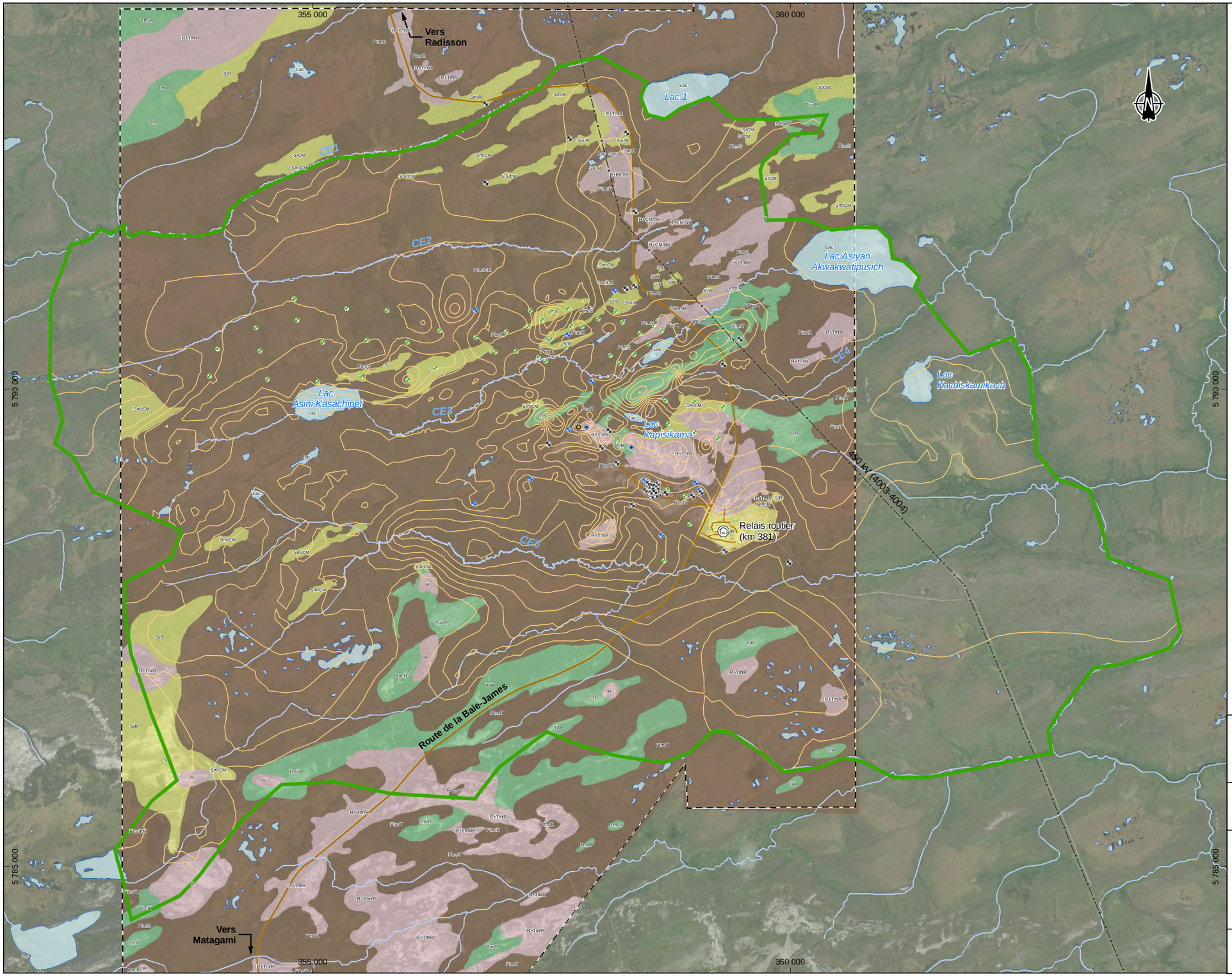
Une couche de dépôts argileux (dépôts marins) se trouve sur les terrains plus bas, entre les crêtes de roc et de till. L'épaisseur de dépôts argileux peut atteindre 10 m d'après les forages réalisés dans la zone d'étude. L'épaisseur des dépôts argileux est présentée à la carte 6. Pour les zones où aucune information n'était disponible, les épaisseurs ont été déterminées à partir de la carte de dépôts de surface et des valeurs obtenues dans les forages.

Les résultats des essais de perméabilité et de l'analyse granulométrique ont permis d'obtenir des conductivités hydrauliques variant de 1,28 x 10^{-8} à 3,56 x 10^{-12} m/s pour une valeur moyenne de 7,54 x 10^{-10} m/s.

3.3.4 TILL

Dans la région, la couverture de matériaux glaciaires est plutôt discontinue, les formes sont allongées et orientées selon un axe OSO-ENE, qui indique la direction de l'écoulement glaciaire régional. Le till de la région est caractérisé par un matériel très dense n'ayant aucune structure apparente et par la présence sporadique de lentilles de sable et de gravier. La composition des dépôts glaciaires reflète grandement la lithologie du socle, soit une dominance de gneiss et de granites (Hardy, 1976). L'épaisseur de till sur la zone étudiée varie entre 0,05 et 18,5 m.

Les résultats des essais de perméabilité et de l'analyse granulométrique ont permis d'obtenir des conductivités hydrauliques présentant une grande variabilité, de 4,29 x 10^{-9} à 1,05 x 10^{-3} m/s pour une valeur moyenne de 4,90 x 10^{-6} m/s.



Limite de la zone modélisée
Forage d'exploration
Puits d'observation
Puits de pompage
Tranchée
Sondage géotechnique

Épaisseurs de dépots

Infrastructures

Route principale
Route d'accès
Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 Numéro de cours d'eau
Cours d'eau permanent
Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

Dépôts de surface

Limite de la zone photo-interprétée

R	Roc
R+CMm/R	Roc avec placage d'argile mince (<2m) discontinu
R+Tm/R	Roc avec placage de till mince (<2m) et discontinu
R+Ptm/R	Roc avec placage de tourbe mince (<2m) et discontinu
S	Sable
S/CM	Sable (2 à 6 m) sur argile
S/R	Sable (2 à 6 m) sur roc
Sm/CM	Sable mince (<2m) sur argile
Sm/R	Sable mince (<2m) sur roc
T/R	Till (2 à 6 m) sur roc
Tm/R	Till mince (<2m) sur roc
Ptm/CM	Tourbe mince (<2m) sur argile
Ptm/R	Tourbe mince (<2m) sur roc
Ptm/S	Tourbe mince (<2m) sur sable
Ptm/T	Tourbe mince (<2m) sur till

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 4
Dépôts de surface

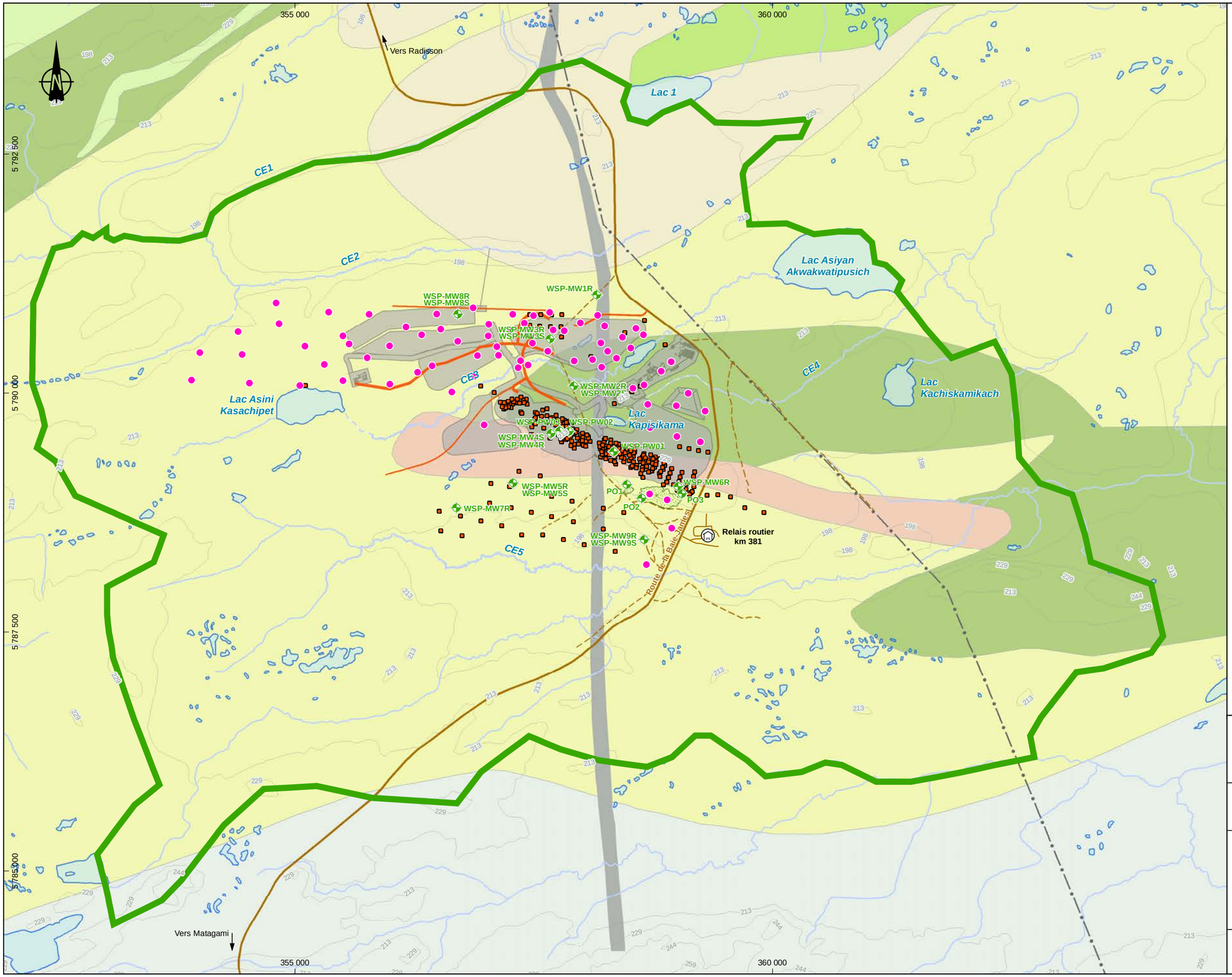
Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 400 800 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc4_wspT343_depot_surf_210715.mxd

wsp



Limite de la zone modélisée
Forages hydrogéologiques
Forages d'exploration
Forages géotechniques

Infrastructures

Route
Route d'accès
Sentier
Ligne de transport d'énergie
Relais routier
Sablière

Composantes du projet

Infrastructures projetées
Accès projetés

Géologie

Pegmatite à spodumène
Conglomérat monogénique à polygénique et grès
Paragneiss à minéraux métamorphiques
Basalte amphibolitisé et amphibolite
Tuf intermédiaire
Tuf felsique à intermédiaire
Diabase

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 5
Géologie

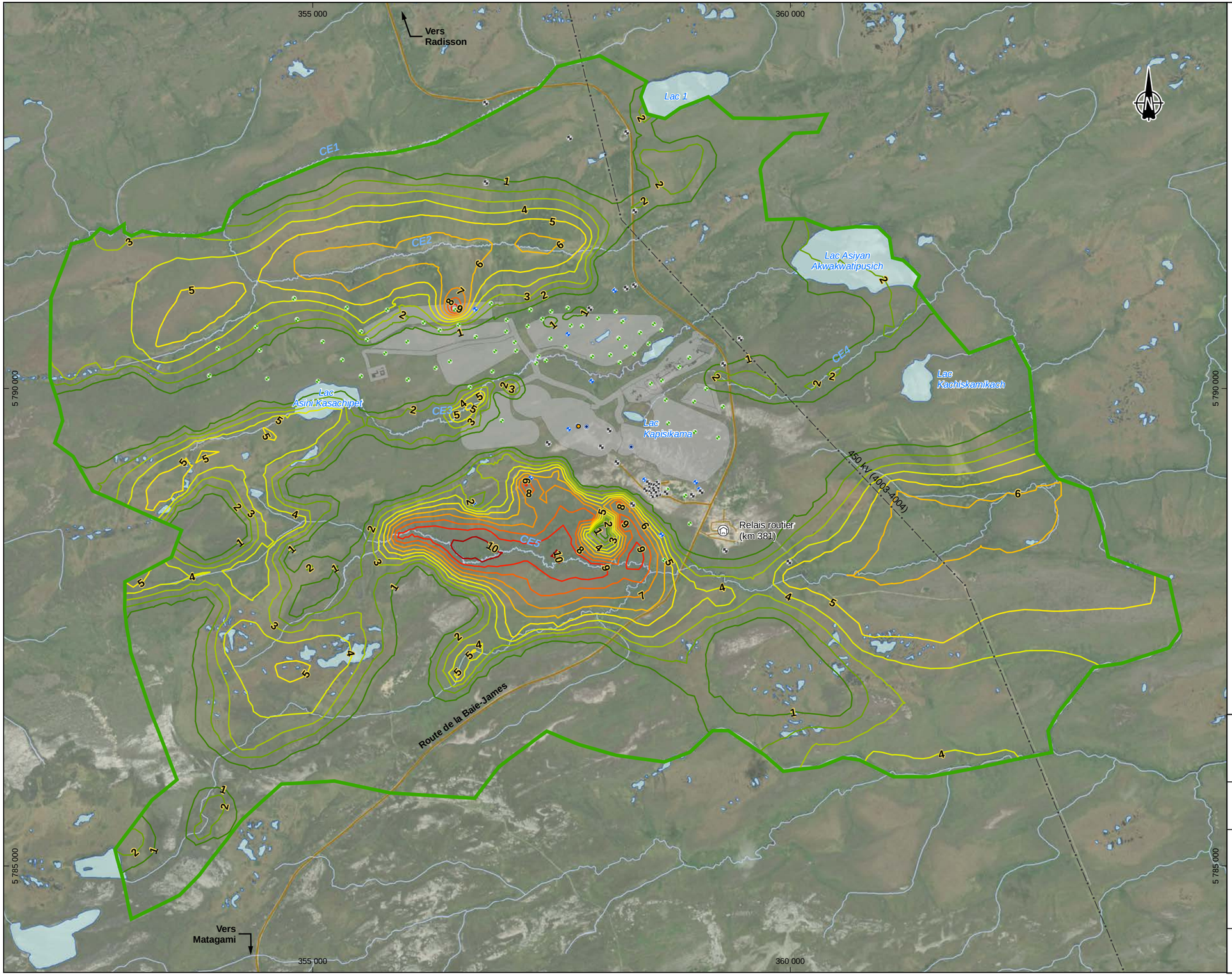
Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 400 800 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc5_wspT344_geologie_210715.mxd

wsp



Limite de la zone modélisée
Forage d'exploration
Puits d'observation
Puits de pompage
Tranchée
Sondage géotechnique

Épaisseurs de dépôts (m)

0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Infrastructures

Infrastructures projetées
Route principale
Route d'accès
Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 Numéro de cours d'eau
Cours d'eau permanent
Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 6
Épaisseur des dépôts argileux

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 240 480 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc6_wspT345_depot_argil_210715.mxd

wsp

3.3.5 ROC

Au cœur du Bouclier canadien, le site du projet se situe au nord-est de la province géologique du Supérieur et fait partie de la sous-province volcano-plutonique La Grande (Broad Oak, 2009 *in* SRK Consulting, 2010; MRNF, 2004-2013). La région d'intérêt comprend un assemblage volcano-sédimentaire assigné au groupe Eastmain. Le site à l'étude fait partie de la ceinture de roches vertes d'Eastmain. Celui-ci est dominé par des roches métavolcaniques (amphibolites de grade mafique à felsique associés à la formation de Komo), des roches métasédimentaires et des intrusions gabbroiques mineures (Broad Oak, 2009 *in* SRK Consulting, 2010).

Le lithium qui sera extrait dans le cadre du projet se trouve dans l'unité de pegmatite. En plus de cette unité, un paragneiss à minéraux métamorphiques (probablement d'origine sédimentaire) se situe au nord-est et au sud-est du site d'extraction. Des basaltes amphibolitisés et ambibolites appartenant à la formation de Komo affleurent aussi au nord des dykes de pegmatite. Un dyke de diabase traverse également le site à l'étude (SIGEOM, 2018).

Des essais de perméabilité et un essai de pompage ont été réalisés dans les différentes formations. Dans le paragneiss, les résultats des essais de perméabilité donnent des conductivités hydrauliques variant entre 1,76 x 10^{-7} et 2,27 x 10^{-4} m/s pour une conductivité hydraulique moyenne de 1,2 x 10^{-5} m/s. Dans l'unité de pegmatite, les conductivités hydrauliques varient entre 7,77 x 10^{-9} et 6,07 x 10^{-7} m/s, pour une conductivité hydraulique moyenne de 9,4 x 10^{-8} m/s. Enfin, dans l'unité de basalte, les conductivités hydrauliques varient 2,72 x 10^{-8} et 4,70 x 10^{-5} m/s pour une conductivité hydraulique moyenne de 2,85 x 10^{-6} m/s.

3.4 DESIGN DES INFRASTRUCTURES SIMULÉES

La carte 1 présente la localisation des différentes infrastructures du site. Dans le design fourni par G Mining Services inc. (GMSI) et Golder, quatre haldes de codéposition (stériles et résidus miniers) sont érigées, soit : la halde nord-est, la halde ouest, la halde sud-ouest et la halde est (à proximité de la fosse). La halde nord-ouest est bordée au nord par une halde à matière organique et dépôts meubles excavés, de composition variable (till, tourbe, argile et matériaux granulaires). Les matériaux composant la halde de matière organique et de dépôts meubles seront divisés selon leur nature, et une berme stabilisatrice de remblai de roches stériles sera aménagée à la limite nord de cette halde. Des fossés d'une profondeur de 1,5 m, sous la recommandation de Galaxy, circonscrivent le périmètre des haldes de codéposition (incluant aussi la halde à matière organique et dépôts meubles). Quant à la fosse, elle est située à proximité des haldes sud-ouest et est. La partie centrale de la fosse à la fin des opérations sera à l'élévation -40 masl, soit une profondeur maximale d'environ 270 m.

Selon les designs fournis, deux bassins de rétention des eaux, bordés par des digues d'argile, sont prévus sur le site. Le bassin principal est situé au nord de la halde de mort terrain. Ce bassin sera toujours en eau. Une couche d'argile imperméabilisante sera installée dans le fond du bassin. Le second bassin est situé à l'est de la halde est. Il s'agit d'un bassin temporaire qui sera rarement rempli et dont l'eau sera envoyée vers le bassin principal.

Une bande d'une largeur de 25 m de tourbe est excavée partout en périphérie du pied des haldes de stériles et de résidus miniers. Une bande d'une largeur de 15 m de tourbe est excavée à la limite nord de la halde à matière organique et dépôts meubles. La tourbe sera également enlevée dans les empreintes des infrastructures.

Design des haldes de codéposition

Le design des quatre haldes de codéposition prévoit des élévations de 260 m pour la halde ouest, de 290 m pour la halde nord-est, de 270 m pour la halde sud-ouest et de 350 m pour la halde est. Elles reposent directement sur une couche de dépôts granulaires (till) ou une couche naturelle de dépôts argileux, lorsque celle-ci est présente.
La tourbe sera excavée dans l'empreinte des haldes. Une couche de matériel drainant (stérile minier) sera installée à la base des haldes afin d'éviter toute accumulation d'eau et de permettre un drainage efficace de l'eau vers les fossés.

Design de la halde à matière organique et dépôts meubles

Dans le secteur de la halde à matière organique et dépôts meubles, l'aménagement prévoit répartir les dépôts naturels excavés regroupés par types de dépôts, comme suggéré dans le design de Golder (Golder, 2020). Deux piles de dépôts granulaires naturels (till) sont planifiées, de même qu'une aire pour la tourbe et l'argile naturelle excavées. Une berme stabilisatrice en remblai de roches stériles est également prévue, bordant la limite nord de la halde à matière organique et dépôts meubles.

La figure 2 à l'annexe A montre le design proposé par Golder. Il est à noter que les coupes types de Golder sont simplifiées afin de représenter une coupe générale de l'ensemble des haldes à des fins de vérification de leur stabilité. Les épaisseurs des couches pourraient ne pas être identiques à celles construites à partir de l'interpolation des épaisseurs mesurées en forage dans le secteur projeté des installations, tel que dans le modèle conceptuel 3D élaboré avec le logiciel Feflow.

Design des bassins

Dans le secteur du bassin principal, l'aménagement du bassin prévoit d'excaver la tourbe et l'argile selon le design établi par Golder (2020) jusqu'à une élévation constante de 198,5 m, laissant dans le fond du bassin une épaisseur d'argile naturelle variant de 0 à 2,4 m, avec une valeur moyenne de moins de 1 m (WSP, 2018b). La figure 3 à l'annexe A montre le design proposé par Golder. Contrairement au plan présenté, une couche d'argile imperméabilisante d'au moins 0,5 m sera mise en place lorsqu'aucune argile naturelle ne sera présente dans l'empreinte du bassin. Il est à noter que les coupes types de Golder sont simplifiées afin de représenter une coupe générale de l'ensemble de la halde à des fins de vérification de leur stabilité.

L'élévation de l'eau finale dans le bassin est prévue à 205,2 m (Golder, 2020).

Le bassin secondaire est situé à proximité de la halde est. Les matériaux en place seront excavés jusqu'à l'élévation 209 m. Il n'est pas prévu de laisser d'eau dans ce bassin; lors de période d'accumulation, l'eau sera pompée et envoyée vers le bassin principal. La revanche de la digue est à l'élévation 213 m.

Design de la fosse

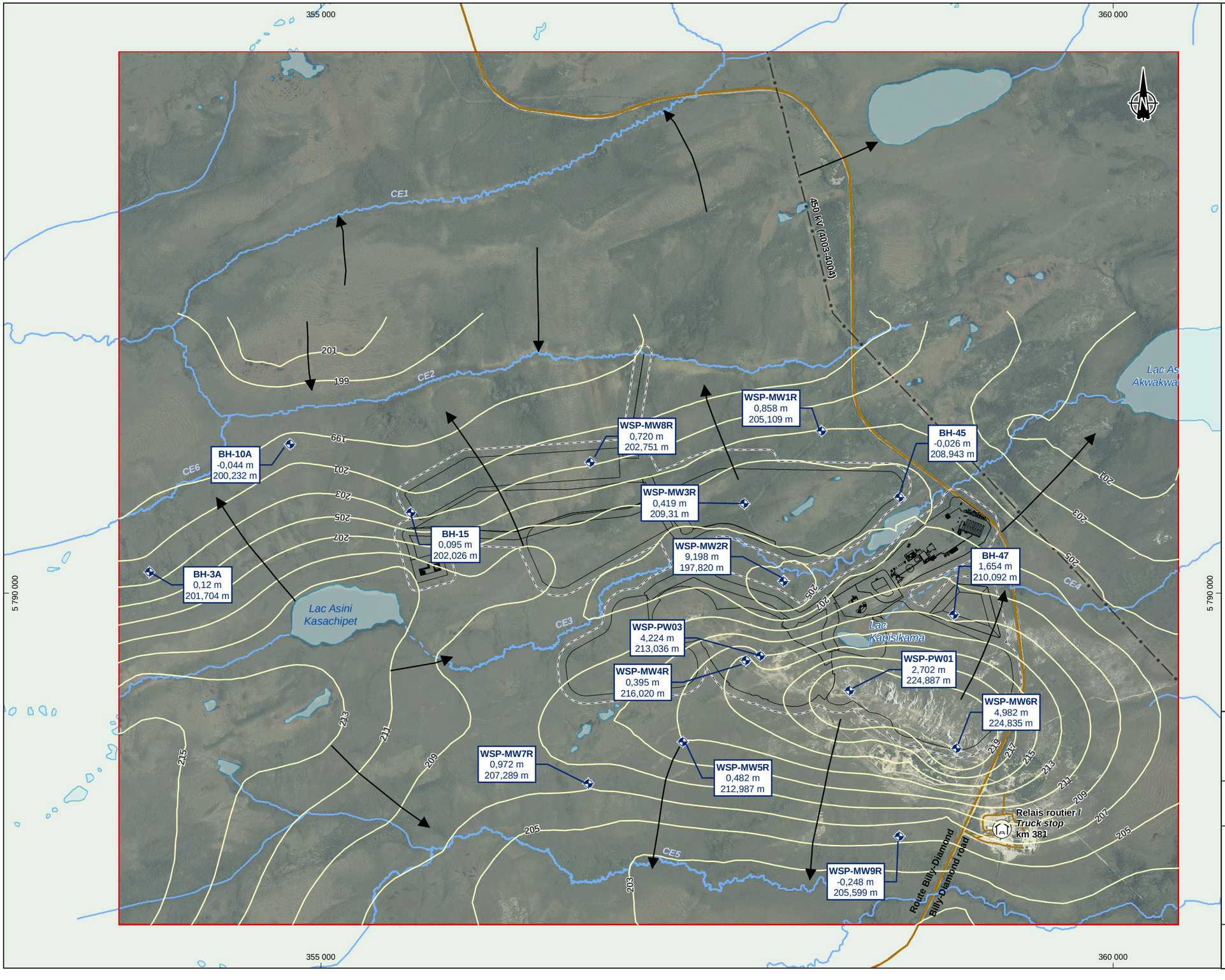
La fosse est composée de trois sections distinctes au début des opérations, pour ensuite former un seul ensemble par la suite. Les trois secteurs de la fosse sont respectivement du nord au sud : JB-1, JB-2 et JB-3. JB-1 sera exploité à partir de l'année 0, alors que JB-2 et JB-3 le seront à partir de l'année 1. La profondeur maximale de la fosse (JB-2) sera d'environ 270 m pour une élévation de -40 masl. À partir de l'année 12, JB-3 sera rempli avec des stériles miniers et cette section de la fosse ne sera plus pompée, ce qui entrainera une remontée progressive du niveau d'eau dans ce secteur. À la fin des opérations, les pompages dans la fosse seront arrêtés et un lac se formera avec les précipitations et les apports en eau souterraine.

3.5 PIÉZOMÉTRIE

3.5.1 CHARGES HYDRAULIQUES

Dans le cadre des travaux, 49 forages, dont 34 puits d'observation, ont fait l'objet de mesures des niveaux d'eau à une ou plusieurs reprises entre août 2017, mai 2018, septembre 2020 et mars 2021. Une carte piézométrique (carte 7) a été générée à partir des mesures prises dans tous les puits interceptant le roc en mai 2018 et à partir des élévations estimées des lacs et cours d'eau. Étant donné l'envergure et les difficultés d'accès du site, tous les niveaux d'eau n'ont pu être mesurés lors d'une même journée. L'ensemble des relevés est présenté au tableau 4.

La mesure au puits WSP-MW2R n'a pas été considérée pour produire la carte piézométrique (carte 7) puisque le niveau d'eau n'avait pas encore atteint l'équilibre lors du relevé réalisé la même journée que le forage.



Zone d'étude locale

Infrastructures minières

Empreinte de la mine (zone tampon de 50 mètres)

Puits d'observation

BH-45
-0,026
208,943 m

Nom du puits d'observation

Profondeur du niveau d'eau p/r sol

Élévation piézométrique (m)

Courbe piézométrique

Sens d'écoulement de l'eau

Infrastructures

Route principale

Route d'accès

Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 *Numéro de cours d'eau*

Cours d'eau permanent

Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

Plan d'eau

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 7
Piézométrie

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Piézométrie, WSP 2018
Données du projet : Galaxy, 2021

0 240 480 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc7_wspT346_piezo_210715.mxd

wsp

Tableau 4 Relevés piézométriques effectués sur le site d'étude

Numéro du puits	Profondeur du puits (m)	Élévation du milieu de la crépine (m)	Hauteur de la margelle par rapport au sol (m)	Unité crépinée	Relevé 1			Relevé 2		
					Profondeur du niveau d'eau p/r sol (m)	Élévation piézométrique (m)	Date	Profondeur du niveau d'eau p/r sol (m)	Élévation piézométrique (m)	Date
WSP-PW01	126,2	-	0,28	Roc	-	-	-	2,70	224,89	6 mai 2018
WSP-PW03	169,5	-	0,80	Roc	4,25	213,01	Février 2018	4,22	213,04	5 mai 2018
WSP-MW1R	6,1	200,62	0,86	Roc	-	-	-	0,86	205,11	3 mai 2018
WSP-MW2R	10,8	196,97	1,03	Roc	-	-	-	9,20*	197,82	5 mai 2018
WSP-MW3R	12,2	199,48	0,92	Roc	0,68	209,05	Février 2018	0,42	209,31	3 mai 2018
WSP-MW4R	7,6	210,32	0,57	Roc	1,09	215,33	Août 2017	0,40	216,02	3 mai 2018
WSP-MW5R	13,1	201,12	0,80	Roc	1,21	212,26	Février 2018	0,48	212,99	5 mai 2018
WSP-MW6R	10,7	220,62	0,62	Roc	4,91	224,91	Août 2017	4,98	224,84	4 mai 2018
WSP-MW7R	7,8	201,21	0,79	Roc	1,16	207,10	Février 2018	0,97	207,29	3 mai 2018
WSP-MW8R	12,2	192,62	0,86	Roc	0,74	202,73	Février 2018	0,72	202,75	3 mai 2018
WSP-MW9R	18,9	187,20	0,97	Roc	-	-	-	-0,25	205,60	4 mai 2018
BH-3A	8,23	194,35	0,56	Roc	-	-	-	0,12	201,70	2 mai 2018
BH-10A	11,5	189,24	0,48	Roc	-	-	-	-0,04	200,23	1 mai 2018
BH-15	9,56	195,12	1,08	Roc	-	-	-	0,10	202,03	1er mai 2018
BH-45	4,62	205,82	1,35	Roc	-	-	-	-0,03	208,94	1er mai 2018
BH-47	12,83	205,05	1,36	Roc	-	-	-	1,65	210,09	1er mai 2018
BH21-N-03	10,98	200,86	0,85	Roc	1,11	209,15	Mars 2021	-	-	-
BH21-O-05	9,05	200,1	0,85	Roc	1,02	207,23	Mars 2021	-	-	-
BH21-P-04	5,85	205,66	0,98	Roc	1,26	208,85	Mars 2021	-	-	-
BH21-R-01	8,8	200,16	0,94	Roc	1,05	206,41	Mars 2021	-	-	-
BH21-W-03	9,05	196,33	0,92	Roc	1,07	202,81	Mars 2021	-	-	-
BH21-W-04	8,85	193,81	0,94	Roc	0,90	201,01	Mars 2021	-	-	-
BH21-W-06	8,8	198,98	0,93	Roc	1,34	205,49	Mars 2021	-	-	-
BH21-SW-03	5,95	206,80	0,98	Roc	1,26	209,99	Mars 2021	-	-	-
BH20-P-07	19,71	198,43	-	Roc	4,54	211,74	Septembre 2020	-	-	-
WSP-MW2S	4,57	204,15	0,81	Dépôts de surface	0,34	206,85	Février 2018	0,21	206,98	5 mai 2018
WSP-MW3S	4,3	206,90	0,85	Dépôts de surface	0,75	208,92	Février 2018	0,17	209,50	3 mai 2018

Tableau 4 (suite) **Relevés piézométriques effectués sur le site d'étude**

Numéro du puits	Profondeur du puits (m)	Élévation du milieu de la crépine (m)	Hauteur de la margelle par rapport au sol (m)	Unité crépinée	Relevé 1			Relevé 2		
					Profondeur du niveau d'eau p/r sol (m)	Élévation piézométrique (m)	Date	Profondeur du niveau d'eau p/r sol (m)	Élévation piézométrique (m)	Date
WSP-MW4S	4,4	213,51	0,63	Dépôts de surface	1,17	215,23	Août 2017	0,33	216,07	5 mai 2018
WSP-MW5S	4,6	210,32	0,71	Dépôts de surface	0,80	212,59	Février 2018	0,30	213,09	5 mai 2018
WSP-MW8S	4,3	200,41	0,99	Dépôts de surface	-	-	-	0,40	202,78	3 mai 2018
WSP-MW9S	4,6	202,28	0,95	Dépôts de surface	-	-	-	0,10	205,26	4 mai 2018
PO-1	7,28	215,89	0,56	Dépôts de surface	-	-	-	5,44	216,17	4 mai 2018
PO-2	8,5	214,01	0,57	Dépôts de surface	5,07	215,36	Février 2018	5,74	214,69	4 mai 2018
BH-1	11,43	210,78	0,99	Dépôts de surface	-	-	-	5,01	215,07	1er mai 2018
BH-10B	8	193,11	0,23	Dépôts de surface	-	-	-	0,72	199,64	1er mai 2018
BH-14	16	203,86	1,09	Dépôts de surface	-	-	-	1,23	211,93	1er mai 2018
BH-18	6,32	201,38	0,24	Dépôts de surface	-	-	-	-0,04	203,72	1er mai 2018
BH-23	11,05	204,75	1,07	Dépôts de surface	-	-	-	0,66	208,99	1er mai 2018
BH-27	8,18	202,46	1,17	Dépôts de surface	-	-	-	0,14	204,62	1er mai 2018
BH-29	14,02	202,90	1,30	Dépôts de surface	-	-	-	1,92	206,68	1er mai 2018
BH-3B	8,23	197,66	0,61	Dépôts de surface	-	-	-	0,28	201,66	2 mai 2018
BH-31	8,84	205,33	1,36	Dépôts de surface	-	-	-	0,12	207,91	1er mai 2018
BH-36	8,18	205,84	1,59	Dépôts de surface	-	-	-	0,57	208,17	1er mai 2018
BH-37	6,63	204,15	1,40	Dépôts de surface	-	-	-	0,08	208,58	1er mai 2018
BH-41	6,22	205,38	1,41	Dépôts de surface	-	-	-	-0,11	207,18	1er mai 2018
BH-49	17,96	199,90	1,40	Dépôts de surface	-	-	-	4,50	206,90	1er mai 2018
BH-50	5,28	206,32	1,43	Dépôts de surface	-	-	-	0,39	206,93	1er mai 2018
BH20-P-06	16,21	206,05	-	Dépôts de surface	2,74	213,31	Juillet 2020	-	-	-
BH21-O-06	13,15	205,75	0,63	Dépôts de surface	3,5	211,85	Mars 2021	-	-	-

* Mesure non stabilisée.

Le secteur de la fosse représente un haut piézométrique. L'écoulement des eaux souterraines s'effectuerait de façon radiale à partir de ce haut piézométrique vers les cours d'eau environnants. Les niveaux d'eau relevés avant la fonte des neiges en février 2018 sont entre 0,03 m et 0,84 m inférieurs à ceux relevés au début de mai 2018, pour une variation moyenne de 0,36 m. Les relevés réalisés à différentes périodes de l'année (février, mars, mai, juillet et août) permettent de visualiser les variations saisonnières des niveaux d'eau.

Dans le secteur de la future fosse, la profondeur des niveaux d'eau de l'aquifère rocheux varie entre 0,40 et 4,98 m, et l'élévation piézométrique varie de 213,03 à 224,89 m. Une variation de -0,03 à 0,84 m est observée entre août 2017 et mai 2018 et une variation de -0,67 à 0,13 m entre février 2018 et mai 2018 dans les puits de ce secteur.

Dans le secteur au sud de la fosse, la profondeur des niveaux d'eau de l'aquifère rocheux varie entre -0,25 à 1,16 m, alors que l'élévation piézométrique varie de 205,6 à 212,98 m. Une variation de 0,19 à 0,73 m est observée entre février et mai 2018 dans les puits de ce secteur.

Dans le secteur de la future usine et de la halde est et du bassin à proximité, la profondeur des niveaux d'eau de l'aquifère rocheux varie entre 1,1 et 4,65 m et l'élévation piézométrique varie entre 209,15 et 211,74 m. Dans l'aquifère de surface, la profondeur du niveau d'eau mesurée en juillet 2020 était de 2,74 m, soit une élévation piézométrique de 213,31 m. Le secteur de l'usine se situe sur un haut topographique, ce qui explique les profondeurs du niveau d'eau plus élevées et le niveau piézométrique plus haut (BH20-P-06 et BH20-P-07).

Au niveau de la future halde sud-ouest, située à proximité de la fosse JB-1, la profondeur du niveau d'eau mesurée en mars 2021 était de 1,26 m, soit une élévation piézométrique de 209,99 m. Cette valeur est similaire aux niveaux mesurés dans le secteur de la fosse.

Dans le secteur de la future halde ouest et du bassin (situé au nord du cours d'eau CE3), la profondeur des niveaux d'eau de l'aquifère rocheux varie entre -0,04 et 1,34 m et l'élévation piézométrique varie entre 201,01 et 207,23 m. Dans l'aquifère de surface, la profondeur des niveaux d'eau varie entre -0,04 et 0,99 m et l'élévation piézométrique varie entre 199,64 et 211,93 m. Une variation de 0,02 m a été observée entre février et mai 2018 dans le puits WSP-MW8R.

Enfin, dans le secteur de la future halde nord (située au nord de l'usine et du cours d'eau CE3), la profondeur des niveaux d'eau de l'aquifère rocheux varie entre -0,03 à 0,86 m, alors que l'élévation piézométrique varie de 205,11 à 209,31 m. Dans l'aquifère de surface, la profondeur des niveaux d'eau varie entre -0,11 et 1,92 m et l'élévation piézométrique varie entre 204,62 et 209,50 m. Une variation de 0,26 à 0,58 m est observée entre février et mai 2018 dans les puits de ce secteur.

Le gradient horizontal dans le secteur d'étude varie entre 0,03 et 0,001. Le gradient vertical dans les différents secteurs a été estimé à partir des puits aménagés au même endroit dans le roc et dans les dépôts meubles (tableau 5).

3.5.2 GRADIENTS HYDRAULIQUES

Les gradients hydrauliques correspondent à la différence de charge en fonction de la distance. Les gradients hydrauliques horizontaux ont été estimés pour chaque secteur à partir de la carte piézométrique présentée à la section précédente (3.4.1). Les gradients hydrauliques verticaux ont quant à eux été estimés à partir des niveaux d'eau relevés en mai 2018 dans des puits aménagés dans les dépôts meubles et dans le roc au même endroit. Les gradients hydrauliques verticaux correspondent au rapport de la différence d'élévation piézométrique (Delta H) sur la différence d'élévation du milieu de la crépine (Delta L). Les gradients descendants sont associés à des zones de recharge, alors que les gradients ascendants correspondent à des zones d'exfiltration.

Secteur de la future fosse

Le gradient vertical dans ce secteur a été estimé à partir des puits WSP-MW4R et WSP-MW4S. Les résultats sont présentés au tableau 5. Dans ce secteur, le gradient vertical mesuré est de 0,02 (descendant).

Secteur des haldes et secteur administratif et industriel

Le gradient vertical dans ce secteur a été estimé à partir des puits WSP-MW8R, WSP-MW8S, WSP-MW3R et WSP-MW3S. Les résultats sont présentés au tableau 5. Dans ce secteur, les gradients verticaux varient entre 0,004 et 0,03 (descendant).

Secteur au sud de la future fosse

Le gradient vertical dans ce secteur a été estimé à partir des puits WSP-MW9R, WSP-MW9S, WSP-MW5R et WSP-MW5S. Les résultats sont présentés au tableau 5. Dans ce secteur, les gradients verticaux varient entre 0,02 (ascendant) et 0,01 (descendant).

Tableau 5 Évaluation des gradients verticaux

Secteur	Puits	Niveau eau statique p/r sol (m)	Élévation piézométrique (m)	Élévation milieu de la crépine (m)	Delta H (m)	Delta L (m)	Gradient calculé (m/m)
Haldes et secteur administratif et industriel	WSP-MW8S	0,40	202,78	200,41	0,03	7,79	0,004 ↓
	WSP-MW8R	0,72	202,75	192,62			
	WSP-MW3S	0,17	209,50	206,90	0,19	7,42	0,03 ↓
	WSP-MW3R	0,42	209,31	199,48			
Secteur au sud de la future fosse	WSP-MW9S	0,096	205,26	202,28	-0,34	15,08	0,02 ↑
	WSP-MW9R	-0,25	205,60	187,20			
	WSP-MW5S	0,30	213,09	210,32	0,1	9,2	0,01 ↓
	WSP-MW5R	0,48	212,99	201,12			
Fosse	WSP-MW4S	0,33	216,07	213,51	0,05	3,19	0,02 ↓
	WSP-MW4S	0,40	216,02	210,32			

3.6 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES MATÉRIAUX

Les propriétés hydrauliques des matériaux ont été déterminées pour chaque unité à partir des travaux effectués dans la zone d'étude, soit :

- les analyses granulométriques (110 analyses);
- l'essai de pompage (un essai au puits WSP-PW03);
- les essais de perméabilité (64 essais à l'endroit de 30 puits).

Toutes ces analyses permettent de déterminer des paramètres, tels que la conductivité hydraulique et le coefficient d'emmagasinement, présentés dans les sections suivantes en fonction des différentes unités rencontrées. Dans ce rapport, seuls les analyses granulométriques et les essais de perméabilité sont présentés, car de nouvelles données sont disponibles. Les analyses et résultats de l'essai de pompage sont disponibles dans l'étude de 2018 (WSP, 2018c).

3.6.1 CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE SATURÉE

Le contraste de perméabilité entre les différentes unités aura une incidence sur les régimes d'écoulement des eaux souterraines. Le tableau 6 présente la compilation des données de conductivité hydraulique par unité déterminée. L'unité de roc a été subdivisée en cinq entités à la suite des observations de terrain et à partir de la géologie du site.

Tableau 6 Compilation des données de conductivités hydrauliques (m/s)

Unité lithostratigraphique	Minimum	Maximum	Moyenne géométrique
Dépôts argileux	$3{,}56 \times 10^{-12}$	$1{,}28 \times 10^{-8}$	$7{,}45 \times 10^{-10}$
Dépôts sableux (till)	$4{,}29 \times 10^{-9}$	$1{,}05 \times 10^{-3}$	$4{,}90 \times 10^{-6}$
Roc (paragneiss)	$1{,}76 \times 10^{-7}$	$2{,}27 \times 10^{-4}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$
Roc (pegmatite à spodumène)	$7{,}77 \times 10^{-9}$	$6{,}07 \times 10^{-7}$	$9{,}4 \times 10^{-8}$
Roc (basalte amphibolitisé et amphibolite)	$2{,}72 \times 10^{-8}$	$4{,}70 \times 10^{-5}$	$2{,}85 \times 10^{-6}$

ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

Lors de la réalisation des forages géotechnique, 110 échantillons ont été prélevés et ont été analysés. Les échantillons peuvent être séparés en deux catégories. Ceux appartenant à l'unité argileuse et ceux de l'unité sableuse (majoritairement le till).

À la suite des analyses granulométriques, la conductivité hydraulique des échantillons analysés a été estimée à l'aide du logiciel HydrogeoSieveXL 2.1 (Devlin, 2015; 2016). HydrogeoSieve permet d'estimer la conductivité hydraulique d'un échantillon à partir de sa courbe granulométrique en utilisant 15 équations suggérées dans la littérature. L'applicabilité de chacune des équations est d'abord vérifiée, puis les diamètres nécessaires aux calculs sont interpolés depuis la courbe granulométrique et, finalement, la moyenne géométrique des résultats de toutes les équations applicables est faite.

Le tableau 7 présente un sommaire des conductivités obtenues lors de l'analyse granulométrique. Les conductivités hydrauliques moyennes de l'unité de dépôts argileux varient entre $3{,}56 \times 10^{-12}$ et $1{,}00 \times 10^{-7}$ m/s pour une conductivité hydraulique moyenne de $3{,}16 \times 10^{-10}$ m/s. Les conductivités hydrauliques de l'unité de till varient entre $4{,}29 \times 10^{-9}$ et $1{,}05 \times 10^{-3}$ m/s pour une valeur moyenne de $6{,}07 \times 10^{-5}$ m/s. Les échantillons prélevés à plus de 5 m de profondeur présentent une conductivité hydraulique moyenne de deux ordres de grandeur plus faibles que ceux de surface.

Tableau 7 Sommaires des résultats de l'analyse granulométrique

Unité	Nombre d'échantillons	Intervalle moyen (m)	Lithologie	Résultats granulométriques moyens (%)	Conductivité hydraulique (m/s)		
					Moyenne	Minimum	Maximum
Dépôts argileux	25	2,71 à 3,38	Silt et argile, traces de sable	Silt 58,6 Argile 36,8 Sable 4,6	$7{,}44 \times 10^{-10}$	$3{,}56 \times 10^{-12}$	$1{,}28 \times 10^{-8}$
Dépôt sableux (till)	85	2,61 à 3,3	Sable silteux et graveleux, traces d'argile	Sable 50,3 Silt 29,4 Gravier 18,2 Argile 2,1	$6{,}02 \times 10^{-6}$	$4{,}29 \times 10^{-9}$	$1{,}05 \times 10^{-3}$

ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

Trente (30) puits ont fait l'objet d'essais de perméabilité. Seuls 28 présentent des résultats concluants. Les résultats des essais pour chacun des puits sont présentés au tableau 8. Les conductivités hydrauliques dans l'unité de till varient de 5,70 x 10^{-7} à 7,68 x 10^{-6} m/s pour une valeur moyenne de 1,39 x 10^{-6} m/s. Un essai de perméabilité a été réalisé dans l'unité argileuse. L'essai réalisé donne une valeur de conductivité hydraulique de 3,14 x 10^{-9} m/s. Les résultats des essais de perméabilité montrent que les conductivités hydrauliques dans le roc varient en fonction des unités géologiques. Pour le paragneiss, la conductivité hydraulique varie entre 1,76 x 10^{-7} m/s et 2,27 x 10^{-4} m/s pour une valeur moyenne de 1,20 x 10^{-5} m/s. Pour la pegmatite, la conductivité hydraulique varie entre 7,77 x 10^{-9} m/s et 6,07 x 10^{-7} m/s pour une valeur moyenne de 9,46 x 10^{-8} m/s. Pour le basalte, la conductivité hydraulique varie entre 2,72 x 10^{-8} m/s et 4,7 x 10^{-5} m/s pour une valeur moyenne de 2,85 x 10^{-6} m/s.

Tableau 8 Résultats des essais de perméabilité

Unité crépinée	Nom de l'échantillon	Conductivité hydraulique (m/s)					
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Moyenne	Moyenne de l'unité
Dépôts argileux	BH-10B	3,14 X 10^{-9}	-	-	-	3,14 X 10^{-9}	3,14 X 10^{-9}
Till	WSP-MW2S	1,19 X 10^{-6}	1,08 X 10^{-6}	-	-	1,13 X 10^{-6}	1,39 X 10^{-6}
	WSP-MW3S	5,70 X 10^{-7}	7,09 X 10^{-7}	-	-	6,36 X 10^{-7}	
	WSP-MW4S	1,60 X 10^{-6}	2,00 X 10^{-6}	-	-	1,79 X 10^{-6}	
	WSP-MW5S	2,12 X 10^{-6}	1,21 X 10^{-6}	-	-	1,60 X 10^{-6}	
	WSP-MW8S	6,86 X 10^{-7}	5,98 X 10^{-7}	-	-	6,40 X 10^{-7}	
	WSP-MW9S	1,06 X 10^{-6}	1,12 X 10^{-6}	-	-	1,09 X 10^{-6}	
	PO-1	6,15 X 10^{-6}	7,68 X 10^{-6}	-	-	6,87 X 10^{-6}	
Paragneiss	WSP-MW5R	1,87 X 10^{-7}	1,76 X 10^{-7}	-	-	1,81 X 10^{-7}	1,2 x 10^{-5}
	WSP-MW7R	4,50 X 10^{-6}	4,65 X 10^{-6}	-	-	4,57 X 10^{-6}	
	WSP-MW8R	2,00 X 10^{-5}	7,03 X 10^{-5}	-	-	3,75 X 10^{-5}	
	WSP-MW9R	4,47 X 10^{-5}	3,78 X 10^{-5}	-	-	4,11 X 10^{-5}	
	BH-10A	1,40 X 10^{-6}	1,52 X 10^{-6}	-	-	1,46 X 10^{-6}	
	BH21-W-03	4,40 X 10-6	5,00 X 10-6	4,83 X 10-6	4,64 X 10-6	4,71 X 10^{-6}	
	BH21-W-042	2,10 X 10-4	2,10 X 10-4	2,27 X 10-4	-	2,16 X 10^{-6}	
	BH21-N-03	1,25 X 10-5	2,13 X 10-5	1,19 X 10-5	2,11 X 10-5	1,61 X 10^{-5}	
Pegmatite	WSP-MW4R	7,07 X 10^{-9}	1,03 X 10^{-8}	-	-	1,03 X 10^{-8}	9,46 x 10^{-8}
	WSP-MW6R	2,68 X 10^{-8}	5,09 X 10^{-8}	-	-	3,69 X 10^{-8}	
	BH21-SW-03	3,25 X 10^{-7}	3,39 X 10^{-7}	2,58 X 10^{-7}	6,07 X 10^{-7}	3,62 X 10^{-7}	
	BH21-W-06	1,51 X 10^{-7}	2,02 X 10^{-7}	-	-	1,75 X 10^{-7}	
Basalte	WSP-MW1R	1,61 X 10^{-6}	1,15 X 10^{-6}	-	-	1,36 X 10^{-6}	2,85 x 10^{-6}
	WSP-MW2R	2,72 X 10^{-8}	-	-	-	2,72 X 10^{-8}	
	WSP-MW3R	1,66 X 10^{-7}	2,28 X 10^{-7}	-	-	1,83 X 10^{-7}	
	BH21-O-05	2,33 X 10^{-6}	1,82 X 10^{-6}	2,22 X 10^{-6}	1,90 X 10^{-6}	2,06 X 10^{-6}	
	BH21-O-06	3,90 X 10^{-6}	5,21 X 10^{-6}	2,49 X 10^{-6}	3,76 X 10^{-6}	3,71 X 10^{-6}	
	BH21-P-04	8,63 X 10^{-6}	1,07 X 10^{-5}	1,02 X 10^{-5}	1,13 X 10^{-5}	1,02 X 10^{-5}	
	BH20-P-07	1,09 X 10^{-6}	1,52 X 10^{-6}	-	-	1,29 X 10^{-6}	
	BH21-R-01	4,70 X 10^{-5}	3,97 X 10^{-5}	4,70 X 10^{-5}	-	4,44 X 10^{-5}	

3.6.2 POROSITÉ

À l'état naturel, un sol saturé d'eau se compose de grains et de pores remplis d'eau. Une portion de cette eau est gravitaire, alors qu'une autre portion est retenue sur la surface des grains.

La **porosité totale** d'un milieu poreux correspond aux rapports entre le volume de l'ensemble des pores d'un échantillon de sol représentatif du milieu poreux considéré, et le volume total de ce même échantillon.

La **porosité efficace** correspond aux pores et interstices reliés à l'état saturé qui permettent l'écoulement de l'eau souterraine (eau gravitaire). La porosité efficace influence le temps de passage de l'eau souterraine à travers une unité hydrogéologique.

Pour des simulations en condition non saturée, la porosité totale doit être considérée dans l'équation d'écoulement de Richards (1922) puisque la courbe de rétention d'eau définit la porosité participant à l'écoulement, alors que pour des simulations en condition saturée, seule la porosité participant à l'écoulement, soit la porosité efficace, doit être considérée.

Pour des simulations de transport de particules, seule la porosité participant à l'écoulement, soit la porosité efficace, doit être considérée pour le calcul.

Le tableau 9 présente des valeurs de porosité efficace et de porosité totale typique pour différents types de sol et de roches disponibles dans la littérature (Banton et Bangoy, 1999).

Tableau 9 Compilation des données de porosités des différentes unités

Unité	Porosité totale (%)	Porosité efficace
Graviers	25-35	20-30
Sable grossier	25-35	20-30
Sable moyen	30-40	25-35
Sable fin	30-40	25-35
Sable limoneux	35-45	25-35
Limon	35-45	15-25
Limon argileux	45-55	5-10
Argile	45-55	0-5
Tourbe	60-80	45-70
Sable éolien	30-40	30-40
Loess	35-45	20-30
Till glaciaire sableux	10-20	5-20
Till glaciaire argileux	10-20	0-10
Roche non fissurée	<1	<1
Roche fissurée	0-5	
Roche fracturée	5-10	0-10
Roche altérée	30-50	10-30

Source : Banton et Nangoy, 1999.

3.6.3 EMMAGASINEMENT SPÉCIFIQUE

L'emmagasinement spécifique (Ss) est la caractéristique hydrodynamique utilisée pour définir la quantité d'eau par unité de volume de milieu souterrain qui est emmagasinée ou libérée à la suite d'une diminution unitaire de la charge hydraulique.

Dans la zone non saturée, l'emmagasinement d'eau dans le milieu poreux correspond principalement à la variation de la saturation dans le sol et est dicté par la porosité du milieu. En milieu saturé, la compressibilité de l'eau et du milieu poreux définissant l'emmagasinement spécifique est en grande partie responsable de la capacité des milieux souterrains à emmagasiner de l'eau. Le tableau 10 présente les valeurs typiques d'emmagasinement spécifique (Domenico et Mifflin, 1965).

Tableau 10 Valeur typique d'emmagasinement spécifique

Matériel	Emmagasinement spécifique Ss (m-1)	
	min	max
Argile plastique	2,38E-04	1,89E-03
Argile raide	1,19E-04	2,38E-04
Argile moyennent raide	8,53E-05	1,19E-04
Sable lâche	4,57E-05	9,45E-05
Sable dense	1,19E-04	1,89E-05
Sable et gravier dense	4,57E-06	9,45E-06
Roc fissuré	3,05E-07	6,40E-06
Roc sain	3,05E-07	3,05E-07

Source : Domenico et Mifflin, 1965.

4 CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

4.1 ÉTENDUE DU DOMAINE ET CONSTRUCTION DU MAILLAGE

4.1.1 DISCRÉTISATION HORIZONTALE DU MAILLAGE

La carte 8 présente la délimitation de la zone modélisée. Cette limite tient compte des bassins versants et des plans d'eau. Les dimensions du modèle sont approximativement de 8 km dans l'axe nord/sud et d'environ 11 km dans l'axe est/ouest. Le coin inférieur gauche du modèle est situé aux coordonnées 353 142 m E et 5 784 441 m N (zone UTM18, NAD83). Le site modélisé couvre une superficie de 64 km² discrétisée via un maillage triangulaire de 37 370 éléments et 263 662 nœuds par couche. Cette triangulation irrégulière s'appuie sur l'ensemble des points où une information est disponible. Ainsi, le maillage est affiné au niveau de la future fosse, des futures haldes de codéposition, des cours d'eau, des lacs et des forages.

4.1.2 DÉFINITION DES DIFFÉRENTES COUCHES DU MODÈLE

Le modèle réalisé étant tridimensionnel, la topographie du site a été implémentée grâce aux données topographiques disponibles pour le site. La carte 9 montre une vue du maillage. La discrétisation verticale des différents horizons est reproduite pour les unités définies dans le modèle conceptuel.

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. La carte 8 présente les vues en plan des conditions limites appliquées sur la couche supérieure du modèle et la carte 9, les conditions limites des couches subséquentes.

4.2.1 CONDITIONS LIMITES EXTERNES

Une condition limite de charge hydraulique constante impose une charge hydraulique à un nœud prédéfini. Au lieu de calculer la charge hydraulique durant une simulation, la charge hydraulique est imposée par la valeur de la condition aux limites. Cela peut conduire à une entrée d'eau dans le modèle lorsque les nœuds voisins ont un potentiel plus bas, ou à une sortie du modèle lorsqu'il existe un gradient des nœuds voisins vers la condition aux limites.

Une charge hydraulique est imposée dans les cas où le potentiel hydraulique est déjà connu (lac, cours d'eau).

Des charges constantes égales à l'élévation des lacs ont été appliquées à tous les nœuds correspondant aux lacs.

Des charges constantes égales à l'élévation du sol ont été appliquées à tous les nœuds correspondant 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.

4.2.2 CONDITIONS LIMITES INTERNES

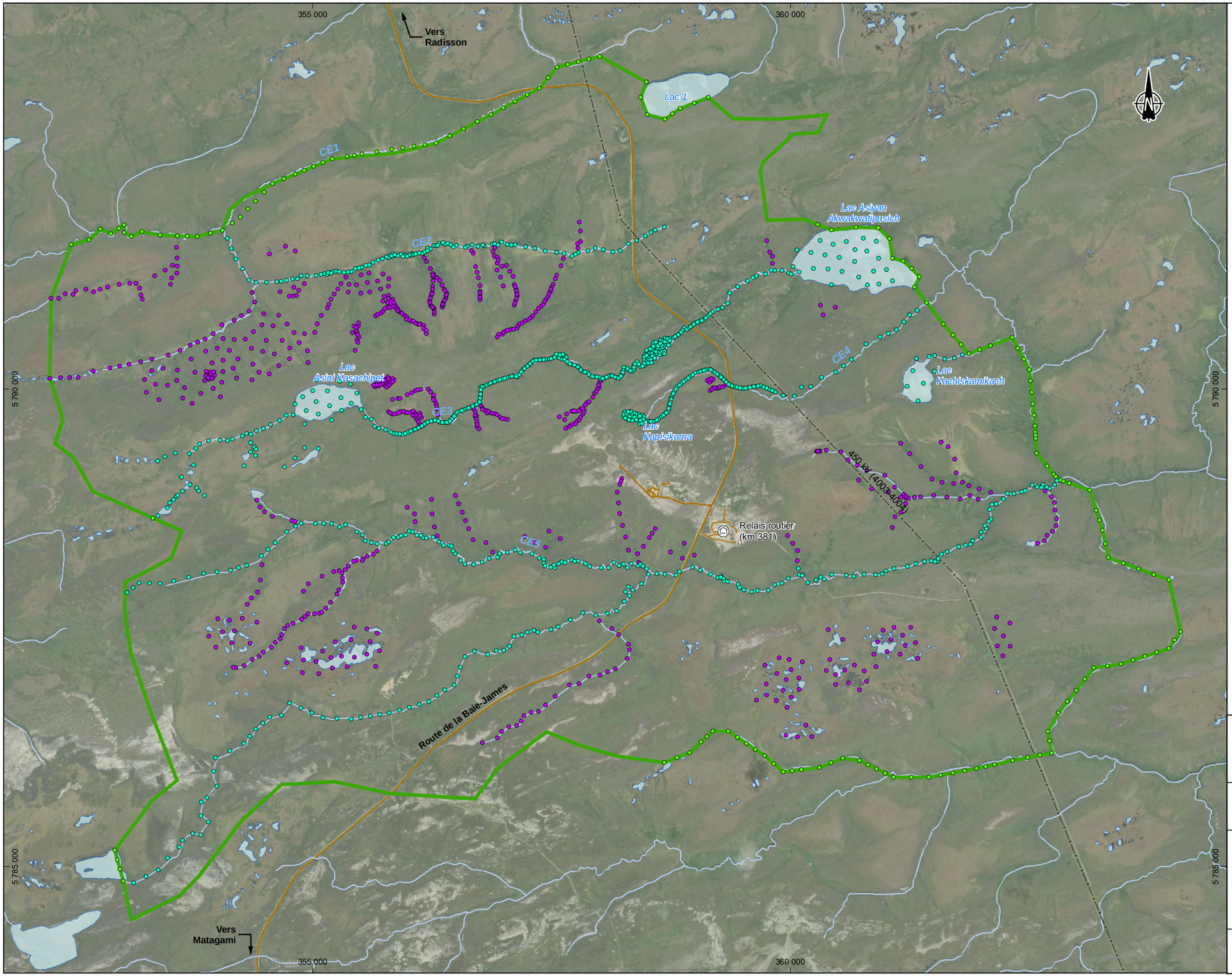
TYPE CHARGE CONSTANTE

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'élévations des lacs sont présentées à la section 4.2.1.

Des charges constantes ont également été attribuées aux cours d'eau de surface principaux permanents.

TYPE DRAIN

Des charges constantes de type drain ont été utilisées pour représenter les cours d'eau de surface secondaires à l'intérieur du domaine. Ces types de frontières permettent de simuler les sorties d'eau du système hydrogéologique. Les élévations des nœuds de type drain ont été estimées en se basant sur la topographie et correspondent à l'élévation de la couche nº 1.



Limite de la zone modélisée

Condition limite interne – charges imposées

Condition limite externe – charges-imposées

Condition limite interne – type drain

Maillage

Infrastructures

Route principale

Route d'accès

Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 *Numéro de cours d'eau*

Cours d'eau permanent

Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 8
Condition limite de la couche supérieure

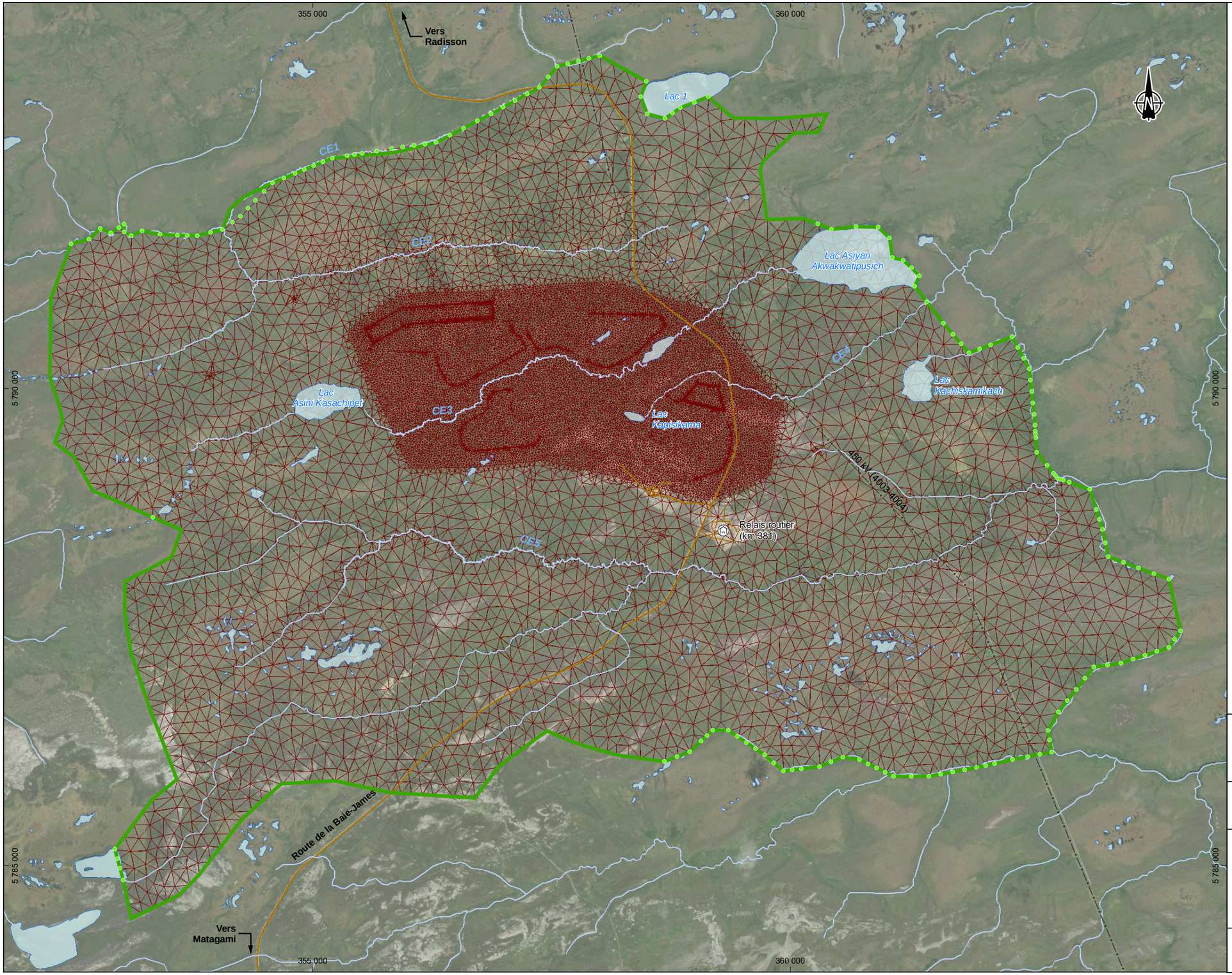
Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 400 800 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc8_wspT347_cond_sup_210715.mxd

wsp



Limite de la zone modélisée

Condition limite externe – charges-imposées

Maillage

Infrastructures

Route principale

Route d'accès

Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 *Numéro de cours d'eau*

Cours d'eau permanent

Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 9
Condition limite des couches inférieures

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 400 800 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc9_wspT348_cond_inf_210715.mxd

wsp

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 adéquate des niveaux d'eau souterraine observés et des débits faisant résurgence dans les voies d'eau réceptrices du site. Pour les fins de construction du modèle, même si une fluctuation naturelle de l'élévation 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 a été réalisée en présumant que les élévations piézométriques mesurées en mai 2018 pour les puits réalisés par WSP et en janvier 2021 pour les puits réalisés par SNC-Lavalin sont représentatives du niveau statique et que les débits d'étiage des voies d'eau, estimés à partir de l'analyse hydrologique de cours d'eau de la région (WSP, 2018a), sont représentatifs du débit de base des voies d'eau du site.

Les débits ont été mesurés dans les cours d'eau CE2, CE3, CE4 et CE5 situés à proximité des futures infrastructures. Cependant, les débits d'étiage restent des valeurs estimées. Ces résultats sont donc des ordres de grandeur et doivent être considérés avec prudence et discernement. Ces valeurs estimées peuvent tout de même servir de référence pour la calibration du modèle, afin de s'assurer que les débits de base simulés respectent minimalement les ordres de grandeur obtenus pour les débits d'étiage.

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

5.2 MÉTHODOLOGIE DE CALIBRATION

La calibration du modèle a été effectuée en utilisant une approche itérative où les paramètres d'entrée étaient modifiés manuellement et où les statistiques de calibration étaient évaluées et optimisées. La conductivité hydraulique et les valeurs de recharge furent les principaux paramètres du modèle ajustés pendant le processus de calibration.

Une comparaison des élévations simulées de l'eau souterraine avec les élévations mesurées disponibles a été effectuée. Les débits estimés de certaines voies d'eau ont également été utilisés afin de vérifier l'ajustement du modèle. L'évaluation des statistiques de calibration de la piézométrie et des débits de résurgence 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 résidus sont calculés comme la différence entre les élévations simulées et observées de l'eau souterraine. Les valeurs cibles communément visées pour le NRSM sont inférieures ou égales à 10 %.

5.3 RÉSULTATS DE LA CALIBRATION

5.3.1 CHARGES HYDRAULIQUES

La valeur d'élévation piézométrique mesurée à chaque puits a été comparée avec la valeur de charge hydraulique calculée au centre de la crépine d'un puits fictif situé à la même position, dans le modèle numérique. Le tableau 11 présente les valeurs de charges hydrauliques observées et simulées pour chacun des 48 puits utilisés pour la calibration.

Tableau 11 Calibration des charges hydrauliques

Sondage	Unité crépinée	Élévation du centre de la crépine (m)	Élévation piézométrique observée (m)	Élévation piézométrique simulée (m)	Différence (m)
WSP-PW01	Roc	218,79	224,89	224,19	-0,70
WSP-PW03	Roc	131,76	213,04	213,06	0,02
WSP-MW1R	Roc	200,62	205,11	205,13	0,02
WSP-MW3R	Roc	199,48	209,31	208,85	-0,46
WSP-MW4R	Roc	210,32	216,02	215,53	-0,49
WSP-MW5R	Roc	204,72	212,99	212,14	-0,85
WSP-MW6R	Roc	220,62	224,84	225,38	0,54
WSP-MW7R	Roc	201,21	207,29	206,82	-0,47
WSP-MW8R	Roc	192,62	202,75	202,80	0,05
WSP-MW9R	Roc	187,20	205,60	205,04	-0,56
WSP-MW2S	Dépôts surface	204,15	206,98	207,60	0,62
WSP-MW3S	Dépôts surface	206,90	209,50	209,07	-0,43
WSP-MW4S	Dépôts surface	213,51	216,07	215,57	-0,50
WSP-MW5S	Dépôts surface	212,32	213,09	212,09	-1,00
WSP-MW8S	Dépôts surface	200,41	202,78	202,80	0,02
WSP-MW9S	Dépôts surface	202,28	205,26	204,39	-0,87
PO-1	Dépôts surface	215,89	216,17	217,39	1,22
PO-2	Dépôts surface	214,01	214,69	214,51	-0,18
BH-1	Dépôts surface	214,37	215,07	215,84	0,77
BH-10A	Roc	189,24	200,23	200,34	0,11
BH-10B	Dépôts de surface	193,11	199,64	200,35	0,71
BH-14	Dépôts surface	198,34	211,93	210,58	-1,35
BH-15	Roc	194,14	202,03	202,65	0,62
BH-18	Dépôts surface	198,98	203,72	203,42	-0,30
BH-23	Dépôts surface	200,17	208,99	207,73	-1,26
BH-27	Dépôts surface	198,08	204,62	204,83	0,21
BH-29	Dépôts surface	196,34	206,68	206,52	-0,16
BH-3B	Dépôts surface	197,66	201,66	202,35	0,69
BH-3A	Dépôts surface	194,35	201,70	202,38	0,68
BH-31	Dépôts surface	200,77	207,91	208,05	0,14
BH21N03	Dépôts surface	200,86	209,15	210,78	1,63
BH21O05	Dépôts surface	200,10	207,23	207,23	0,01
BH21O06	Dépôts surface	213,75	211,85	211,55	-0,30
BH21P04	Roc	205,66	208,85	207,98	-0,87
BH21R01	Roc	200,16	206,41	207,19	0,79
BH21W03	Dépôts surface	196,33	202,81	202,78	-0,03

Tableau 11 (suite) **Calibration des charges hydrauliques**

Sondage	Unité crépinée	Élévation du centre de la crépine (m)	Élévation piézométrique observée (m)	Élévation piézométrique simulée (m)	Différence (m)
BH21W04	Dépôts surface	193,81	201,01	202,24	1,23
BH21W06		198,98	205,49	206,65	1,16
BH21SW03		206,80	209,99	211,14	1,15
BH20-P-06		212,05	213,31	213,28	-0,03
BH20-P-07		198,43	211,74	211,69	-0,05
BH-36		202,10	208,17	207,71	-0,46
BH-37		203,78	208,58	207,77	-0,81
BH-41		202,46	207,18	207,58	0,40
BH-45		205,96	208,94	207,62	-1,32
BH-47		200,39	210,09	211,33	1,24
BH-49		195,11	206,90	206,77	-0,13
BH-50		204,09	206,93	207,15	0,22

Les statistiques de calibration présentées au tableau 12 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.

Tableau 12 **Statistiques de calibration (charges hydrauliques)**

Mesure statistique	Unité	Résultat du modèle calibré
Nombre de points d'observation		48
Résidu maximum	m	1.63
Résidu minimum	m	-1,35
Somme des résidus	m	0,69
Somme des résidus absolus	m	27,81
Moyenne absolue des résidus	m	0,58
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMS)	m	0,73
Racine de l'erreur quadratique moyenne à l'échelle (normalized RMS)	%	2,87

Tous les points se situent à l'intérieur des objectifs de calibration. Le puits BH21NO3 présente la plus grande différence, avec une valeur de 1,6 m. La carte 10 présente la carte piézométrique obtenue avec le modèle calibré en régime permanent. Les figures 2 et 3 permettent de voir en coupe la distribution des charges ainsi que le niveau d'eau sur le site.

Dans l'ensemble, le régime d'écoulement suit la topographie du site. Le secteur de la future fosse se situe sur un haut piézométrique avec une élévation piézométrique maximale de 242 m. L'eau souterraine de ce haut piézométrique s'écoule majoritairement vers le cours d'eau CE3 au nord et vers le cours d'eau CE5 au sud. La faible perméabilité de la pegmatite et de l'argile favorise un rehaussement du niveau d'eau généralisé.

5.3.2 DÉBITS DE BASE DES COURS D'EAU

À partir des conditions limites du modèle (lac, cours d'eau), il est possible de calculer les débits de base des voies d'eau circulant dans les aires d'accumulation. Ces débits correspondent aux flux souterrains faisant résurgence dans ces voies d'eau. Les débits de base sont obtenus en sélectionnant l'ensemble des nœuds de type drain constituant le cours d'eau ou le fossé, et en faisant la sommation des débits sortant à chacun des nœuds de l'élément de drainage.

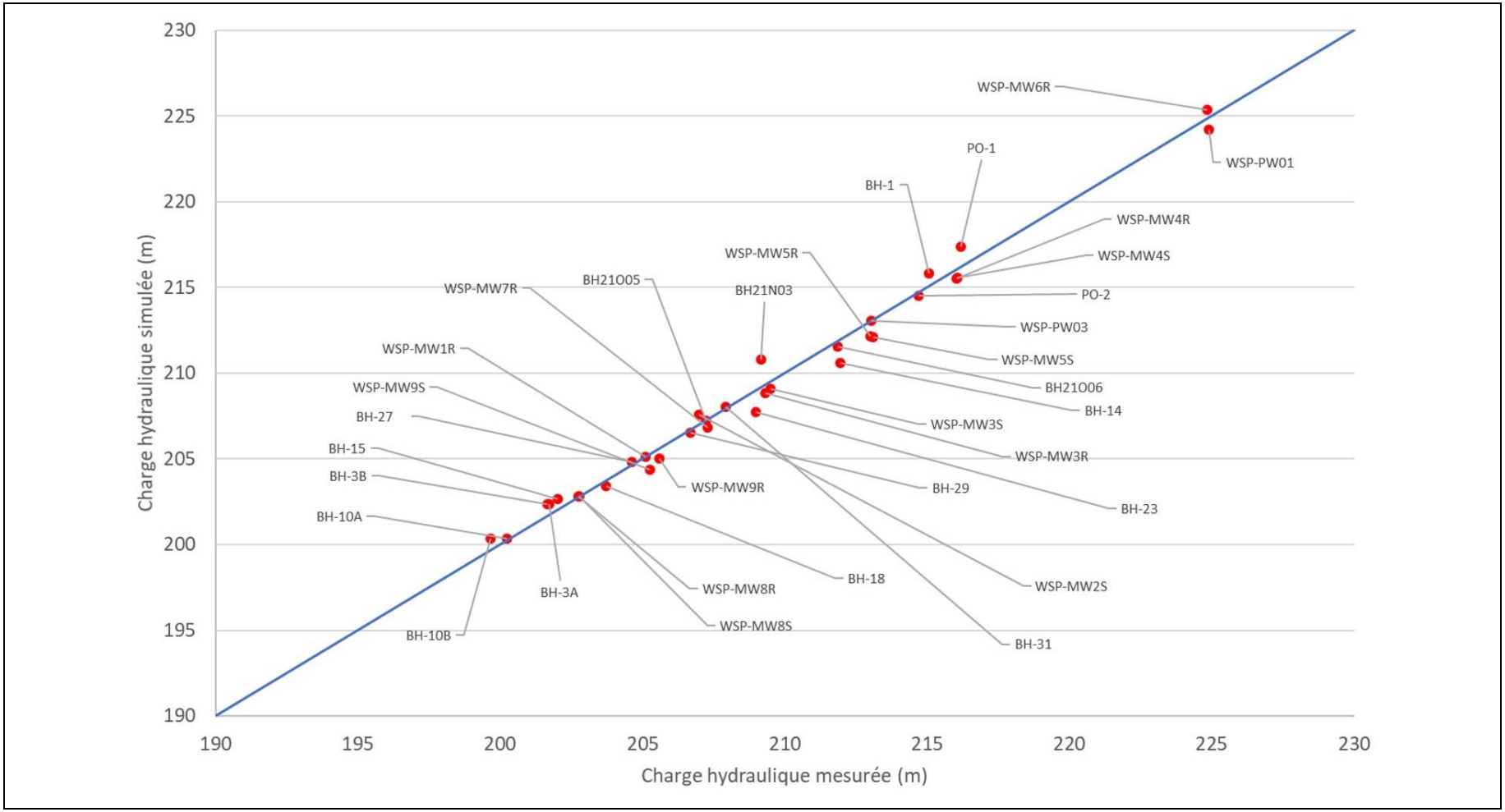
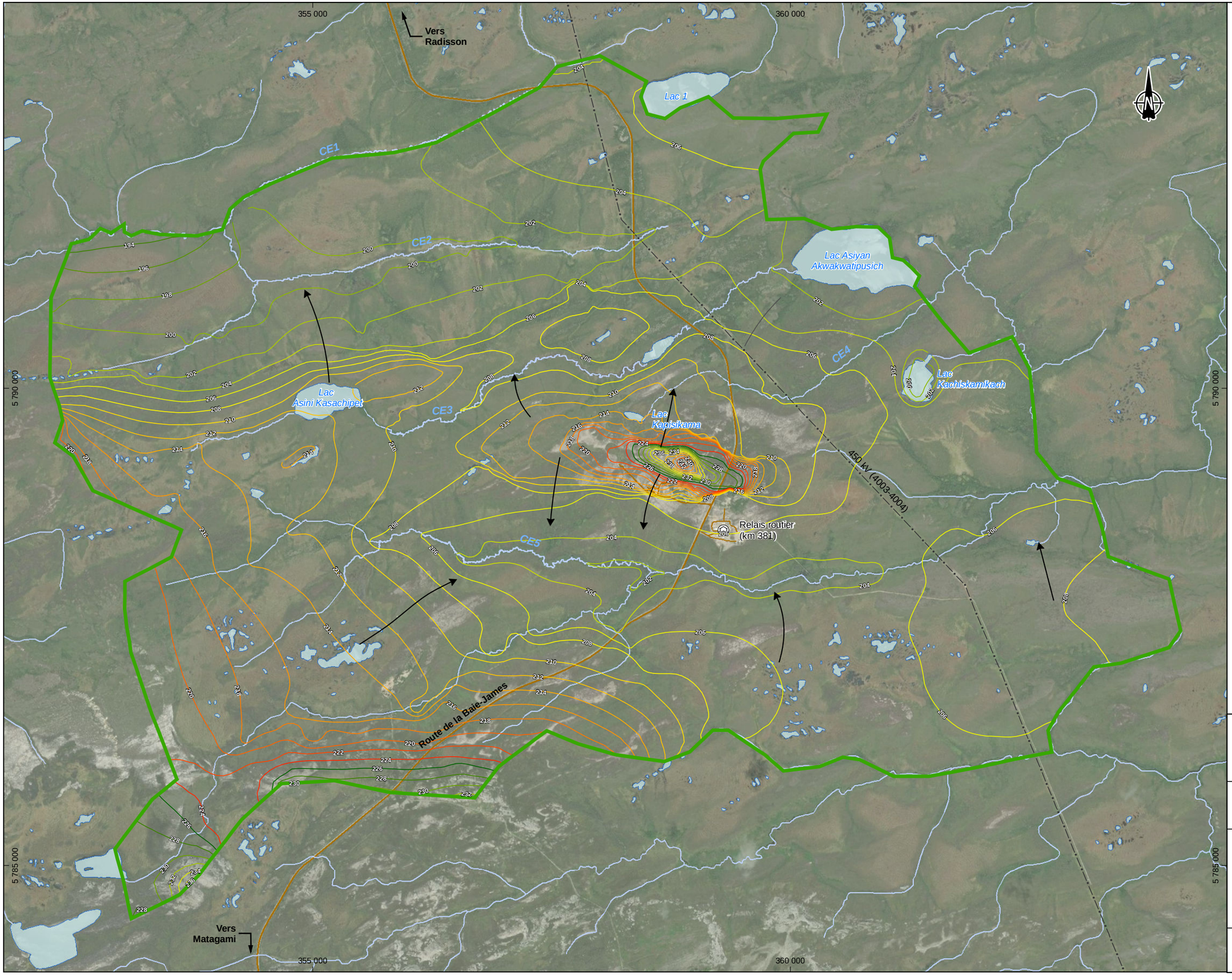


Figure 1 Calibration des charges hydrauliques



Limite de la zone modélisée

Courbe piézométrique

192
194
196
198
200
202
204
206
208
210
212
214
216
218
220
222
224
226
228
230
232
234
236
238
240
242
244

Sens d'écoulement de l'eau

Infrastructures

Route principale
Route d'accès
Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 *Numéro de cours d'eau*
Cours d'eau permanent
Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 10
Carte piézométrique modèle calibré

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 400 800 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc10_wspT349_calibre_210715.mxd

wsp

Les débits obtenus à la suite de la calibration du modèle ont été comparés aux débits d'étiage estimés lors de l'étude hydrologique réalisée par WSP (WSP, 2018 a). L'objectif étant d'obtenir un débit dans l'intervalle du débit d'étiage estival et du débit d'étiage annuel. Les résultats sont présentés au tableau 13.

Les résultats de simulation confirment que les cours d'eau et lacs du site sont majoritairement des zones de décharge d'eau souterraine.

Tableau 13 Comparaison des débits de base estimés et simulés

Station	Débit, Q10.7 estival (m^3/j)	Débit, Q10.7 annuel (m^3/j)	Débit de base simulé (m^3/j)
CE2	- 1382	- 605	-1034
CE3	- 864	- 432	-818
CE4	- 173	- 86	-50.8
CE5	- 2938	- 1296	-2481

5.3.3 BILAN HYDRIQUE

Le tableau 14 présente le bilan hydrique pour le modèle calibré d'écoulement de l'eau souterraine en régime permanent. L'écart indiqué au tableau 14 indique que le bilan de masse est équilibré dans le modèle calibré. L'erreur de 0,4 % du bilan hydrique indique que le modèle est stable.

Tableau 14 Bilan hydrique du modèle calibré

Flux entrant (m^3/j)		Flux sortant (m^3/j)	
Charge constante	5674	Charge constante	11 022
Recharge	5283	Emmagasinement	238
Emmagasinement	252		
FLUX ENTRANT TOTAL	**11 209**	**FLUX SORTANT TOTAL**	**11 260**
		Flux sortant – Flux entrant	50
			0,4 %

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 présentées à la section 4.5. Les valeurs de conductivité hydraulique ont été ajustées durant la calibration du modèle. Les forages d'exploration réalisés sur la zone d'étude ont montré que l'unité de pegmatite de la zone d'étude ne suit pas exactement la géologie définie sur la carte SIGEOM (carte 5) mais s'oriente plus dans la direction ouest-nord-ouest/ est-sud-est, soit dans l'axe de la future fosse. La carte 11 présente la répartition des conductivités hydrauliques du roc pour le modèle calibré. Seules trois zones de conductivités hydrauliques, correspondant au paragneiss (4.1), à la pegmatite (4.2) et au basalte (4.3), ont été considérées.

Ces zones, déterminées à partir de la géologie du site, ont été ajustées lors de la calibration afin d'obtenir des charges hydrauliques proches de celles mesurées. La zone moins perméable (correspondant à l'origine à la pegmatite) a été légèrement agrandie vers le sud et vers l'ouest, afin de mieux calibrer les niveaux dans WSP-MW5R, WSP-MW5S et BH-14. La zone de perméabilité moyenne (correspondant à l'origine au basalte) a quant à elle été prolongée vers le nord et l'ouest de manière à mieux calibrer les forages situés au niveau du futur site industriel. Le dyke de diabase n'a pas été considéré. La perméabilité au niveau du conglomérat n'ayant pas été caractérisée celle-ci a été associée à celle du paragneiss. Une anisotropie verticale de 1 : 10 a été appliquée aux unités de roc. Les unités de roc ont également été subdivisées dépendamment des profondeurs afin de représenter la diminution de la conductivité hydraulique en profondeur. Les intervalles de profondeur des différentes unités ont été déterminés lors de la calibration. Pour l'ensemble des unités, les valeurs de conductivités hydrauliques calibrées se situent dans l'intervalle des conductivités hydrauliques mesurées. Le tableau 15 présente la distribution des valeurs de conductivités hydrauliques calibrées pour les unités définies.

5.4.2 POROSITÉ ET EMMAGASINEMENT SPÉCIFIQUE

Des valeurs typiques de porosité et d'emmagasinement spécifique ont été utilisées pour la modélisation. Les valeurs utilisées sont présentées au tableau 15 et sont issues des tableaux 9 et 10 présentés à la section 3.5.

Tableau 15 Conductivités hydrauliques, porosité totale et emmagasinement spécifique calibrés et mesurés des différentes unités hydrostratigraphiques

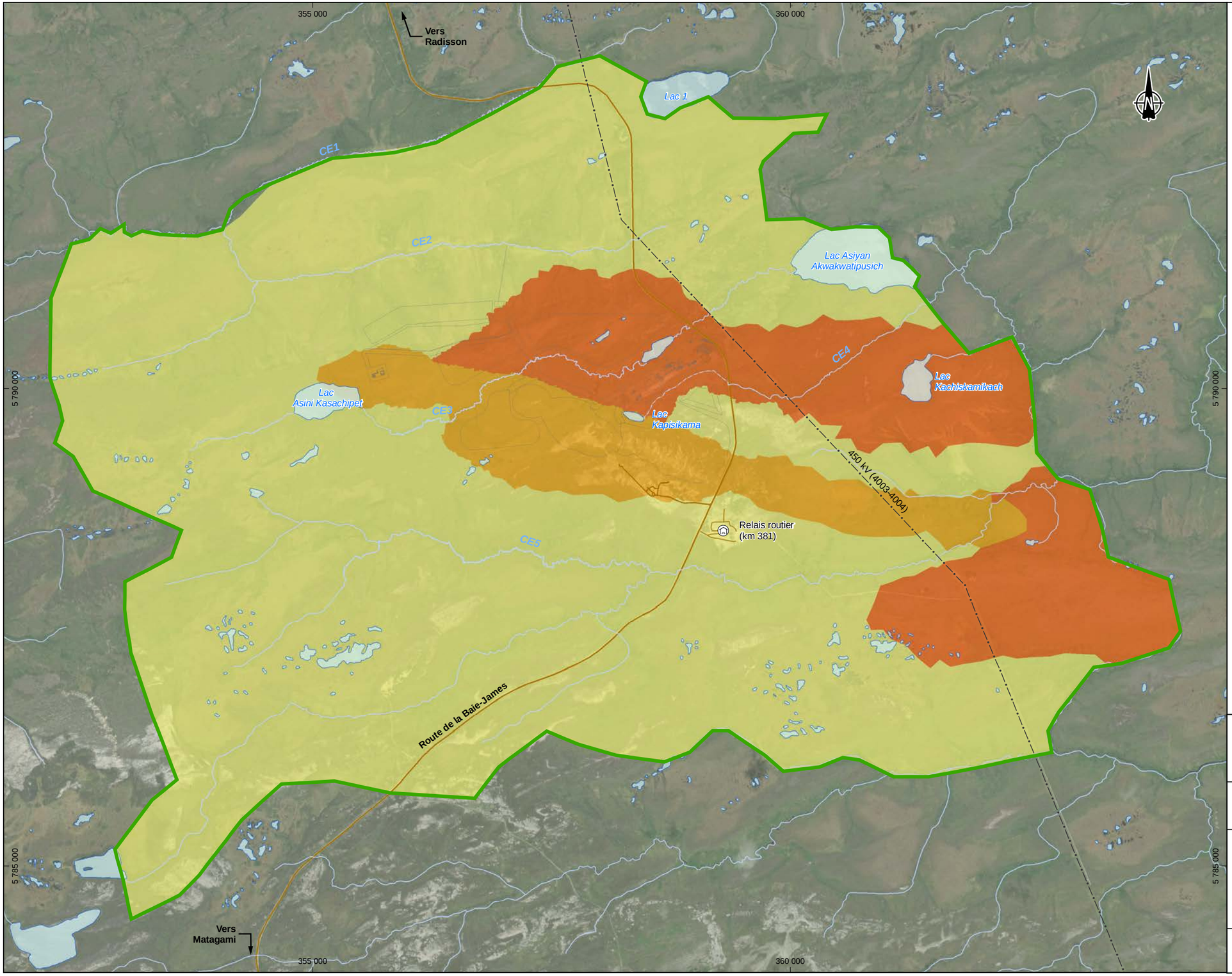
Unité lithostratigraphique	Profondeur	Conductivité hydraulique (m/s)				Porosité totale (%)	Emmagasinement spécifique (m^{-1})
		Calibrée	Minimum	Maximum	Moyenne		
Unité 1 : Tourbe	-	$5{,}00 \times 10^{-5}$	-	-	-	0,7	$8{,}00 \times 10^{-5}$
Unité 2 : Dépôts argileux	-	$8{,}00 \times 10^{-8}$	$3{,}56 \times 10^{-12}$	$1{,}28 \times 10^{-8}$	$7{,}45 \times 10^{-10}$	0,5	$7{,}00 \times 10^{-4}$
Unité 3 : Dépôts sableux (Till)	-	$2{,}00 \times 10^{-6}$	$4{,}29 \times 10^{-9}$	$1{,}05 \times 10^{-3}$	$4{,}90 \times 10^{-6}$	0,15	$7{,}00 \times 10^{-6}$
Unité 4.1 : Roc (paragneiss)	Top à 40 m	$9{,}60 \times 10^{-6}$	$1{,}76 \times 10^{-7}$	$2{,}27 \times 10^{-4}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$	0,05	$6{,}40 \times 10^{-6}$
	40 m à 100 m	$6{,}00 \times 10^{-7}$				0,01	$6{,}40 \times 10^{-6}$
	Supérieure à 100 m	$5{,}00 \times 10^{-8}$				0,01	$3{,}05 \times 10^{-7}$
Unité 4.2 : Roc (pegmatite à spodumène et paragneiss)	Top à 125 m	$2{,}00 \times 10^{-8}$	$7{,}77 \times 10^{-9}$	$6{,}07 \times 10^{-7}$	$9{,}4 \times 10^{-8}$	0,01	$3{,}05 \times 10^{-7}$
	Supérieure à 125 m	$1{,}00 \times 10^{-9}$				0,01	$3{,}05 \times 10^{-7}$
Unité 4.3 : Roc (basalte amphibolitisé, amphibolite et paragneiss)	Top à 200 m	$2{,}00 \times 10^{-7}$	$2{,}72 \times 10^{-8}$	$4{,}70 \times 10^{-5}$	$2{,}85 \times 10^{-6}$	0,05	$3{,}05 \times 10^{-7}$
	Supérieure à 200 m	$5{,}00 \times 10^{-8}$				0,01	$3{,}05 \times 10^{-7}$

5.4.3 RECHARGE

La recharge a été ajustée durant la calibration du modèle afin de développer une reproduction adéquate des niveaux d'eau souterraine observés et des débits de base. La carte 12 présente la recharge du modèle calibré. Les zones de recharge ont été simplifiées de manière à tenir compte de la position topographique au lieu de l'inclinaison des pentes. Les zones de résurgence se situent au niveau des cours d'eau, des lacs et au pied des collines.

Dans les secteurs déjà saturés en eau ou dans les zones de résurgence, la recharge est plus faible puisque l'eau s'accumule sur place et/ou s'écoule en surface, alors que dans les secteurs où une frange non saturée existe, la capacité d'infiltration est plus élevée.

Les zones de recharge préférentielles se trouvent en sommet de colline (100 à 300 mm/an). Pour les zones de résurgence et d'exfiltration, une recharge plus faible a été appliquée (10 à 50 mm/an).



Limite de la zone modélisée

Conductivité

- Roc (paragneiss)
- Roc (pegmatite à spodumène et paragneiss)
- Roc (basalte amphibolitisé, amphibolite et paragneiss)

Infrastructures

- Infrastructures projetées
- Route principale
- Route d'accès
- Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

- *CE3* — *Numéro de cours d'eau*
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 11
Localisation des zones de conductivité hydraulique du modèle calibré

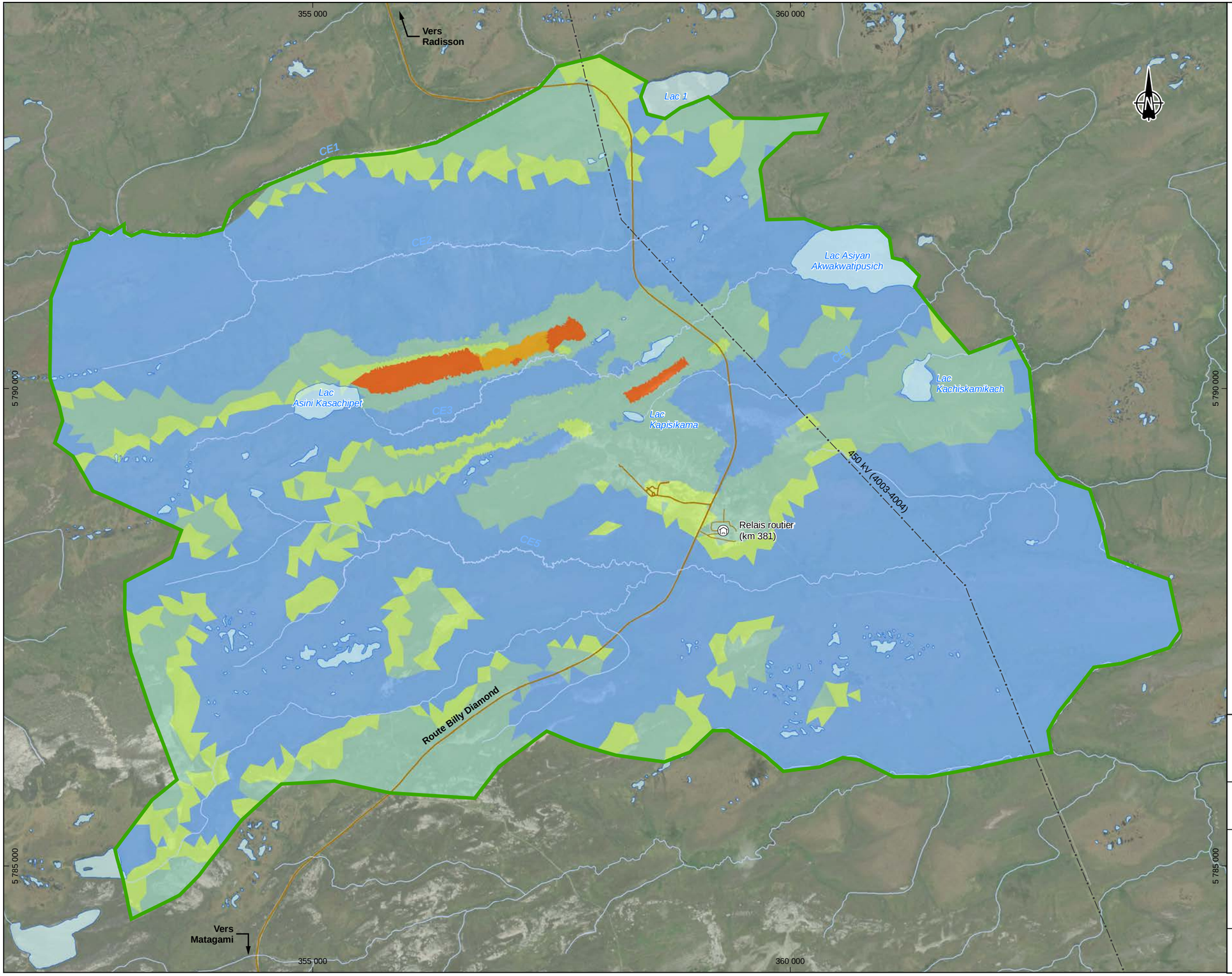
Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 400 800 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc11_wspT350_conduct_210715.mxd

wsp



Limite de la zone modélisée

Recharge (mm/an)

- 0-50
- 50-100
- 100-150
- 150-200
- 200-250

Infrastructures

- Route principale
- Route d'accès
- Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

- *CE3* — *Numéro de cours d'eau*
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 12
Recharge du modèle calibré

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 400 800 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc12_wspT351_recharge_210715.mxd

wsp

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 :** augmentation par deux de la conductivité hydraulique des dépôts de surface;
- **SS2 :** diminution par deux de la conductivité hydraulique des dépôts de surface;
- **SS3 :** augmentation par deux de la conductivité hydraulique du roc;
- **SS4 :** augmentation par cinq de la conductivité hydraulique du roc;
- **SS5 :** diminution par deux de la conductivité hydraulique du roc;
- **SS6 :** diminution par cinq de la conductivité hydraulique du roc;
- **SS7 :** augmentation par dix de la conductivité hydraulique de la pegmatite;
- **SS8 :** modification des zones de conductivité hydraulique en fonction de la carte géologique et de la géologie fournie par Galaxy (carte 5);
- **SS9 :** augmentation globale de la recharge de 30 %;
- **SS10 :** diminution globale de la recharge de 30 %.

Les résultats de l'analyse de sensibilité relatifs aux charges hydrauliques simulées sont présentés au tableau 16. Les NMRS sont également indiqués pour chacune des simulations effectuées afin de pouvoir juger de la qualité de la calibration.

Tableau 16 Différences entre les charges hydrauliques observées et simulées pour les scénarios testés

Puits	Élévation piézométrique observée (m)	Modèle calibré	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SS9	SS10
WSP-PW01	224,19	-0,70	2,28	5,14	-0,54	-1,71	1,43	6,02	-1,98	-4,48	1,47	1,18
WSP-PW03	213,06	0,02	0,73	1,94	-0,39	-0,51	0,86	2,19	-0,33	5,44	0,85	-0,56
WSP-MW1R	205,13	0,02	-0,10	0,25	-0,88	-1,44	1,33	3,24	0,04	-0,79	0,58	-0,58
WSP-MW3R	208,85	-0,46	-0,93	0,10	-1,74	-3,21	0,56	1,39	-0,43	-3,37	0,22	-1,24
WSP-MW4R	215,53	-0,49	-0,14	0,98	-1,02	-1,24	0,34	1,97	-0,87	-8,05	0,44	-1,88
WSP-MW5R	212,14	-0,85	-2,37	1,49	-1,55	-1,46	-0,14	0,39	-1,38	-5,99	0,17	-2,12
WSP-MW6R	225,38	0,54	0,79	-0,16	-3,34	-4,64	2,98	8,33	-5,34	-3,94	1,06	-0,69
WSP-MW7R	206,82	-0,47	-1,05	0,21	-0,41	0,26	-0,26	0,04	-0,41	-0,66	-0,18	-0,83
WSP-MW8R	202,80	0,05	-0,30	0,42	-0,38	-0,63	0,53	0,99	0,12	0,98	0,35	-0,37
WSP-MW9R	205,04	-0,56	-1,46	0,18	-0,75	-0,23	-0,09	0,46	-0,62	-0,74	-0,16	-1,29
WSP-MW2S	207,60	0,62	0,51	0,86	0,57	0,37	0,65	0,63	0,66	0,61	0,71	0,53
WSP-MW3S	209,07	-0,43	-0,92	0,18	-1,78	-3,32	0,66	1,58	-0,39	-3,37	0,31	-1,26
WSP-MW4S	215,57	-0,50	-0,24	0,81	-1,04	-1,31	0,33	1,95	-0,91	-7,49	0,42	-1,94
WSP-MW5S	212,09	-1,00	-2,49	1,34	-1,69	-1,54	-0,28	0,25	-1,35	2,57	0,01	-2,27
WSP-MW8S	202,80	0,02	-0,33	0,40	-0,40	-0,65	0,50	0,98	0,09	0,94	0,32	-0,39
WSP-MW9S	204,39	-0,87	-1,77	-0,14	-1,05	-0,52	-0,42	0,14	-0,93	-1,04	-0,49	-1,58
PO-1	217,39	1,22	-6,61	4,84	1,20	-0,37	3,77	13,15	-14,67	5,93	2,97	3,33
PO-2	214,51	-0,18	-3,39	2,01	-0,35	-4,19	2,16	4,83	-8,39	10,51	1,20	5,91
BH-1	215,84	0,77	-0,51	3,30	15,82	-2,57	3,21	10,91	-10,17	9,53	2,28	8,43
BH-10A	200,34	0,11	-0,06	0,34	0,24	0,55	0,05	0,00	0,12	0,21	0,14	0,07
BH-10B	200,35	0,71	0,53	0,93	0,83	1,14	0,65	0,60	0,72	0,81	0,74	0,66
BH-14	210,58	-1,35	-1,84	-0,63	-1,25	-1,46	-1,51	-1,28	-1,39	-3,58	-1,24	-1,56
BH-15	202,65	0,62	0,45	0,74	0,21	0,01	0,93	0,96	0,65	1,89	0,79	0,30
BH-18	203,42	-0,30	-0,43	-0,16	-1,22	-1,84	0,83	1,87	-0,14	1,27	0,14	-0,88

Tableau 16 (suite) Différences entre les charges hydrauliques observées et simulées pour les scénarios testés

Puits	Élévation piézométrique observée (m)	Modèle calibré	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SS9	SS10
BH-23	207,73	-1,26	-1,68	-0,82	-2,92	-4,76	-0,32	0,22	-1,21	-3,31	-0,68	-2,23
BH-27	204,83	0,21	0,09	0,46	-0,46	-1,16	0,39	0,55	0,22	-0,42	0,39	-0,20
BH-29	206,52	-0,16	-0,65	0,31	-1,27	-2,22	0,83	1,86	-0,14	-2,02	0,44	-0,95
BH-3B	202,35	0,69	0,56	0,87	0,85	1,18	0,57	0,47	0,69	0,69	0,69	0,68
BH-3A	202,38	0,68	0,55	0,88	0,87	1,23	0,55	0,44	0,68	0,68	0,69	0,68
BH-31	208,05	0,14	-0,10	0,57	-0,45	-1,42	0,57	0,95	0,17	-1,57	0,50	-0,21
BH21N03	210,78	1,63	1,60	1,86	1,17	0,26	1,94	2,09	1,65	1,65	1,88	1,58
BH21O05	207,23	0,01	-0,42	0,46	-0,96	-2,43	0,40	0,65	0,04	-1,54	0,37	-0,57
BH21O06	211,55	-0,30	-0,56	0,43	-2,33	30,59	1,78	3,52	-0,25	-2,24	0,71	-1,60
BH21P04	207,98	-0,87	-0,88	-0,77	-1,67	-2,61	-0,17	0,32	-0,85	-2,49	-0,53	-1,24
BH21R01	207,19	0,79	0,67	0,94	0,59	0,16	0,88	0,93	0,80	0,32	0,89	0,64
BH21W03	202,78	-0,03	-0,28	0,24	-0,64	-1,06	0,64	1,11	0,09	0,98	0,30	-0,49
BH21W04	202,24	1,23	1,03	1,42	1,02	0,95	1,35	1,22	1,27	2,14	1,36	1,02
BH21W06	206,65	1,16	0,90	0,82	1,47	1,18	0,81	0,90	1,10	-0,59	0,73	1,36
BH21SW03	211,14	1,15	2,21	1,64	1,05	0,98	1,23	1,26	0,69	8,30	1,42	0,53
BH20-P-06	213,28	-0,03	-0,49	0,48	-0,87	-1,89	0,71	1,31	-0,01	-0,13	0,50	-0,60
BH20-P-07	211,69	-0,05	-0,55	0,50	-0,95	-2,10	0,68	1,26	0,01	-0,07	0,53	-0,63
BH-36	207,71	-0,46	-0,55	-0,25	-1,60	-2,92	0,60	1,50	-0,44	-2,90	0,09	-1,00
BH-37	207,77	-0,81	-0,82	-0,77	-0,93	-1,46	-0,74	-0,68	-0,80	-0,96	-0,76	-0,85
BH-41	207,58	0,40	0,21	0,67	0,27	-0,01	0,48	0,66	0,42	0,13	0,54	0,26
BH-45	207,62	-1,32	-1,55	-1,11	-1,99	-2,67	-0,65	0,01	-1,30	-2,68	-0,95	-1,74
BH-47	211,33	1,24	1,32	1,42	0,53	-0,47	1,89	2,54	1,26	1,24	1,59	1,15
BH-49	206,77	-0,13	-1,03	0,53	-0,89	-0,71	1,17	3,47	-0,20	-0,55	0,49	-1,25
BH-50	207,15	0,22	0,17	0,31	0,13	-0,09	0,26	0,27	0,22	-0,05	0,27	0,15
NRMS		2,87	5,94	5,61	10,25	18,97	4,81	12,92	12,08	11,98	3,66	7,56

Les résultats de l'analyse de sensibilité relatifs aux débits simulés sont présentés au tableau 17.

Tableau 17 Comparaison des débits estimés aux débits simulés pour les différents scénarios testés

Site de mesure	Débit d'étiage (Q 10,7 estival) (m^3/j)	Débit d'étiage (Q 10,7 annuel) (m^3/j)	Débit (m3/j)										
			Modèle calibré	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SS9	SS10
CE2	-1 382	-605	-1034	-1143	-911	-1389	-2166	-800	-625	-1050	-1438	-1155	-895
CE3	-864	-432	-818	-767	-885	-328	569	-1149	-1391	-790	-403	-981	-644
CE4	-173	-86	-50.8	-41	-113	66	318	-146	-243	-60	-420	-97	-29
CE5	-2 938	-1 296	-2481	-2501	-2264	-3430	-5463	-1870	-1640	-2462	-2444	-2810	-2097

Le modèle est sensible à la variation de conductivité des unités de roc (SS1à SS7). L'augmentation de la conductivité hydraulique pour l'ensemble des unités de roc (SS3, SS4 et SS6) favorise un écoulement plus important et donc un abaissement des charges plus important. En effet, pour 35 (SS3 et SS4) des 48 puits d'observations, les valeurs modélisées sont inférieures à celles observées. En matière de débits simulés, cela se traduit par une diminution du débit de base pour les cours d'eau se trouvant en majorité sur l'unité de dépôts sableux (CE3 et CE4) et une augmentation du débit de base pour les cours d'eau se trouvant majoritairement sur l'unité argileuse (CE2 et CE5). L'augmentation de la conductivité d'un ordre de grandeur de l'unité 4.2 favorise l'écoulement et entraine une diminution des charges dans les puits situés dans cette zone (WSP-PW01, WSP-PW03, WSP-MW4R, WSP-MW4S, WSP-MW6R) parfois de manière significative en comparaison au modèle calibré. La modification de la distribution des zones de conductivité hydraulique du roc (SS8), réduisant la surface de l'unité 4.2 et augmentant celle de l'unité 4.1, entraine une diminution des charges hydrauliques dans l'ensemble des puits impactés. Pour les débits de base simulés, les débits obtenus sont similaires à ceux obtenus pour le modèle calibré.

Le modèle est sensible à la variation de la recharge (SS5 et SS6). D'une manière générale, l'augmentation (SS5) de la recharge de 30 % favorise des charges hydrauliques et des débits plus élevés alors qu'une diminution de 30 % (SS6) favorise des charges hydrauliques et des débits plus faibles.

6 SIMULATIONS PRÉDICTIVES

6.1 MODIFICATION DU MODÈLE POUR LES OPÉRATIONS (ANNÉES 0-19)

À la suite de la calibration, le modèle a été ajusté afin de pouvoir simuler les différents changements pendant les opérations et après les opérations. Les simulations numériques ont été complétées en régime transitoire pour représenter l'évolution des différentes infrastructures sur le site pendant les opérations (année 0 à année 19). La fosse est divisée en trois zones d'excavation (de JB-1 à JB-3). La zone la plus profonde de la fosse se trouve à l'élévation -40 masl (JB-2). À partir de l'année 12, la fosse JB-3 commence à être remplie avec des stériles miniers. Quatre haldes de codéposition seront implantées sur le site. Les figures 2 et 3 présentent des vues en coupe de la fosse et des infrastructures à la fin des opérations.

6.1.1 ÉLÉVATION

Les éléments représentant les infrastructures sont activés ou désactivés selon l'évolution des opérations.

Ainsi, pour la fosse, les éléments sont désactivés au fur et à mesure de l'approfondissement de celle-ci.

Dans la partie JB-3 de la fosse, le remplissage avec des stériles commence à partir de l'année 12. Les propriétés hydrauliques des éléments ont donc été modifiées afin de représenter les stériles (voir section suivante) comme un milieu, et les éléments sont réactivés au fur et à mesure du remplissage.

Pour les haldes à stériles et à résidus, la halde de mort terrain et les bassins de rétention, les éléments ont été activés pour suivre l'accumulation de matériel dans les haldes.

6.1.2 DISCRÉTISATION DES DIFFÉRENTES COUCHES DU MODÈLE

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

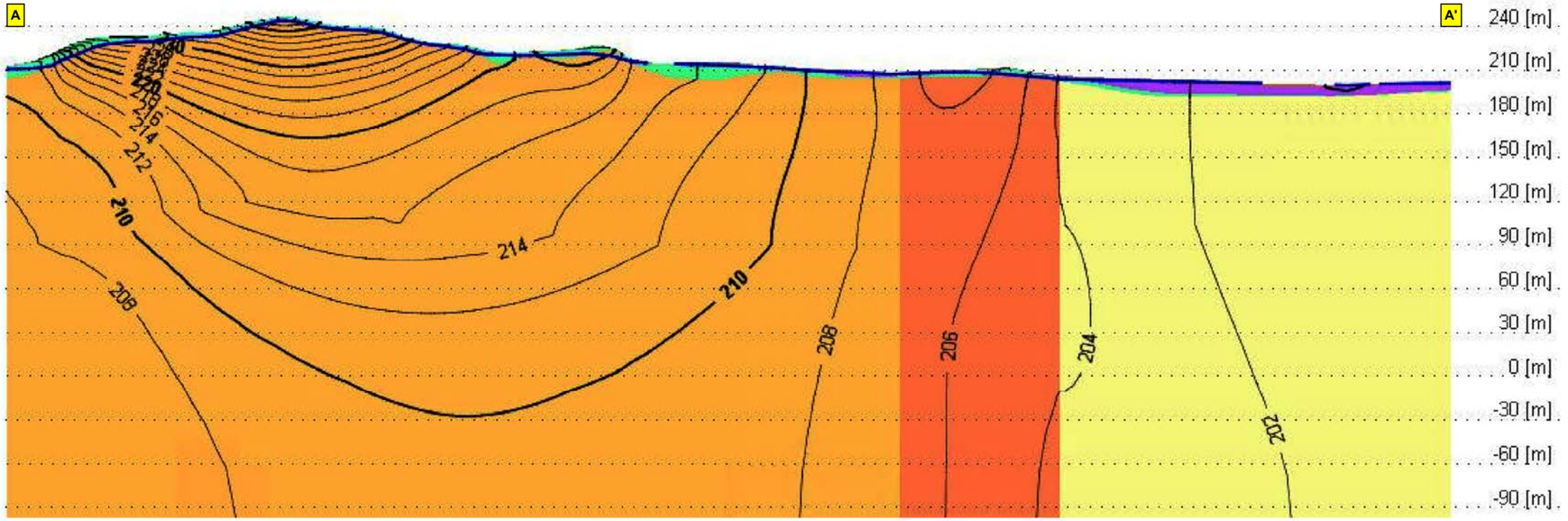
6.1.3 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES

Les propriétés hydrauliques du modèle hydrogéologique calibré restent inchangées. Pour les matériaux des infrastructures, les conductivités hydrauliques sont présentées au tableau 18. En l'absence d'informations pour les différents éléments de la digue, des conductivités hydrauliques typiques ont été utilisées. Afin de simplifier le modèle et en l'absence de design précis, les stériles et les résidus n'ont pas été différenciés et ont été représentés avec une conductivité hydraulique moyenne.

Tableau 18 Propriétés hydrauliques des matériaux composant les infrastructures

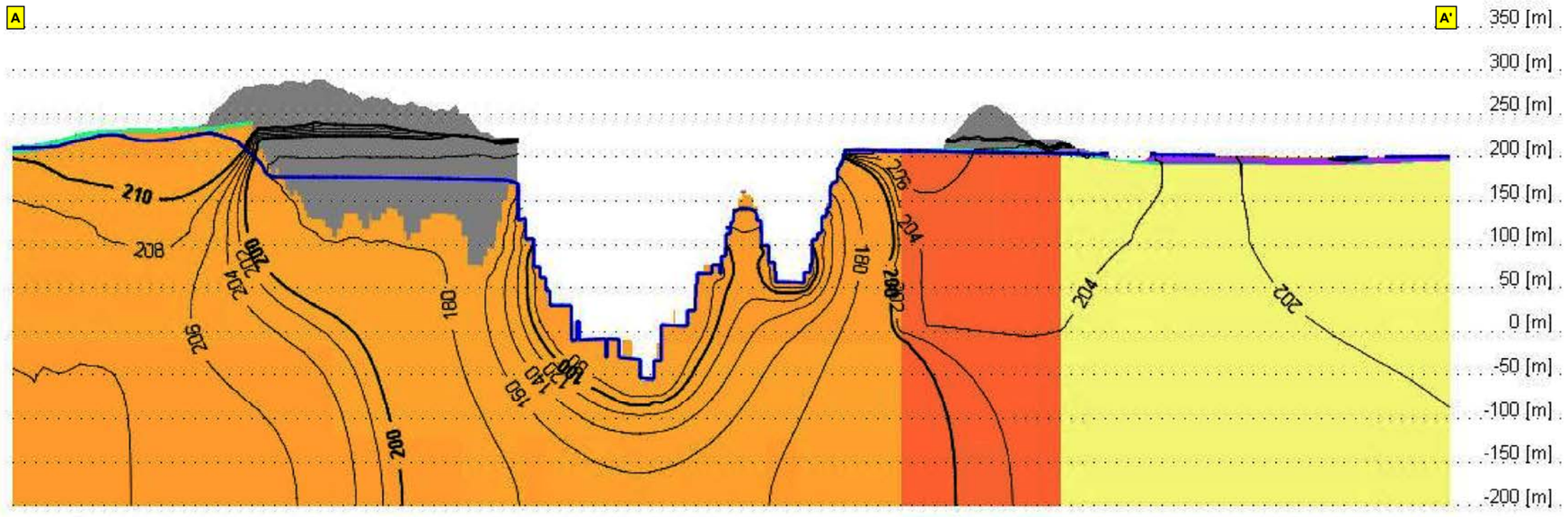
UNITÉ	CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE (M/S)
Résidus/Stériles	$1{,}5 \times 10^{-4}$
Couche drainante à la base des haldes	$1{,}0 \times 10^{-3}$
Matériaux de remblai granulaires (berme stabilisatrice et filtre de la digue)	$1{,}0 \times 10^{-4}$
Noyau des digues des bassins (argile excavée et compactée)	$5{,}0 \times 10^{-9}$

Modèle calibré



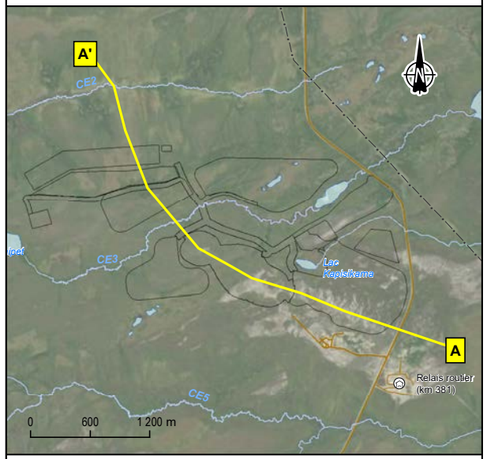
Exagération verticale 3x

Modèle calibré prédictif (20 ans)



Exagération verticale 3x

Niveau d'eau
Charge hydraulique (m)
Tourbe
Dépôts argileux
Dépôts sableux (till)
Paragneiss
Pegmatite à spodumène et paragneiss
Basalte amphibolitisé, amphibolite et paragneiss
Résidus et stériles miniers



Infrastructures minières

Infrastructures

Route principale
Route d'accès
Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 *Numéro de cours d'eau*
Cours d'eau permanent
Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Figure 2
Coupe 1

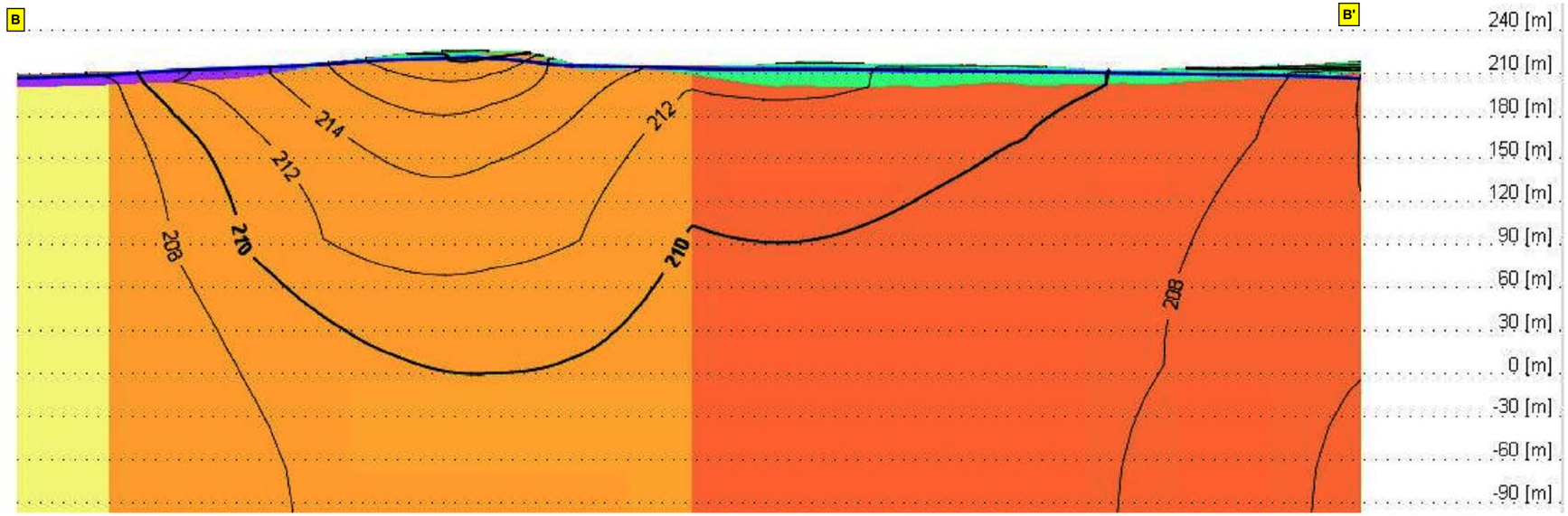
Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGf2_wspT358_coupe1_210715.mxd

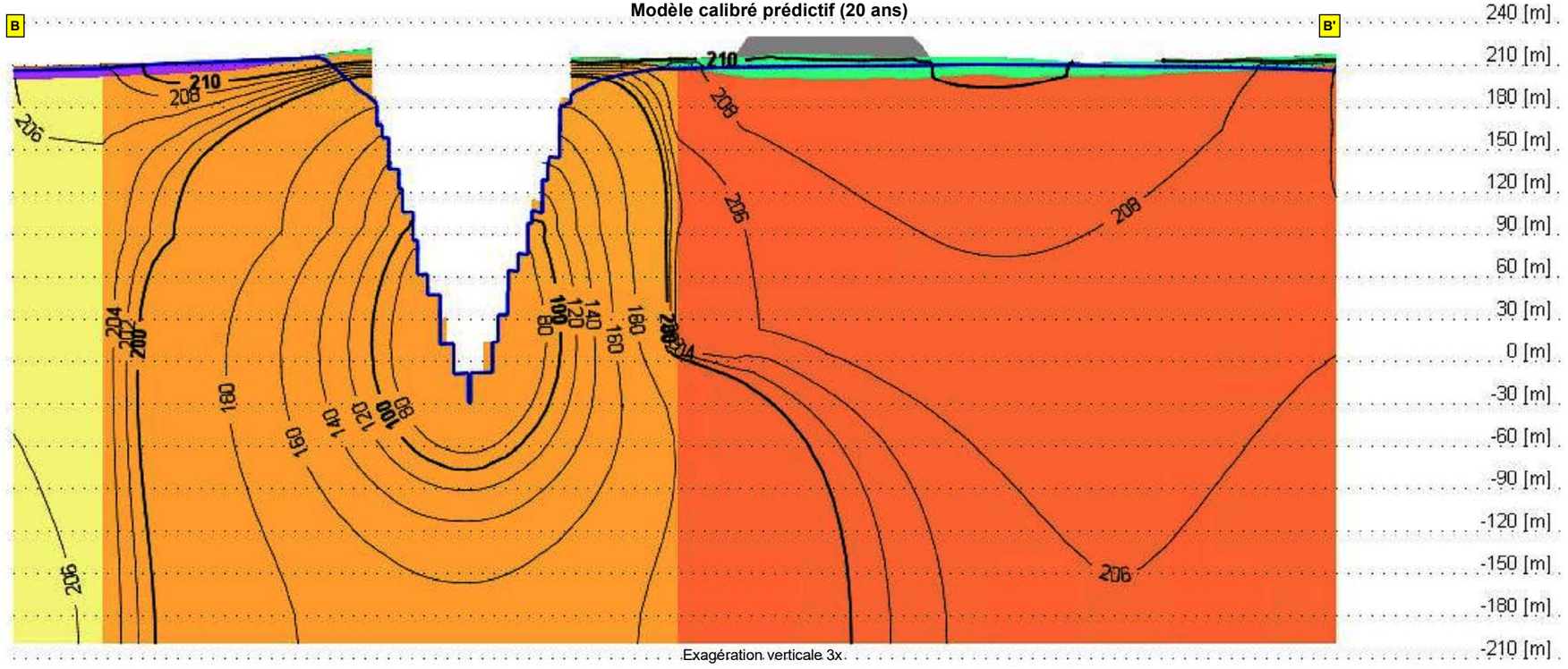
wsp

Modèle calibré

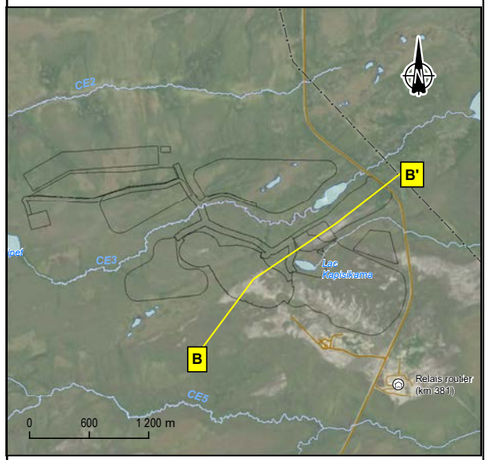


Exagération verticale 3x

Modèle calibré prédictif (20 ans)



Exagération verticale 3x



Niveau d'eau
Charge hydraulique (m)
Tourbe
Dépôts argileux
Dépôts sableux (till)
Paragneiss
Pegmatite à spodumène et paragneiss
Basalte amphibolitisé, amphibolite et paragneiss
Résidus et stériles miniers
Infrastructures minières

Infrastructures

Route principale
Route d'accès
Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 *Numéro de cours d'eau*
Cours d'eau permanent
Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Figure 3
Coupe 2

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGf3_wspT359_coupe2_210715.mxd

wsp

6.1.4 CONDITIONS LIMITES

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

Pour la simulation de la fosse, des drains ont été appliqués aux nœuds de la fosse afin de permettre au modèle de simuler une sortie d'eau.

En périphérie des haldes, des charges constantes de type drain ont été utilisées pour représenter les fossés d'une profondeur de 1,5 m. Ce type de frontière permet de sortir l'eau du système hydrogéologique.

Enfin, pour les bassins, des charges constantes égales à l'élévation du niveau d'eau dans le bassin ont été appliquées. Pour le bassin principal, une charge constante à l'élévation 205,2 m a été appliquée et pour le bassin secondaire, une charge constante à l'élévation 209,5 m a été appliquée.

6.1.5 RECHARGE

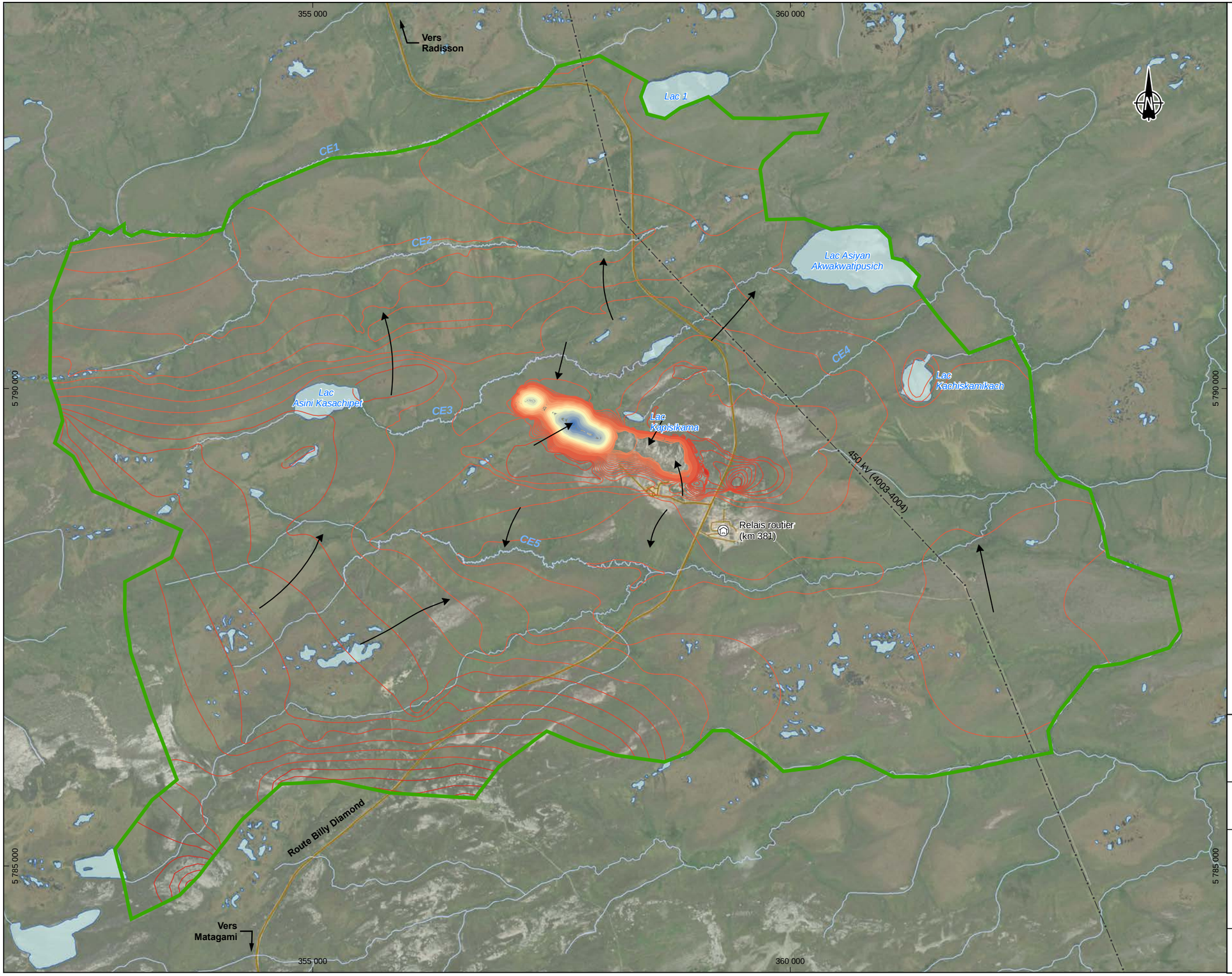
La recharge a été modifiée sur le sommet des quatre futures haldes. Une recharge constante correspondant à la pluie efficace obtenue à la station Grande Rivière A a été appliquée sur les hauts topographiques des quatre haldes (150 mm/an). Une recharge constante de 80 à 150 mm/an a été appliquée sur les horizons de la berme stabilisatrice de roches stériles, ainsi que sur le till et la tourbe de la halde à matière organique et dépôts meubles. Cette eau de recharge appliquée en sommet des haldes ou des dépôts de la halde à matière organique et dépôts meubles s'infiltre rapidement dans les aires d'accumulation, puis s'exfiltre dans les matériaux sous-jacents pour s'écouler latéralement.

6.2 MODIFICATION DE LA PIÉZOMÉTRIE RÉGIONALE

Les élévations piézométriques pour le modèle calibré avec la fosse (à la fin des opérations) sont présentées à la carte 13. Les rabattements simulés lors du dénoyage sont présentés à la carte 14. En condition d'excavation complète, la surface piézométrique régionale ne changera pas significativement, sauf dans la zone 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 les conditions statiques lorsque les effets de l'excavation et du dénoyage diminuent.

À la fin de l'exploitation, il est estimé que le rabattement de la nappe serait quasiment nul à environ 2 km à l'est de la fosse (carte 14). Pour les secteur sud et ouest, le rabattement serait quasiment nul à une distance variant entre 500 et 900 m des parois de la fosse. Dans le secteur nord-ouest, le bassin de rétention créera localement une légère augmentation du niveau de la nappe d'eau souterraine d'environ 0,5 m (rabattement négatif sur la carte 14).

Les figures 2 et 3 présentent des vues en coupe de la distribution des charges hydrauliques et de la position du niveau d'eau pour le modèle calibré et le modèle du dénoyage final de la fosse.



Limite de la zone modélisée

Courbe piézométrique (m)

- -45 à -52
- -30 à -45
- -15 à -30
- 0 à -15
- 0 à 15
- 15 à 30
- 30 à 45
- 45 à 60
- 60 à 75
- 75 à 90
- 90 à 105
- 105 à 120
- 120 à 135
- 135 à 150
- 150 à 165
- 165 à 180
- 180 à 195
- 195 à 210
- 210 à 225
- 225 à 240

Sens d'écoulement de l'eau

Infrastructures

- Route principale
- Route d'accès
- Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

- *CE3* — *Numéro de cours d'eau*
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 13
Carte piézométrique modèle prédictif calibré à la fin d'exploitation de la fosse (19 ans)

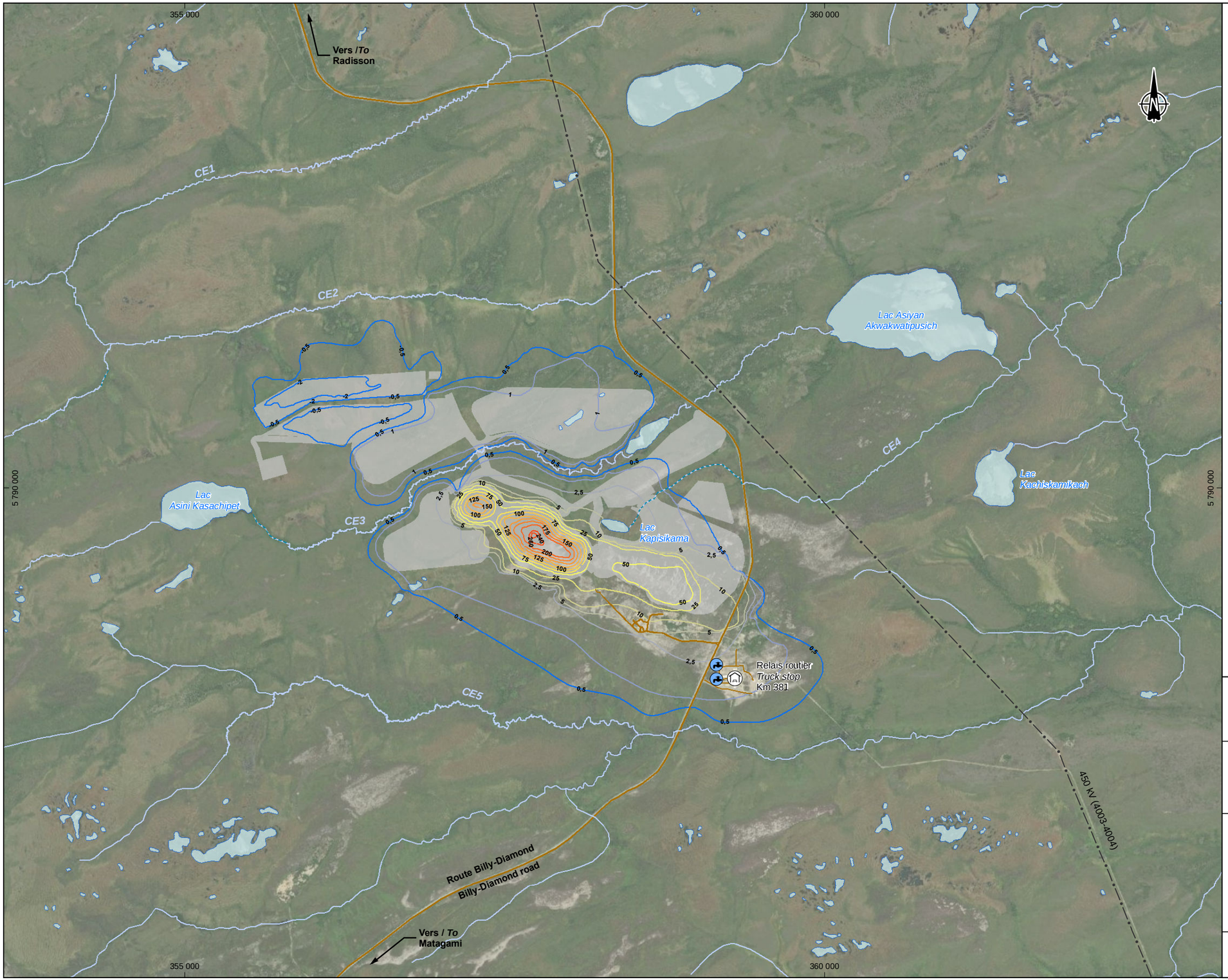
Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

0 400 800 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc13_wspT352_piezofoss_210715.mxd

wsp



Composantes du projet (2021)

- Empreinte de la mine

Rabattement

- 0,5 m (Faible)
- 1 m
- 2,5 m
- 5 m
- 10 m
- 25 m
- 50 m
- 75 m
- 100 m
- 125 m
- 150 m
- 175 m
- 200 m
- 240 m (Élevé)

Infrastructures

- Route principale
- Route d'accès
- Ligne de transport d'énergie
- Relais routier
- Source d'eau potable

Hydrographie

- CE3 — Numéro de cours d'eau
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 14
Rabattement du niveau d'eau, dénoyage final

Sources :
Orthoimage : World Imagery (ESRI, 2018)
Rabattement / Drawdown, WSP 2021

0 300 600 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Dessin : A. Lemay
Approbation : S.Bottier
201-11679-00_HGc14_wspT353_rabat_210715.mxd

wsp

6.3 DÉBIT DE DÉNOYAGE

Le débit de dénoyage a été calculé en additionnant toute la quantité d'eau sortant de la fosse par les nœuds (type drain) et en y ajoutant le volume d'eau de ruissellement.

Le tableau 19 présente les résultats des débits de dénoyage pour chaque année. La quantité d'eau pompée à l'intérieur de la fosse est d'environ 1 000 m^3/j à la fin de l'exploitation. Le volume maximal pompé est obtenu à l'année 12, avant que le pompage ne soit arrêté dans JB-3 avec environ 1500 m^3/j. L'apport d'eau provenant des eaux souterraines représente entre 18 et 29% de l'eau pompée selon les années. Les faibles débits provenant de l'eau souterraine s'expliquent par la faible perméabilité de l'unité 4.2.

Tableau 19 Débit de dénoyage anticipé pour le modèle calibré

Temps depuis le début des opérations	Année estimée	Eau souterraine provenant de JB-1 et JB-2 (m^3/j)	Eau souterraine provenant de JB-3 (m^3/j)	Total eau souterraine (m^3/j)	Eau provenant du ruissellement (m^3/j)	Débit de dénoyage anticipé (m^3/j)
Année 0	2023	65.5	0	65.5	160	225,5
Année 1	2024	126	30	156	590	746
Année 2	2025	120.5	29	149.5	590	739,5
Année 3	2026	141.5	27	168.5	740	908,5
Année 4	2027	146	25	171	740	911
Année 5	2028	162	30	192	740	932
Année 6	2029	165	41	206	770	976
Année 7	2030	176	44	220	1030	1250
Année 8	2031	179	51	230	1030	1260
Année 9	2032	182	70	252	1030	1282
Année 10	2033	183	74	257	1030	1287
Année 11	2034	182	95	277	1030	1307
Année 12	2035	180	96	276	1200	1476
Année 13	2036	188	0	188	750	938
Année 14	2037	199	0	199	750	949
Année 15	2038	220	0	220	750	970
Année 16	2039	223	0	223	750	973
Année 17	2040	227	0	227	750	977
Année 18	2041	243	0	243	750	993
Année 19	2042	261	0	261	750	1011

6.3.1 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 SS3, SS4, SS5, SS6, SS7 et SS8 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. Afin de faciliter la réalisation de l'analyse de sensibilité, seul le design final sans remplissage de JB-3 a été simulé; les débits ne sont donc pas disponibles pour chaque année.

Les simulations suivantes ont été effectuées lors de l'analyse de sensibilité :

- **SS3 :** augmentation par deux de la conductivité hydraulique du roc;
- **SS4 :** augmentation par cinq de la conductivité hydraulique du roc;
- **SS5 :** diminution par deux de la conductivité hydraulique du roc;
- **SS6 :** diminution par cinq de la conductivité hydraulique du roc;
- **SS7 :** augmentation par dix de la conductivité hydraulique de la pegmatite;
- **SS8 :** modification des zones de conductivité hydraulique en fonction de la carte géologique et de la géologie fournie par Galaxy (carte 5);

Les débits de dénoyage anticipés ont été recalculés pour chacune des simulations et sont présentés au tableau 20. Les valeurs de débits anticipés montrent que plus la conductivité du roc augmente, plus les apports d'eau souterraine à la fosse sont élevés. Ainsi, dans l'éventualité où la valeur de la conductivité du roc serait deux fois plus élevée que le scénario initial (meilleure calibration), on obtiendrait un débit de dénoyage moyen de 2 256 m^3/j (SS3) et de 2 926 m^3/j (SS4). Dans l'éventualité où la conductivité de l'unité 4.2 était un ordre de grandeur plus élevée (SS7), on obtiendrait un débit de dénoyage moyen de 3 336 m^3/j.

Les résultats du scénario SS8 montrent que si la répartition des conductivités hydrauliques suivait plus la géologie, les apports d'eau souterraine seraient multipliés par 2 par rapport au modèle calibré et représenteraient 37 % des venues d'eau dans la fosse.

Tableau 20 Variation des débits de dénoyage selon le scénario

Scénario	Apport des eaux souterraines (m^3/j)	Eau provenant du ruissellement (m^3/j)	Débit de dénoyage anticipé (m^3/j)	Apport des eaux souterraines (%)
Modèle calibré	372	1476	1848	20%
SS3 : augmentation par deux de la conductivité hydraulique du roc	780	1476	2256	35%
SS4 : augmentation par cinq de la conductivité hydraulique du roc	1450	1476	2926	50%
SS5 : diminution par deux de la conductivité hydraulique du roc	250	1476	1726	14%
SS6 : diminution par cinq de la conductivité hydraulique du roc	190	1476	1666	11%
SS7 : augmentation par dix de la conductivité hydraulique de la pegmatite	1860	1476	3336	56%
SS8 : modification des zones de conductivité hydraulique en fonction de la carte géologique et de la géologie fournie par Galaxy	850	1476	2326	37%

6.4 IMPACTS SUR LES EAUX DE SURFACE

Il est possible de déterminer le risque d'impact sur les cours d'eau et les lacs à partir des simulations effectuées. Le tableau 21 présente les valeurs des débits de base des cours d'eau simulées à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif (fosse à la fin de l'exploitation).

Tableau 21 Valeurs des débits de base simulés à partir du modèle calibré

Site de mesure	Débit d'étiage modèle calibré (m^3/j)	Débit moyen annuel (m^3/j)	Modèle calibré avec fosse	Différence modèle calibré – modèle prédictif (m^3/j)	Variation par rapport au débit de base (%)	Variation par rapport au débit moyen (%)
CE2	1034	14364	1021	13	1%	0%
CE3	818	9475	662	156	19%	2%
CE4	50.8	1951	18.5	32.3	64%	2%
CE5	2481	30528	2357	124	5%	0%

Les résultats montrent que l'impact sur les lacs et les cours d'eau varient entre 1 et 64 % par rapport au débit de base et entre 0 et 2 % par rapport au débit moyen. La contribution des eaux souterraines au débit de base du cours d'eau CE4 deviendrait très faible. Pour l'ensemble des autres cours d'eau (CE2, CE3 et C5), l'impact de la fosse sur les débits de base varie de faible à négligeable. Il est important de noter que ces réductions sont anticipées sur les débits de base qui correspondent à l'apport des eaux souterraines aux ruisseaux. L'impact de la réduction du débit de base sera moindre sur le débit moyen réel puisque le débit de base ne représente qu'environ 10 % du débit total moyen des ruisseaux. Dans notre étude, l'impact de la fosse sur les débits moyens des cours d'eau est négligeable pour l'ensemble des cours d'eau. Pour l'ensemble des lacs, excepté le lac Kapisikama, qui se situe à moins de 200 m de la fosse, l'impact sera également négligeable. Le lac Kapisikama ne sera plus alimenté par la nappe d'eau souterraine à partir de l'année 4 d'opération. La superficie de son bassin versant sera également fortement réduite. De plus, ce lac sera drainé au début des opérations pour fournir de l'eau lors de l'aménagement des infrastructures.

6.5 RÉSULTATS DES DÉBITS DE PERCOLATION DU MODÈLE CALIBRÉ

Pour cette simulation, les conditions définies dans le modèle calibré ont été utilisées. Les résultats des débits de percolation sont présentés au tableau 22.

Tableau 22 Débit de percolation du modèle calibré pour le secteur des haldes de codéposition et du bassin

UNITÉ	DÉBIT DE PERCOLATION QUOTIDIEN ($L/m^2/jr$)
Débit de percolation vers les dépôts argileux et le till sous la halde ouest	0,05
Débit de percolation vers les dépôts argileux et le till sous la halde nord-est	0,26
Débit de percolation vers les dépôts argileux et le till sous la halde sud-ouest	0,06
Débit de percolation vers les dépôts argileux et le till sous la halde est	0,13
Débit de percolation sous le bassin principal (sans couche d'argile)	3,9
Débit de percolation sous le bassin principal (avec couche d'argile)	0,46
Débit de percolation sous le bassin secondaire	0,08

Les résultats montrent que pour les haldes de codéposition, le débit de percolation vertical est inférieur à la norme fixée par la Directive 019. Sous le bassin, une couche d'argile sera ajoutée lorsque l'argile ne sera pas présente naturellement. Lorsque l'on ajoute une couche d'argile sous le bassin le débit de percolation fixée par la Directive 019 est respecté. Lorsque la couche d'argile n'est pas présente, le débit de percolation ne respecte pas le critère de la Directive 019. Le bassin secondaire respecte le critère de percolation de la Directive 019.

6.5.1 ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'étudier l'incertitude liée à la variation de la recharge du modèle sur le débit de percolation sous les haldes à stériles et résidus miniers. Une simulation reproduisant des conditions typiques de fonte printanière a été réalisée.

— Au niveau de l'ensemble des zones où la recharge était supérieure à 25 mm/an, une valeur de 5 mm/an de recharge a été appliquée pendant trois mois, afin de représenter les mois d'hiver où la température est sous le point de congélation. Par la suite, pour une période d'un mois, l'ensemble des précipitations de ces trois mois ont été appliquées, combinées aux précipitations efficaces pour le mois d'avril. Au total, une recharge de 147 mm a été appliquée pendant 30 jours, pour ensuite revenir à 100 mm/an. Les résultats issus de cette simulation sont présentés au tableau 23. Les charges dans les bassins étant imposées, la recharge n'a pas d'impact sur le débit de percolation.

Tableau 23 Débit de percolation du modèle calibré pour le secteur des haldes à stériles et résidus miniers

UNITÉ	DÉBIT DE PERCOLATION QUOTIDIEN (L/m²/jr)
Débit de percolation vers les dépôts argileux et le till sous la halde ouest	0,19
Débit de percolation vers les dépôts argileux et le till sous la halde nord-est	1,1
Débit de percolation vers les dépôts argileux et le till sous la halde sud-ouest	0,19
Débit de percolation vers les dépôts argileux et le till sous la halde est	0,49

7 MODÉLISATION DU TRANSPORT

Dans le cadre de cette étude, la modélisation du transport de métaux dissous vise essentiellement à vérifier les effets des haldes de codéposition sur le milieu naturel. Ainsi, les mécanismes de transport représentés dans les simulations réalisées sont l'advection, la dispersion et la diffusion d'une phase dissoute dans les empreintes des futures haldes. Les mécanismes générateurs de cette phase dissoute (source), ainsi que les phénomènes d'enrichissement, de lixiviation (transport réactif) et de retardation (sorption) ne sont pas considérés. Néanmoins, les résultats obtenus permettent d'apprécier l'évolution des conditions en métaux dissous dans l'eau souterraine, issue des futures infrastructures.

7.1 MODIFICATIONS APPORTÉES AU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

Le modèle utilisé est le même que celui présenté à la section 6.1. Seuls la recharge et les éléments au niveau de la fosse, permettant de simuler le lac lors de l'arrêt du pompage, ont été modifiés en condition postopération.

7.1.1 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES

Les propriétés hydrauliques du modèle hydrogéologique calibré restent inchangées. Pour les éléments situés dans le lac, ceux-ci ont été réactivés. Une porosité de 100 % et une conductivité élevée ont été appliquées afin de simuler un milieu vide et de permettre l'accumulation d'eau.

7.1.2 RECHARGE

La recharge a été modifiée au niveau des quatre haldes de codéposition. À la fin des opérations, les haldes seront revégétalisées, ce qui aura pour conséquence de réduire la recharge. Une recharge moyenne de 40 mm/an a donc été appliquée sur le sommet des quatre futures haldes de codéposition.

7.2 MODIFICATIONS APPORTÉES POUR L'AJOUT DU TRANSPORT

7.2.1 CONCENTRATIONS IMPOSÉES

Afin de simplifier les simulations de transport, un seul paramètre avec une concentration arbitraire de 100 mg/l a été sélectionné comme source de métaux dissous en place dans les parcs, afin d'être en mesure d'exprimer la concentration en termes de pourcentage de cette valeur. Cette valeur arbitraire peut alors être pondérée sur l'ensemble du site, suivant la concentration maximale obtenue lors des essais de lixiviation.

Il est acceptable d'utiliser cette méthode puisque les résultats obtenus sont ensuite utilisés pour visualiser l'évolution des concentrations relativement aux sources de métaux dissous imposées. En effet, l'objectif des simulations n'est pas d'obtenir la concentration exacte à un point donné, mais un ordre de grandeur (généralement surestimé), et de préciser l'évolution dans le temps des conditions en métaux dissous en provenance des infrastructures, et ce, suivant le régime d'écoulement du site. Ainsi l'arsenic, qui présentait des dépassements du critère RES, et le cuivre sont présentés dans les résultats.

Les concentrations ont été imposées selon les temps de déposition des stériles et des résidus sur les différentes haldes. Les analyses chimiques ayant montré que de la lixiviation avait lieu pendant 16 semaines, les charges imposées ont été laissées une année supplémentaire sur les haldes, afin de rester conservateur. Le tableau 24 présente les années pour lesquelles une concentration a été imposée sur les haldes de codéposition.

Tableau 24 Concentrations imposées

	Année																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Halde ouest				x	x	x	x					x						x	x	x	
Halde nord est	x	x	x	x	x	x	x	x				x				x	x	x	x	x	
Halde sud-ouest								x	x	x	x	x	x								
Halde est								x	x	x	x	x				x	x	x	x	x	x
Stériles dans JB-3													x	x	x	x	x				

7.2.2 POROSITÉ EFFICACE DE TRANSPORT

Pour des simulations de transport de particules, seule la porosité participant à l'écoulement, soit la porosité efficace, doit être considérée pour le calcul. Les valeurs de porosité efficace ont été attribuées aux différentes unités hydrostratigraphiques déterminées précédemment sur la base de leur composition granulométrique et des valeurs de porosité totale et efficaces typiques pour ces matériaux selon la littérature (Banton et Bangoy, 1999). Le tableau 25 présente les valeurs de porosité efficace utilisées pour les différentes unités hydrostratigraphiques du modèle.

Tableau 25 Porosité efficace typique

Unité lithostratigraphique	Porosité efficace de transport
Remblai granulaire	0,25
Stériles / résidus miniers (silteux/sableux)	0,2
Terre végétale / Tourbe	0,45
Dépôts argileux	0,10
Till	0,15
Roc superficiel	0,05
Roc plus profond (>10m)	0,01

7.2.3 DISPERSIVITÉ

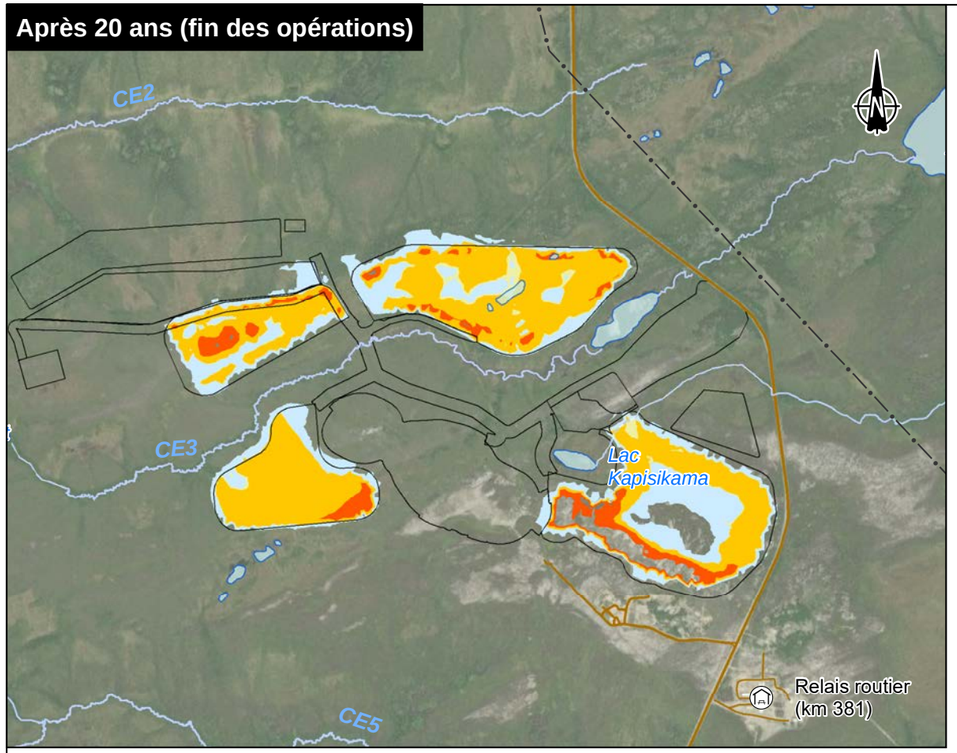
Une dispersivité longitudinale de 5 m et transversale de 0,5 m ont été utilisées (De Marsily, 1986; Lallemand-Barres, 1978). Afin d'être conservateur, les simulations négligent les phénomènes de retard, d'adsorption et dégradation.

7.3 RÉSULTATS SIMULATIONS DE TRANSPORT

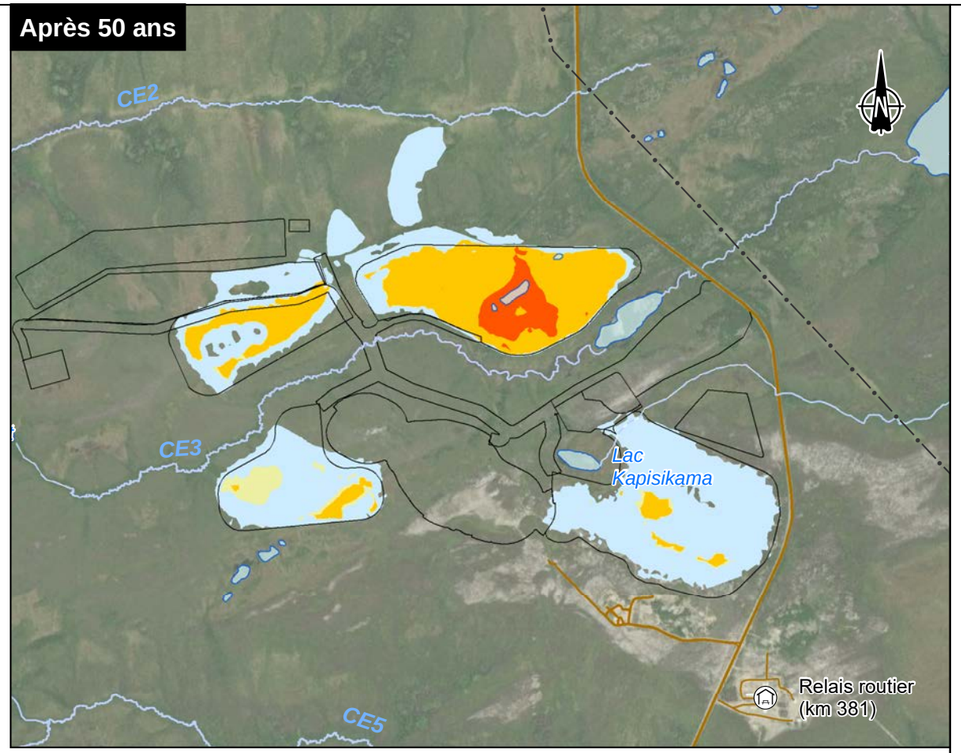
7.3.1 TRANSPORT D'ARSENIC DISSOUS

Les cartes 15 et 16 présentent des vues en plan des concentrations en arsenic simulées dans les dépôts de surface (carte 15) et dans le roc superficiel (carte 16) pour les années 20, 50, 100 et 200. La figure 4 présente des vues en coupe de l'évolution des concentrations en arsenic, également pour les années 20, 50, 100 et 200 dans le secteur de la halde nord-est.

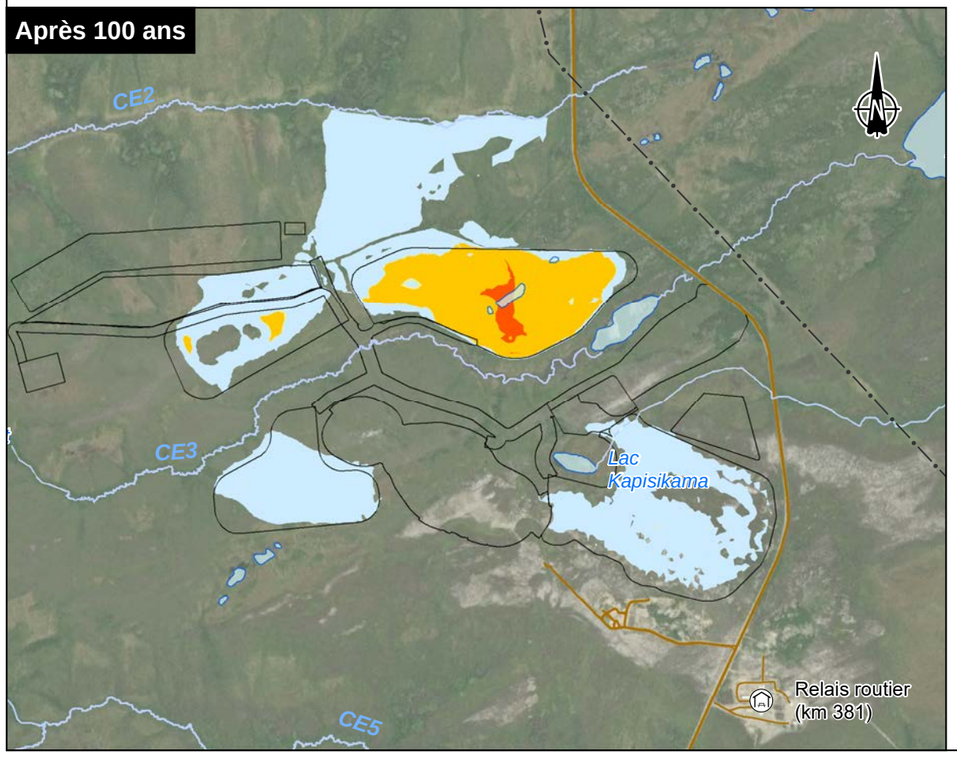
Après 20 ans (fin des opérations)



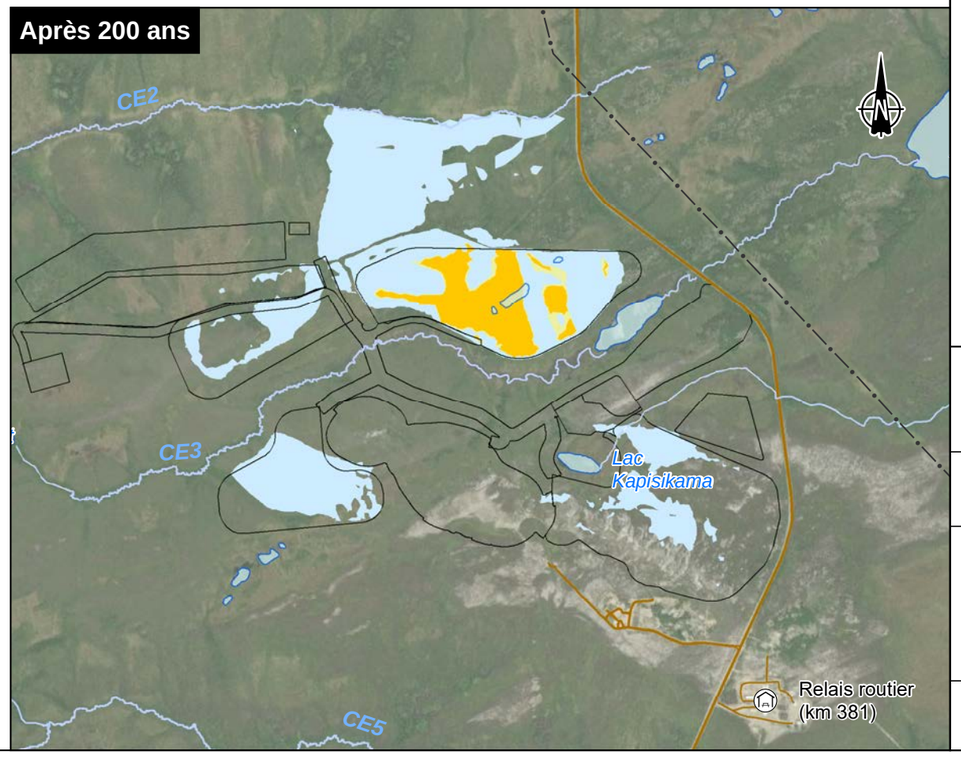
Après 50 ans



Après 100 ans



Après 200 ans



Infrastructures minières

Concentrations en arsenic (mg/l)

- 0,005 – 0,094
- 0,094 – 0,1
- 0,1 – 0,2
- > 0,2

Infrastructures

- Route principale
- Route d'accès
- Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

- *CE3* — *Numéro de cours d'eau*
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 15
Concentration en arsenic (mg/l)
dans les dépôts de surface

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

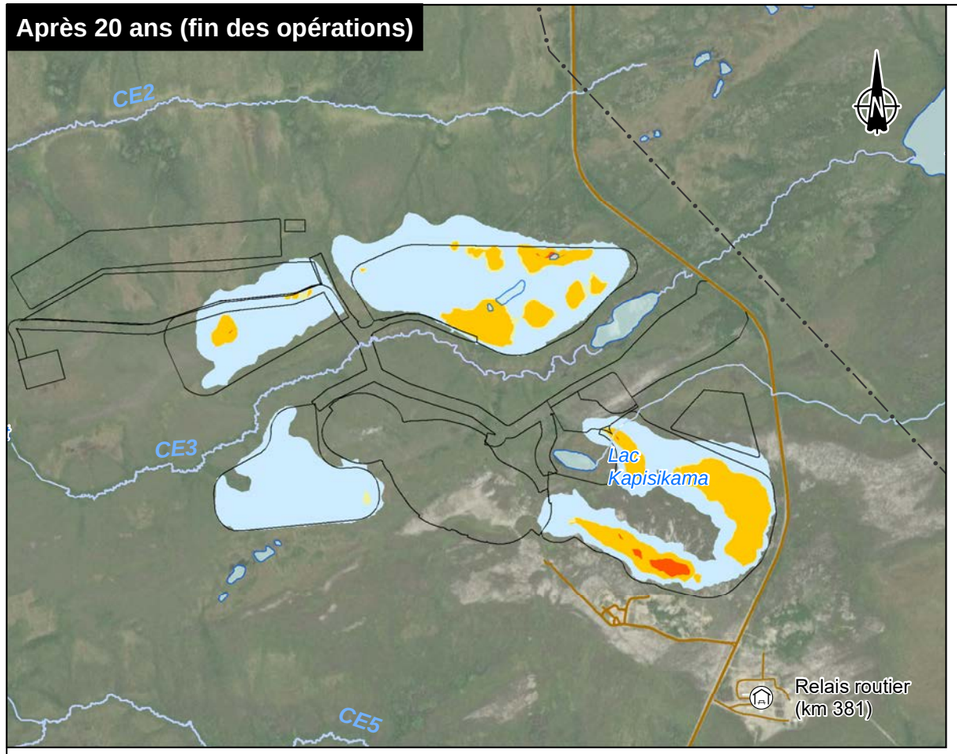
0 300 600 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

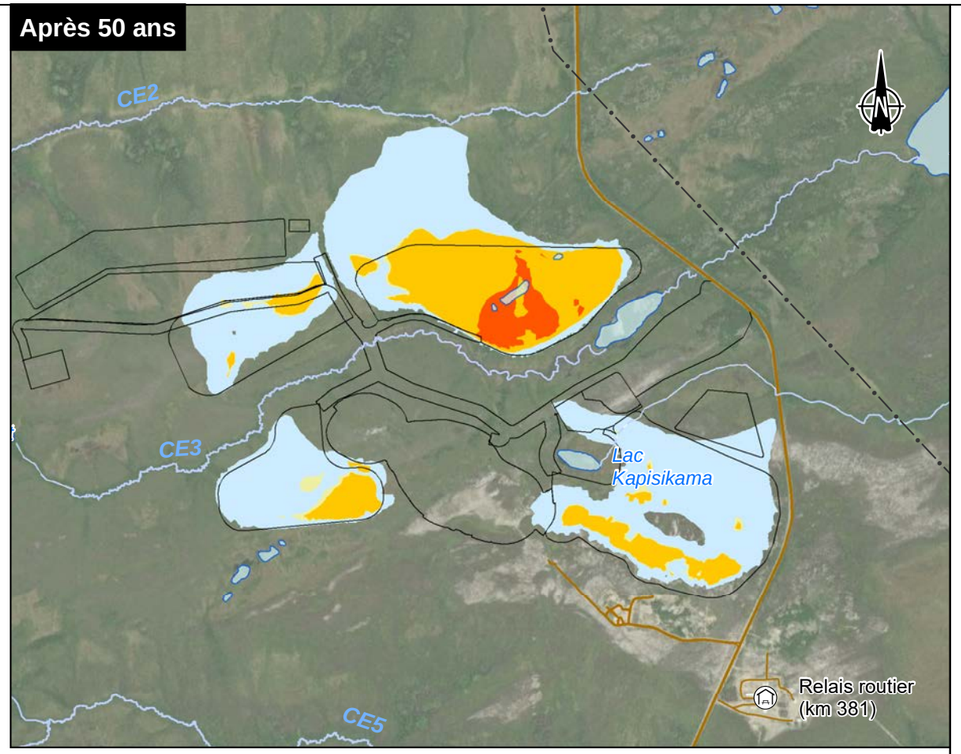
Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc15_wspT354_arsenic_suf_210715.mxd

wsp

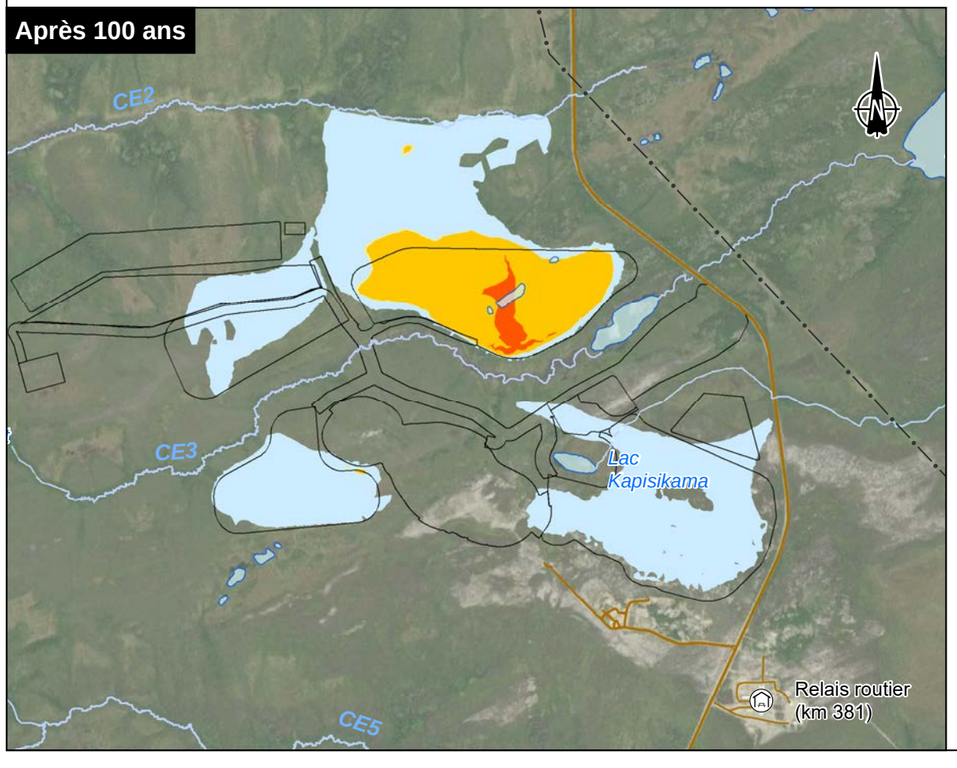
Après 20 ans (fin des opérations)



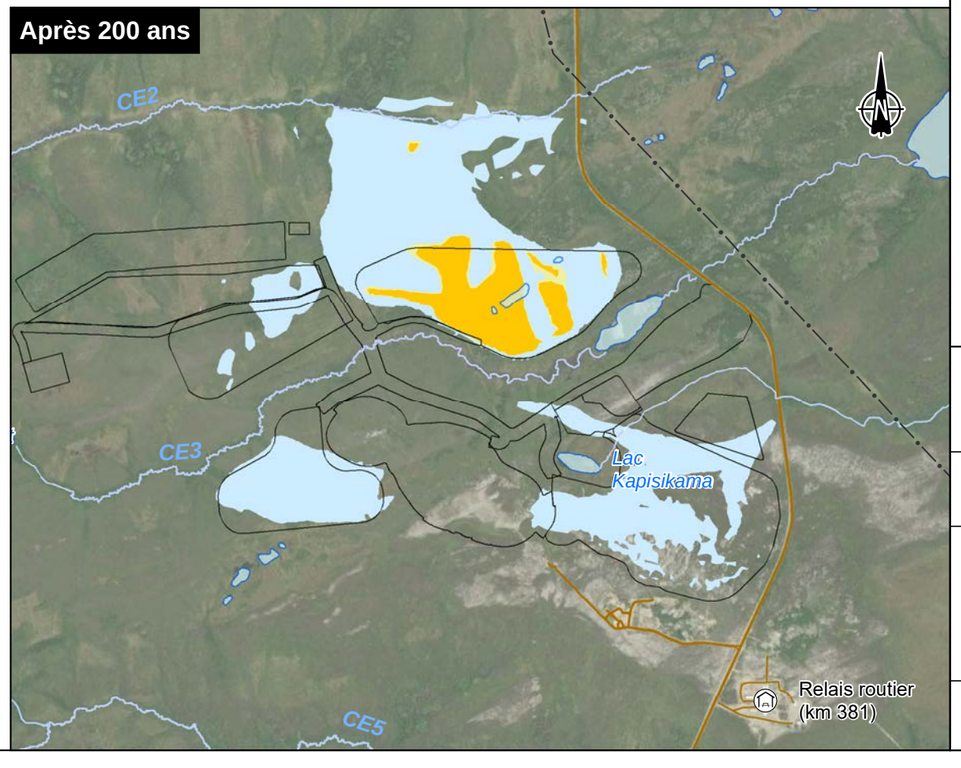
Après 50 ans



Après 100 ans



Après 200 ans



Infrastructures minières

Concentrations en arsenic (mg/l)

- 0,005 – 0,094
- 0,094 – 0,1
- 0,1 – 0,2
- > 0,2

Infrastructures

- Route principale
- Route d'accès
- Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

- *CE3* — *Numéro de cours d'eau*
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 16
Concentration en arsenic (mg/l)
sur le toit du roc

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

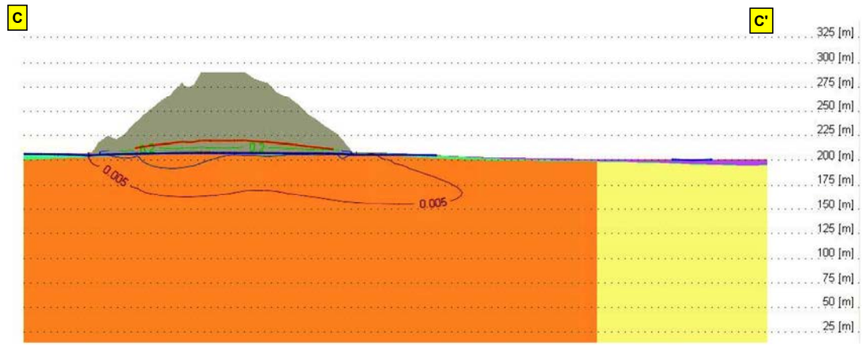
0 300 600 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc16_wspT355_arsenic_roc_210715.mxd

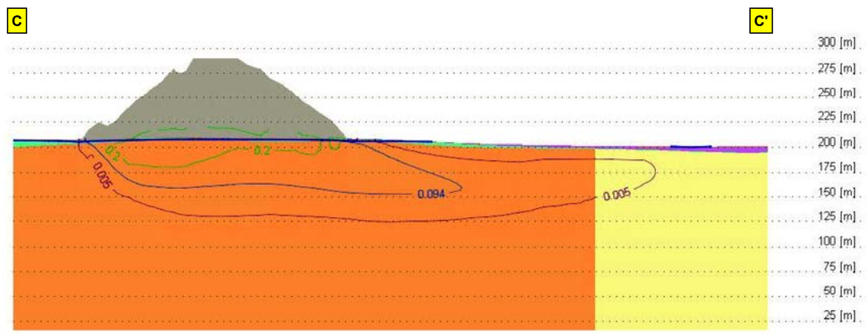
wsp

Après 20 ans
(fin des opérations)



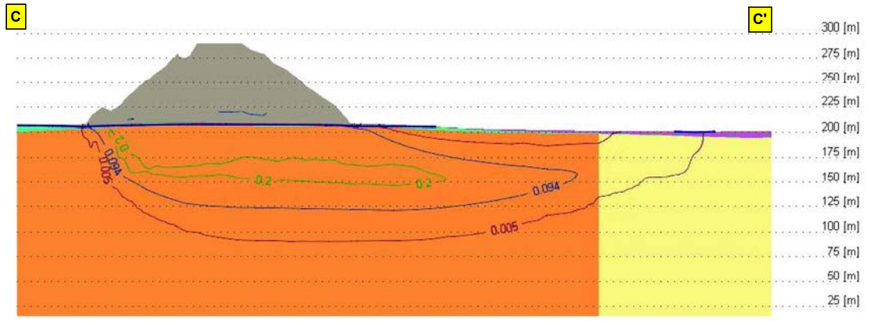
Exagération verticale 2x

Après 50 ans



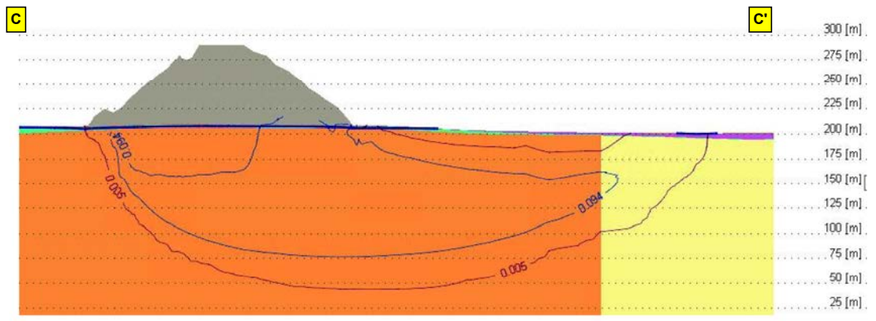
Exagération verticale 2x

Après 100 ans



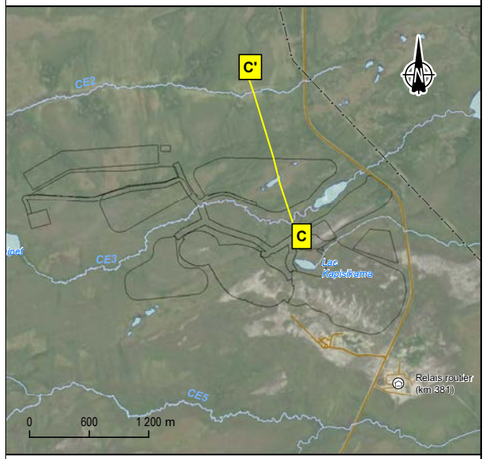
Exagération verticale 2x

Après 200 ans



Exagération verticale 2x

Niveau d'eau
Concentration en arsenic (mg/l)
Tourbe
Dépôts argileux
Dépôts sableux (till)
Paragneiss
Pegmatite à spodumène et paragneiss
Basalte amphibolitisé, amphibolite et paragneiss
Résidus et stériles miniers



Infrastructures minières

Infrastructures

Route principale
Route d'accès
Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 *Numéro de cours d'eau*
Cours d'eau permanent
Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Figure 4
Évolution de la concentration en arsenic dans le secteur de la halde nord-est

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGf4_wspT360_coup_ars_210715.mxd

wsp

La concentration maximale en arsenic obtenue lors des essais de lixiviations était de 0,4 mg/l. Cette concentration est légèrement supérieure au critère RES. Le tableau 26 présente les critères de l'arsenic pour l'eau souterraine et l'eau de surface, ainsi que la teneur de fond dans l'eau souterraine.

Tableau 26 Critère d'eau de surface et d'eau souterraine pour l'arsenic

Milieu	Critère / TDFN	Arsenic (mg/l)
Eau souterraine	Critère RES	0,34
	Teneur de fond	0,094
Eau de surface	CPCO : Organismes aquatiques seulement	0,021
	VAFE : valeur aiguë finale à l'effluent	0,68
	CVAA : effet aigu	0,34
	CVAC : Effet chronique	0,15
	CCME : Recommandations pour la qualité des eaux visant la protection de la vie aquatique – exposition court terme	0,005

La carte 17 montre une vue en plan des concentrations en arsenic simulées dans les dépôts de surface. Les résultats montrent qu'en surface, les concentrations en arsenic sont captées par les fossés pour l'ensemble des haldes de codéposition. Même après 200 ans, les concentrations en arsenic issues des infrastructures restent dans l'empreinte des haldes de codéposition. Dans le secteur de la halde nord, il est possible d'observer des concentrations en arsenic dans le milieu naturel issues des infrastructures. La halde nord-est se trouve sur un haut topographique et bien que le débit de percolation respecte en tout temps le critère de la Directive 019, une partie des concentrations en métaux dissous percolent par le roc et fait résurgence dans les dépôts de surface. Il est important de noter que ces concentrations sont en tout temps inférieures au critère RES (0,34 mg/l) et même inférieures à la teneur de fond (0,094 mg/l) estimée en 2018 (WSP, 2018c).

La carte 18 présente une vue en plan des concentrations en arsenic dans le roc superficiel. Pour l'ensemble des années présentées, les concentrations en arsenic sont inférieures à la teneur de fond naturelle. Il est possible d'observer les concentrations provenant de la halde nord-est migrant en direction du nord. Dans le secteur de la halde est, un panache se forme en direction du nord-ouest et un second plus petit en direction de l'est. Les concentrations de ces panaches sont inférieures à la teneur de fond naturelle en arsenic et aucune évolution n'est observable entre l'année 100 et l'année 200. De plus, ces concentrations en arsenic ne font pas résurgence en surface.

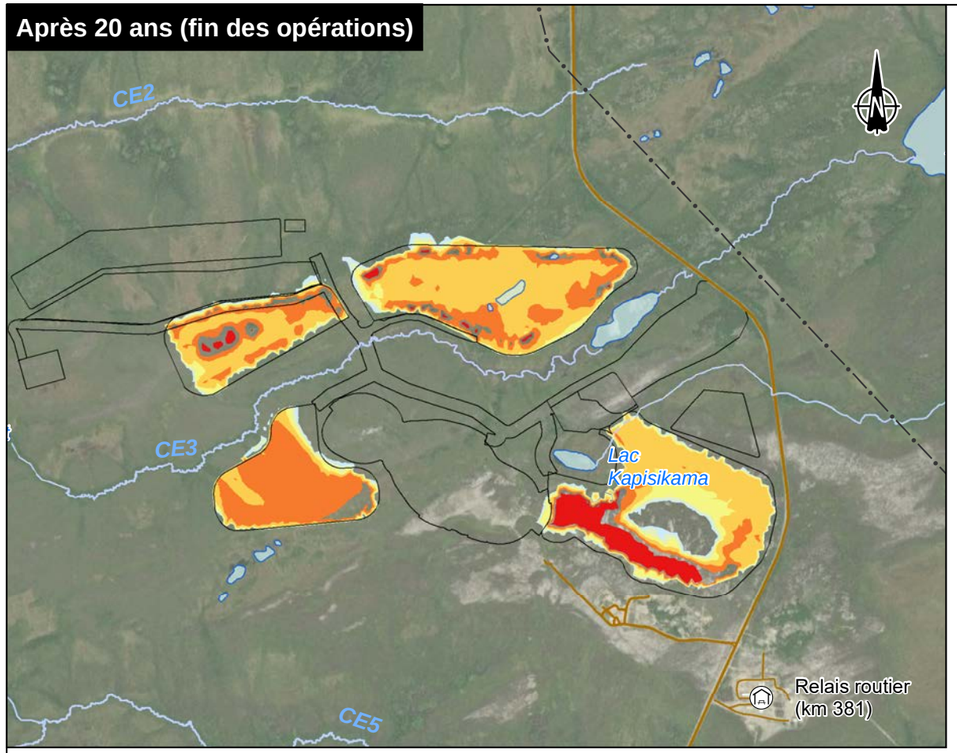
La figure 4 permet de voir en coupe l'évolution des concentrations en arsenic dans le milieu naturel dans le secteur de la halde nord-est. La concentration en arsenic ne dépasse jamais le critère RES (0,34 mg/l) dans le milieu naturel. Comme discuté précédemment, l'eau percole dans le roc pour faire résurgence dans le cours d'eau CE2.

7.3.2 TRANSPORT EN CUIVRE DISSOUS

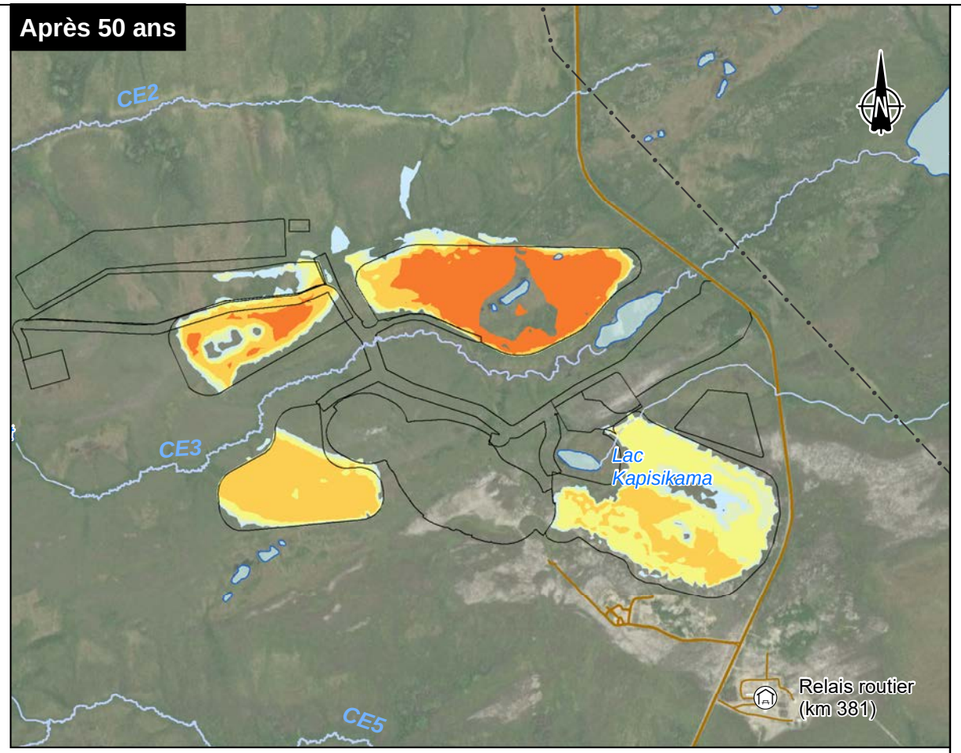
Les cartes 17 et 18 présentent des vues en plan des concentrations en cuivre simulées dans les dépôts de surface (carte 17) et dans le roc superficiel (carte 18) pour les années 20, 50, 100 et 200. La figure 5 présente des vues en coupe de l'évolution des concentrations en cuivre également pour les années 20, 50, 100 et 200 dans le secteur de la halde nord-est.

La concentration maximale en cuivre obtenue lors des essais de lixiviations était de 0,05 mg/l. Cette concentration est supérieure au critère RES. Le tableau 27 présente les critères du cuivre pour l'eau souterraine et l'eau de surface ainsi que la teneur de fond dans l'eau souterraine.

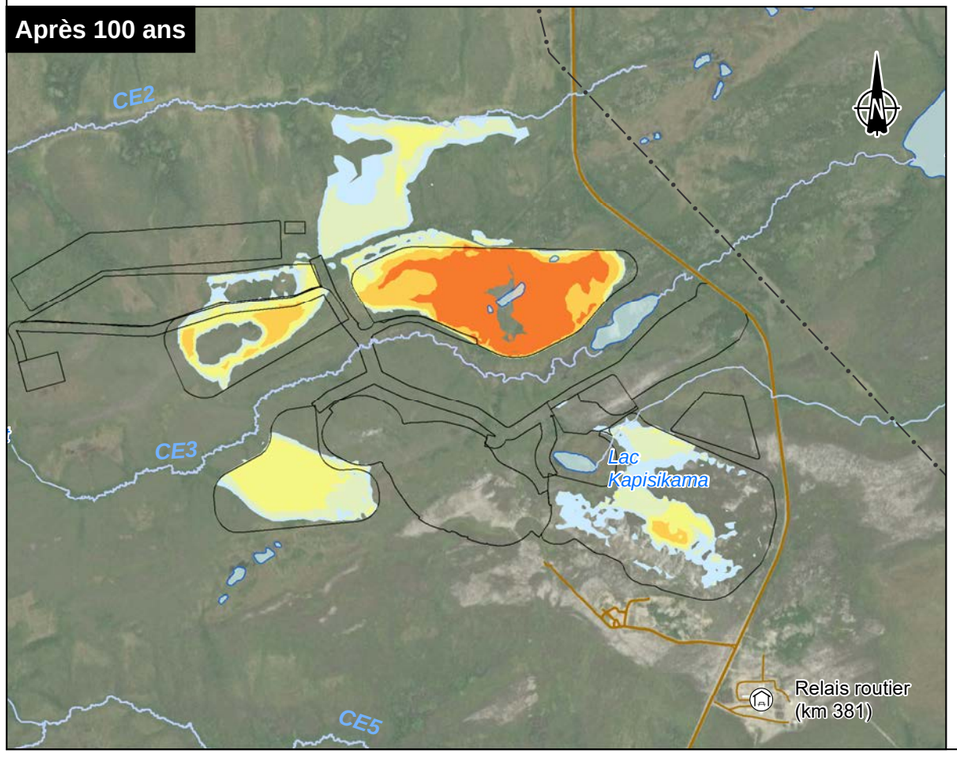
Après 20 ans (fin des opérations)



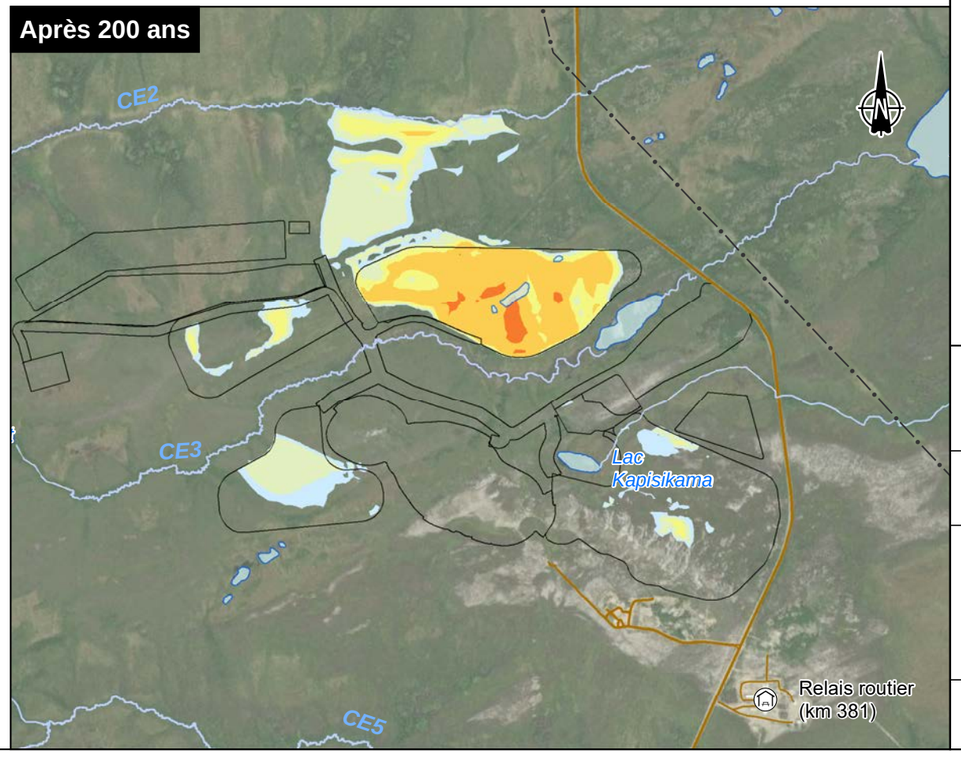
Après 50 ans



Après 100 ans



Après 200 ans



Infrastructures minières

Concentrations en cuivre (mg/l)

- 0,0015 – 0,0026
- 0,0026 – 0,005
- 0,005 – 0,01
- 0,01 – 0,02
- 0,02 – 0,04
- > 0,04

Infrastructures

- Route principale
- Route d'accès
- Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

- *CE3* — *Numéro de cours d'eau*
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 17
Concentration en cuivre (mg/l)
dans les dépôts de surface

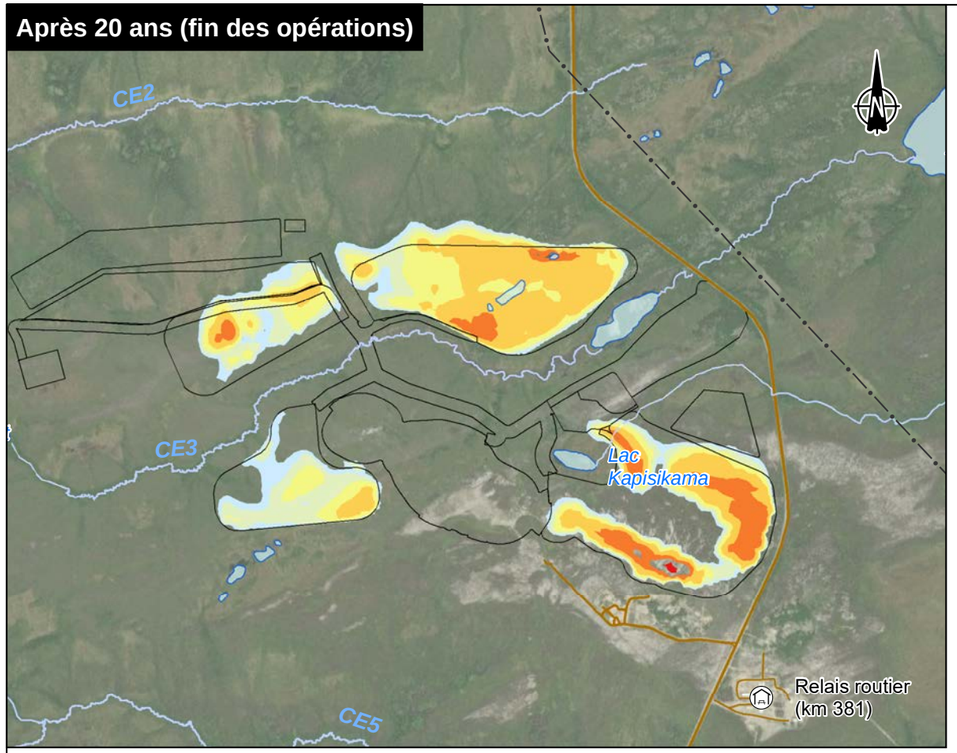
Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

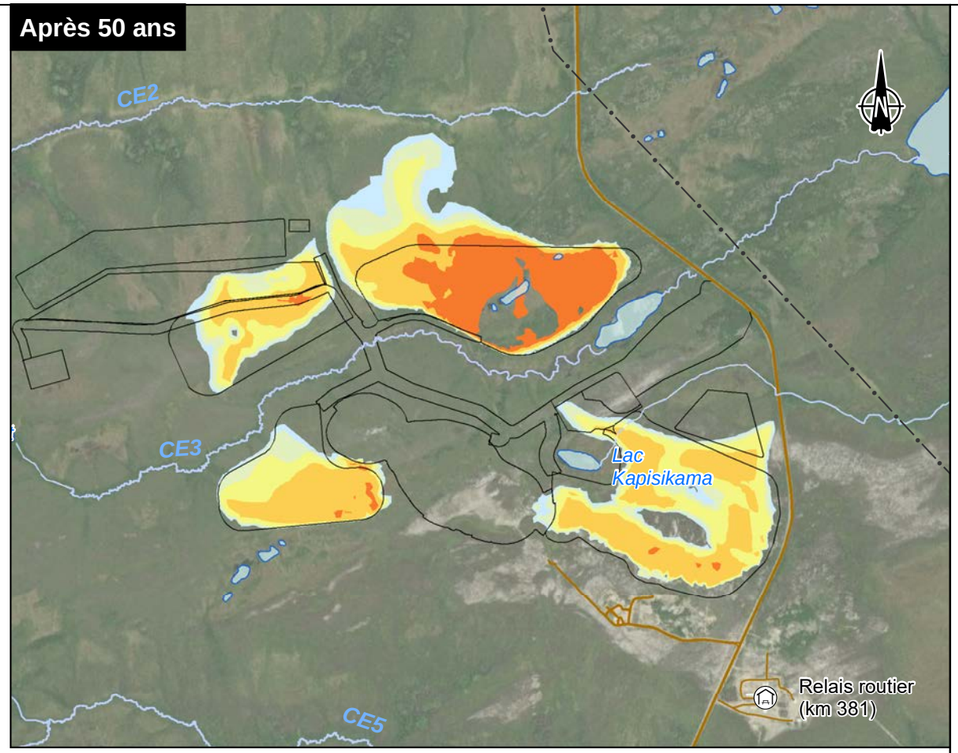
0 300 600 m
UTM, fuseau 18, NAD83

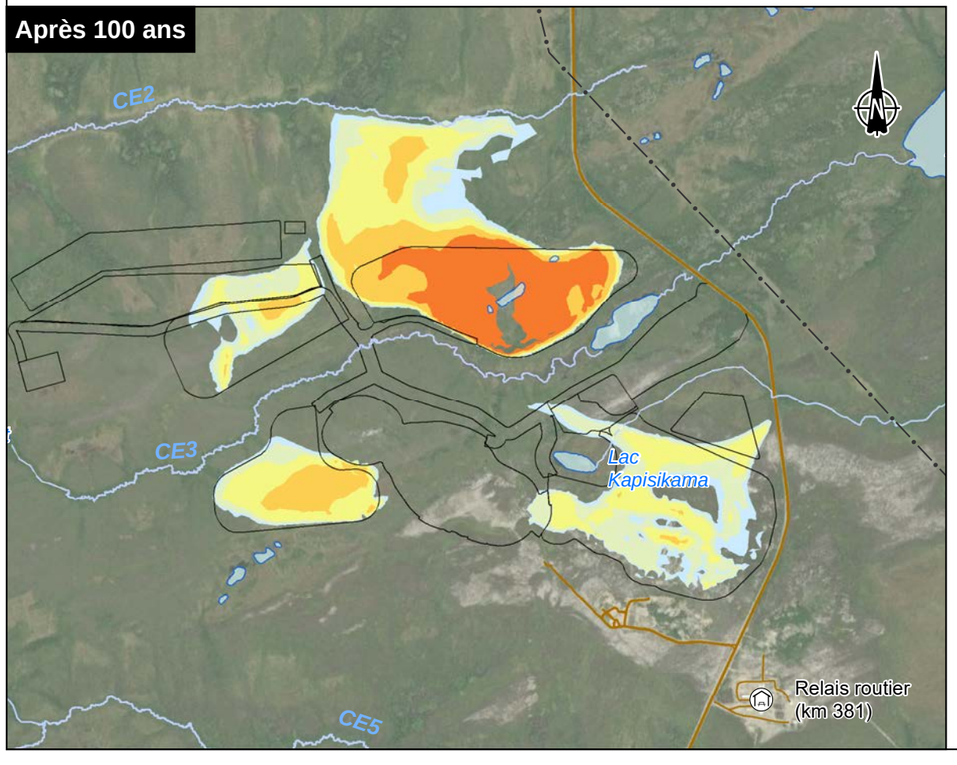
Juillet 2021

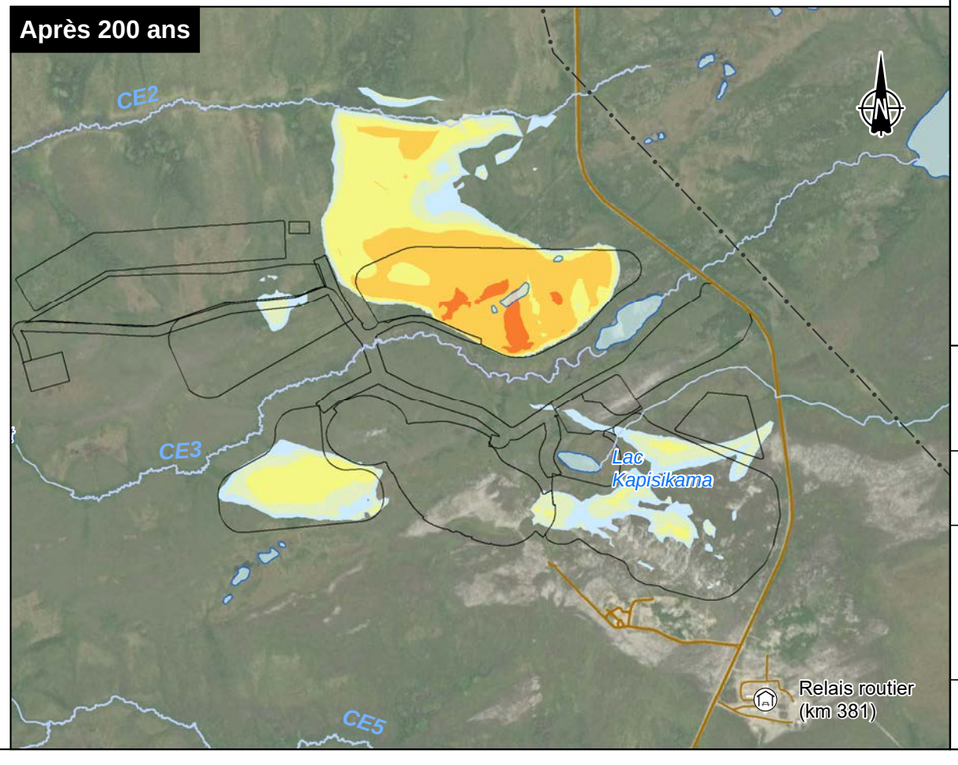
Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc17_wspT356_cuivre_suf_210715.mxd

wsp









Infrastructures minières

Concentrations en cuivre (mg/l)

- 0,0015 – 0,0026
- 0,0026 – 0,005
- 0,005 – 0,01
- 0,01 – 0,02
- 0,02 – 0,04
- > 0,04

Infrastructures

- Route principale
- Route d'accès
- Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

- *CE3* — *Numéro de cours d'eau*
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Carte 18
Concentration en cuivre (mg/l)
sur le toit du roc

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

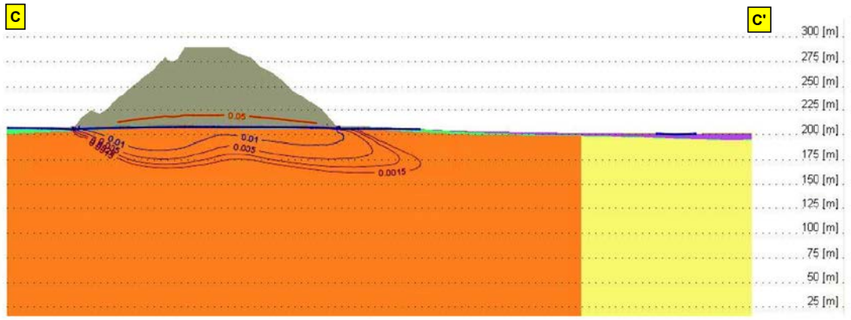
0 300 600 m
UTM, fuseau 18, NAD83

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGc18_wspT357_cuivre_roc_210715.mxd

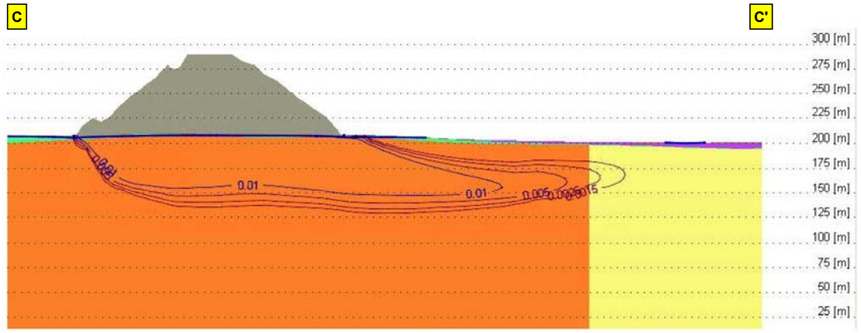
wsp

Après 20 ans
(fin des opérations)



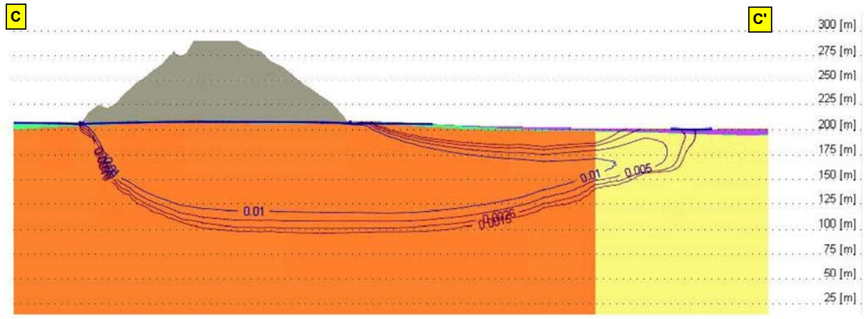
Exagération verticale 2x

Après 50 ans



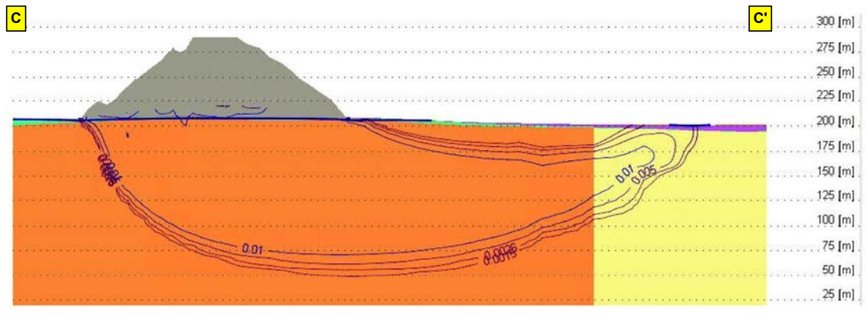
Exagération verticale 2x

Après 100 ans



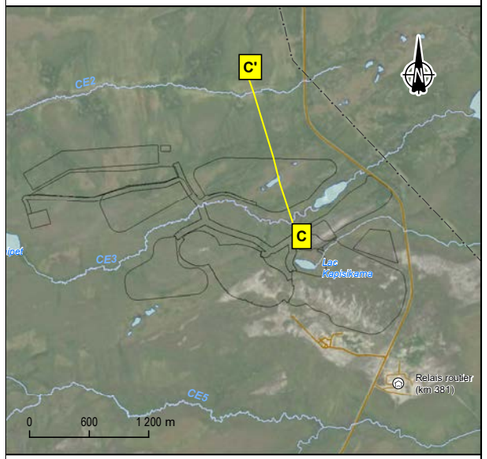
Exagération verticale 2x

Après 200 ans



Exagération verticale 2x

Niveau d'eau
Concentration en cuivre (mg/l)
Tourbe
Dépôts argileux
Dépôts sableux (till)
Paragneiss
Pegmatite à spodumène et paragneiss
Basalte amphibolitisé, amphibolite et paragneiss
Résidus et stériles miniers



Infrastructures minières

Infrastructures

Route principale
Route d'accès
Ligne de transport d'énergie

Hydrographie

CE3 *Numéro de cours d'eau*
Cours d'eau permanent
Cours d'eau à écoulement diffus ou intermittent

GALAXY

Mine de lithium Baie-James
Étude spécialisée sur l'hydrogéologie

Figure 5
Évolution de la concentration en cuivre dans le secteur de la halde nord-est

Sources :
Orthoimage : Galaxy, août 2017
Données du projet : Galaxy, 2021

Juillet 2021

Dessin : A. Masson
Approbation : C. Martineau
201-11679-00_HGf5_wspT361_coup_cui_210715.mxd

wsp

Tableau 27 Critère d'eau de surface et d'eau souterraine pour le cuivre

Milieu	Critère / TDFN	Cuivre (mg/l)
Eau souterraine	Critère RES	0,0015
	Teneur de fond	0,0026
Eau de surface	CPCO : Organismes aquatiques seulement	38
	VAFE : valeur aiguë finale à l'effluent	0,0032
	CVAA : effet aigu	0,0015
	CVAC : Effet chronique	0,0013
	CCME : Recommandations pour la qualité des eaux visant la protection de la vie aquatique – exposition court terme	0,004

La carte 15 montre une vue en plan des concentrations en cuivre simulées dans les dépôts de surface. Les résultats montrent qu'en surface, les concentrations en cuivre sont captées par les fossés pour l'ensemble des haldes de codéposition. Même après 200 ans, les concentrations en cuivre issues des infrastructures restent dans l'empreinte des haldes de codéposition. Dans le secteur de la halde nord, il est possible d'observer des concentrations en cuivre dans le milieu naturel, issues des infrastructures. La halde nord-est se trouve sur un haut topographique et bien que le débit de percolation respecte en tout temps le critère de la Directive 019, une partie des concentrations en métaux dissous percolent par le roc et fait résurgence dans les dépôts de surface. Compte tenu de la faible dureté des cours d'eau environnants, le critère pour le cuivre est très restrictif. Les concentrations issues des infrastructures seraient supérieures au critère RES (0,0015 mg/l), comme la majorité des échantillons d'eau souterraine analysés, mais seraient inférieures à la teneur de fond naturelle. De plus, ces concentrations ne seraient pas supérieures à la concentration maximale mesurée sur le site. Bien que ces concentrations soient plus élevées que le critère RES, il est important de tenir compte du fait que le modèle n'inclut aucun paramètre de retard, d'adsorption ou dégradation.

La carte 16 présente une vue en plan des concentrations en cuivre dans le roc superficiel. Comme pour les dépôts de surface, les concentrations en cuivre sont supérieures au critère RES. Pour l'ensemble des années présentées, les concentrations en cuivre sont inférieures à la teneur de fond naturelle. Il est possible d'observer les concentrations provenant de la halde nord-est migrant en direction du nord. Dans le secteur de la halde est, un panache se forme en direction du nord-ouest et un second plus petit en direction de l'est. Les concentrations de ces panaches sont inférieures à la teneur de fond naturelle en cuivre, et aucune évolution n'est observable entre l'année 100 et l'année 200. De plus, ces concentrations en cuivre ne font pas résurgence en surface dans ce secteur.

La figure 5 permet de voir en coupe l'évolution des concentrations en cuivre dans le milieu naturel dans le secteur de la halde nord-est. La concentration en cuivre commence à faire résurgence en surface et, notamment, dans le cours d'eau CE2 après 50 ans. La concentration en cuivre dans le milieu naturel est supérieure au critères RES, mais ne dépasse pas la concentration naturelle maximale mesurée sur le site.

7.3.3 EFFETS DES CONCENTRATIONS SUR LES COURS D'EAU

Les simulations prédictives de transport permettent d'évaluer les effets des infrastructures sur la qualité de l'eau souterraine faisant résurgence dans les cours d'eau.

Les haldes de codéposition n'ont aucun impact sur la qualité des cours d'eau CE1, CE3, CE4 et CE5. Seul le cours d'eau CE2 sera impacté, notamment par des concentrations provenant de la halde de codéposition nord-est. Les figures 6 et 7 montrent l'évolution des concentrations en arsenic et en cuivre provenant des eaux souterraines dans le cours d'eau CE2 en tenant compte du débit de base du modèle calibré (1034 m^3/j) et du débit moyen mesuré (14 364 m^3/j). Les résultats présentés ne tiennent pas compte des effets de mélange et des concentrations en cuivre et en arsenic présentes dans l'eau de surface. Les résultats avec le débit de base sont les plus conservateurs, car ils impliquent que le cours d'eau serait seulement alimenté par l'eau souterraine.

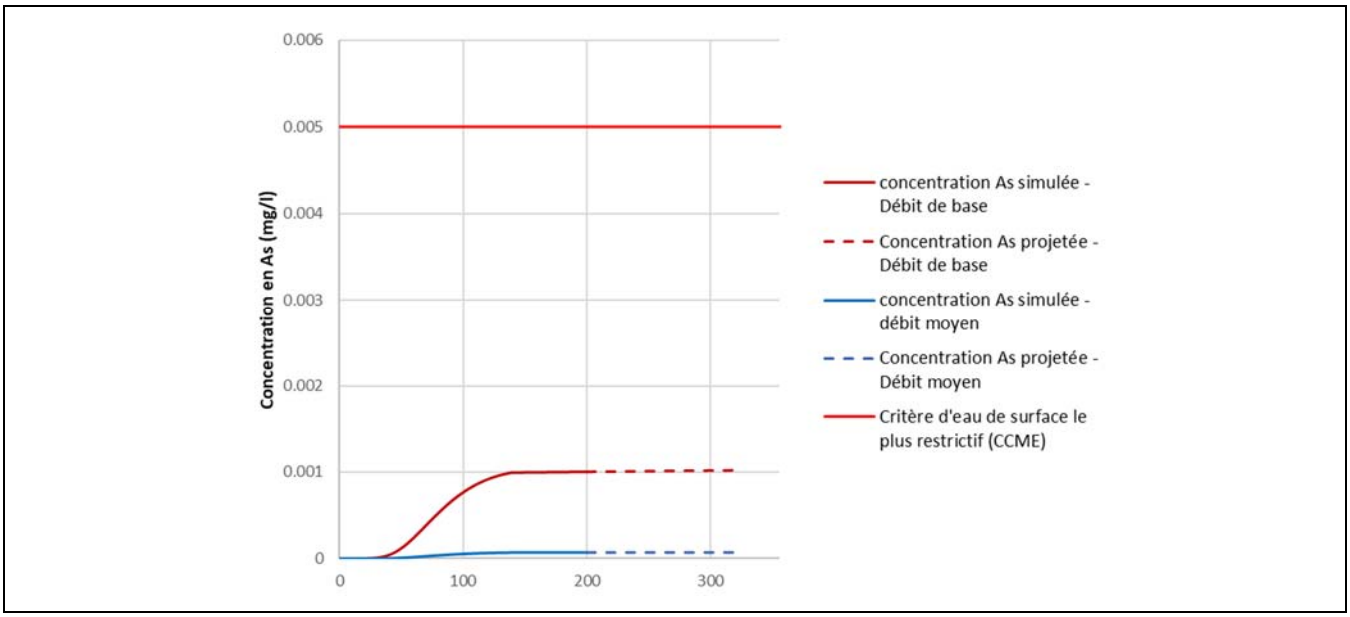


Figure 6 **Concentration en arsenic projetée (mg/l) dans le cours d'eau CE2**

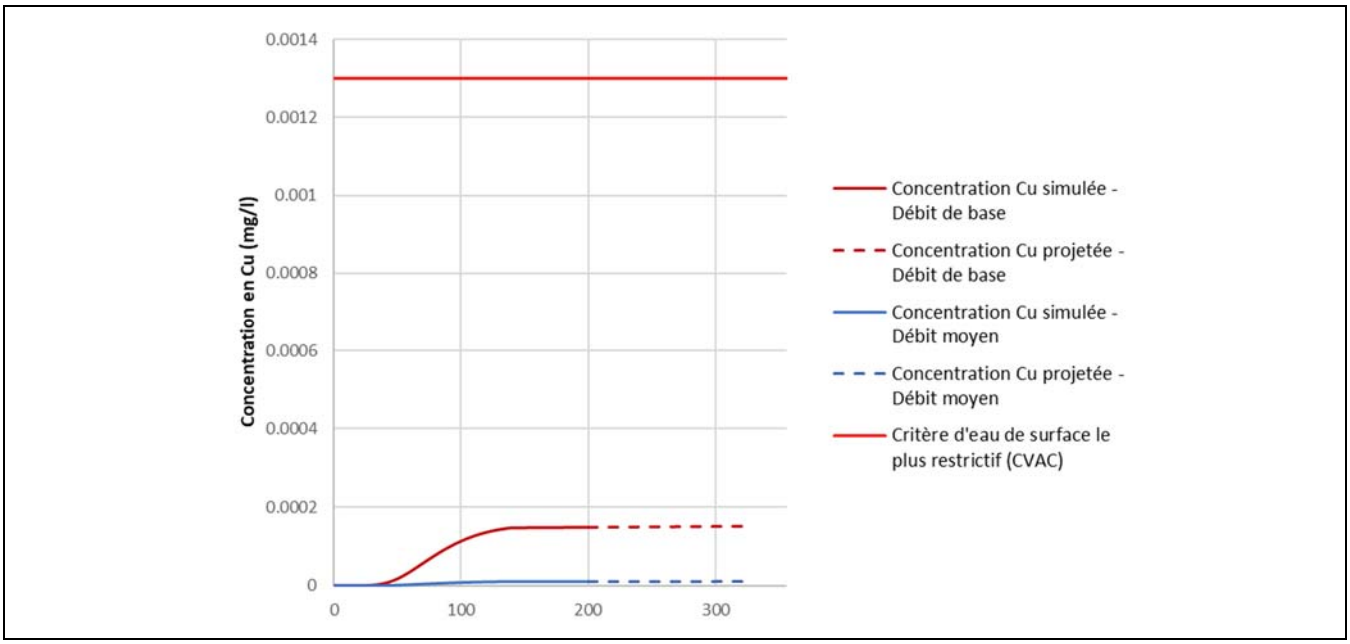


Figure 7 **Concentration en cuivre projetée (mg/l) dans le cours d'eau CE2**

Les résultats montrent que même en prenant en compte les débits de base, les concentrations simulées en arsenic et en cuivre au cours d'eau CE2 provenant des infrastructures sont inférieures au critère d'eau de surface le plus restrictif pour chacun des paramètres.

Les simulations de transport n'ayant pas de condition de retard, de dégradation ou d'absorption, il est possible d'estimer, pour l'ensemble des métaux à partir de la valeur maximale obtenue lors des essais de lixiviation, la concentration en métaux dissous projetée dans le cours d'eau CE2 issue de l'eau souterraine. Le tableau 28 présente les concentrations projetées dans le cours d'eau CE2 en considérant le débit de base. Ainsi, ces résultats ne tiennent pas compte du débit moyen du cours d'eau et des effets de mélange lorsque l'eau souterraine fera résurgence dans l'eau de surface. On remarque que même en considérant le débit de base, aucun dépassement des différents critères n'est attendu dans le cours d'eau CE2 pour l'ensemble des métaux.

Tableau 28 Concentrations projetées en métaux au cours d'eau CE2 provenant des infrastructures

Paramètre	Critère d'eau de surface (µg/L)						Concentration maximale lors des essais de lixiviation (µg/L)	Concentration maximale projetée au cours d'eau CE2 (µg/L) - Débit de base
	CPCEO[1] : Eau et organismes aquatiques	CPCO[1] : Organismes aquatiques seulement	VAFE[1] : Valeur aiguë finale à l'effluent	CVAA[1] : Effet aigu	CVAC[1] : Effet chronique	CCME[2]		
Aluminium	100	-	-	-	-	100	27500	78,9
Antimoine	6	640	2 300	1 100	240		3,6	0,010
Argent	100	11 000	0,08	0,03	0,1	0,25	0,49	0,0014
Arsenic	0,3	21	680	340	150		350	1,15
Baryum	1 000	160 000	216	108	38		121	0,35
Béryllium	4	1 200	2	1	0,1		18,5	0,053
Bore	200	160 000		28 000	5 000	1500	65	0,19
Bismuth	-	-		-	-		39,6	0,11
Calcium	-	-	-	-	-		25600	73,4
Cadmium	5	130	0,4	0,2	0,05	0,37	0,669	0,0019
Chrome	50	9 400	32	16	11	1	26,6	0,076
Cobalt	-	-	740	370	100		8,89	0,026
Cuivre	1 300	38 000	3,2	1,6	1,3	4	55,2	0,128
Étain	-	-		-	-		80,2	0,230
Fer	300	-	6 900	3400	-	300	19200	55,1
Potassium	-	-	-	-	-		16300	46,8
Magnésium	-	-	-	-	-		3800	10,9
Manganèse	50	59 000	1 102	551	255		3090	8,9
Mercure	0,0018	0,0018	3,2	1,6	0,9	0,026	0,27	0,0008
Molybdène	40	10 000	58 000	29 000	3 200	73	7,27	0,021
Nickel	70	4 600	134	67	7	150	29,1	0,08
Plomb	10	190	9	4	0,2	7,0	70,8	0,20
Sélénium	10	4 200	120	300	5		0,67	0,0019
Sodium	200 000	-	-	-	-		14000	40,2
Strontium	4 000	-	81 000	40 000	21 000		207	0,59
Thorium	0,24	0,47		47	7,2		6,1	0,017
Titane	-	-		-	-		578	1,7
Uranium	20	-	-	-	-	15	89,1	0,26
Vanadium	220	2 200		110	12		19,4	0,06
Zinc	7 400	26 000	34	17	17		366	1,05

[1] MELCC, 2021, lien : https://www,environnement.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/details.asp?code=S0119

[2] Conseil canadien des ministres de l'environnement. 1999. Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique : chrome — chrome hexavalent et chrome trivalent, dans *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement,* 1999, Winnipeg, le Conseil.

8 CONCLUSION

WSP a été mandatée afin de mettre à jour la modélisation hydrogéologique à la suite de la réalisation de nouveaux travaux d'investigation ainsi qu'au changement de la conception et de l'emplacement des infrastructures. Les objectifs de l'étude sont les suivants :

- mise à jour des caractéristiques géologique et hydrogéologique des dépôts meubles et du roc dans les secteurs choisis pour l'aménagement de la fosse et des haldes de codéposition;
- évaluer le débit de dénoyage de la fosse et étudier l'effet du cône de rabattement sur les lacs environnants ainsi que sur les cours d'eau à partir d'un modèle numérique;
- évaluer le débit de percolation sous les différentes infrastructures minières (haldes de codéposition et bassins);
- effectuer une modélisation de transport pour évaluer l'impact des haldes de codéposition sur le milieu.

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.

Les unités hydrostratigraphiques suivantes ont été identifiées :

1. tourbe;
2. sable littoral;
3. dépôts argileux;
4. till;
5. roc.

8.1 MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE

La calibration du modèle hydrogéologique a permis de préciser les paramètres hydrogéologiques du site et de confirmer la nature des liens hydrauliques entre les différentes unités hydrostratigraphiques. Le modèle a été calibré à partir de données de niveaux d'eau provenant de 48 puits de la zone à l'étude ainsi qu'à partir des données d'analyse hydrologique associées à quatre stations de débits d'eau de surface (débits estimés). La calibration des charges hydrauliques a été réalisée en présumant que les élévations piézométriques mesurées en mai 2018 et les niveaux de janvier 2021 pour les puits réalisés par SNC-Lavalin étaient représentatives du niveau statique et que les débits d'étiage estimés des cours d'eau (WSP, 2018a) étaient représentatifs des débits de base simulés. Les principales conclusions de la calibration sont les suivantes :

- Le modèle en régime permanent calibré obtenu représente de façon satisfaisante les conditions existantes au site et celui-ci répond aux normes de l'industrie (NRMS = 2,9 %).
- Une meilleure calibration des charges hydrauliques a été obtenue lorsqu'on considère des zones de faible conductivité hydraulique au pourtour de la fosse, ces zones ne suivent donc pas exactement les limites lithologiques présentées sur la carte géologique (voir carte 11).

— Une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'étudier l'incertitude liée à la variation de certains paramètres du modèle. Le modèle est sensible à la variation de la conductivité hydraulique du roc et à la variation de la recharge, mais les modifications diminuent la qualité de la calibration.

— L'analyse de sensibilité a également montré que les zones de conductivité hydraulique ne suivent pas exactement les limites des unités géologiques définies par SIGEOM et la géologie définie par Galaxy. En effet, les charges hydrauliques simulées, en considérant une conductivité hydraulique unique pour chacune des unités géologiques, ne reproduisaient pas de façon satisfaisante les charges hydrauliques observées. La calibration des données était donc moins bonne que le modèle calibré initial pour lequel les limites des zones de conductivités hydrauliques ont été modifiées en fonction des données de terrain.

— Dans l'ensemble, le régime d'écoulement suit la topographie du site. Le secteur de la future fosse constitue une zone de recharge avec une élévation piézométrique maximale de 225 m. L'eau souterraine de ce haut piézométrique s'écoule majoritairement vers le cours d'eau CE3 au nord et vers le cours d'eau CE5 au sud. La faible perméabilité de la pegmatite et de l'argile freine l'écoulement et favorise un rehaussement du niveau d'eau.

— Les zones de recharge préférentielles se trouvent en sommet de colline (100 à 300 mm/an).

— Pour les zones de résurgence et d'exfiltration, une recharge plus faible a été appliquée (10 à 50 mm/an).

Les simulations numériques en régime transitoire ont été complétées afin de représenter l'évolution de la mine pendant les opérations.

8.2 IMPACTS ANTICIPÉS DES INFRASTRUCTURES

IMPACTS LIÉS AU DÉNOYAGE DE LA FOSSE

Les principales conclusions sont les suivantes :

— La quantité d'eau pompée à l'intérieur de la fosse est d'environ 1 000 m^3/j à la fin de l'exploitation. Le volume maximal pompé est obtenu à l'année 12, avant que le pompage ne soit arrêté dans JB-3 avec environ 1500 m^3/j. L'apport d'eau provenant des eaux souterraines varie représente entre 18 et 29 % de l'eau pompée selon les années. Les faibles débits provenant de l'eau souterraine s'expliquent par la faible perméabilité de l'unité 4.2.

— Selon les résultats obtenus, à la fin de l'exploitation, il est estimé que le rabattement de la nappe serait quasiment nul à environ 2 km à l'est de la fosse. Pour les secteurs sud et ouest, le rabattement serait quasiment nul à une distance variant entre 500 et 900 m des parois de la fosse. Dans le secteur nord-ouest, le bassin de rétention créera localement une légère augmentation du niveau de la nappe d'eau souterraine, d'environ 0,5 m.

— En fonction des rabattements obtenus, l'impact sur les puits d'alimentation en eau potable du relais routier serait négligeable.

— Les résultats montrent que l'impact sur les lacs et les cours d'eau varient entre 1 et 64 % par rapport au débit de base et entre 0 et 2 % par rapport au débit moyen. La contribution des eaux souterraines au débit de base du cours d'eau CE4 deviendrait très faible.

— Le lac Kapisikama, qui se situe à moins de 200 m de la fosse, sera impacté. En effet le lac ne sera plus alimenté par la nappe d'eau souterraine à partir de l'année 4. La superficie de son bassin versant sera également fortement réduite. De plus, ce lac sera drainé au début des opérations pour fournir de l'eau lors de l'aménagement des infrastructures.

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

- Les valeurs de débits anticipés montrent que plus la conductivité du roc augmente plus les apports d'eau souterraine à la fosse sont élevés. Ainsi, dans l'éventualité où la valeur de la conductivité du roc serait deux fois plus élevée que le scénario initial (meilleure calibration), on obtiendrait un débit de dénoyage moyen de 2 256 m^3/j (SS3) et de 2 926 m^3/j (SS4). Dans l'éventualité où la conductivité de l'unité 4.2 était un ordre de grandeur plus élevée (SS7) on obtiendrait un débit de dénoyage moyen de 3 336 m^3/j.
- Les résultats du scénario SS8 montrent que si la répartition des conductivités hydrauliques suivait plus la géologie, les apports d'eau souterraine seraient multipliés par 2 par rapport au modèle calibré et représenteraient 37 % des venues d'eau dans la fosse.

En conclusion, selon les résultats obtenus lors des différentes simulations, ainsi que lors de l'étude de sensibilité, les débits de dénoyage anticipés totaux, à la fin de l'exploitation, se situeraient entre 1 000 et 3 300 m^3/j. Les résultats montrent que l'impact sur les lacs et les cours d'eau correspondrait à une diminution entre 1 et 64 % par du débit de base, soit une réduction entre 0 et 2 % du débit moyen.

DÉBIT DE PERCOLATION SOUS LES INFRASTRUCTURES

Les résultats montrent que sous les haldes à stériles et résidus miniers, les débits verticaux vers les couches sous-jacentes respectent la norme de débit de percolation de 3,3 L/m^2 par jour fixée par la Directive 019. Le débit de percolation sous les deux haldes à stériles et résidus miniers varie entre 0,05 et 0,26 L/m^2 par jour. Sous le bassin principal et sous le bassin secondaire, le débit de percolation respecte la norme de débit de percolation fixée par la Directive 019. Il est important de préciser que sous le bassin principal, le débit de percolation respecte le critère seulement si une couche d'argile imperméabilisante d'au moins 0,5 m est mise en place dans le fond du bassin.

IMPACT DES HALDES DE CODÉPOSITION SUR LE MILIEU NATUREL

Une modélisation du transport de métaux dissous visant à vérifier les effets des haldes de codéposition sur le milieu naturel a été réalisée. Ainsi, les mécanismes de transport représentés dans les simulations réalisées sont l'advection, la dispersion et la diffusion d'une phase dissoute dans les empreintes des futures haldes. Les mécanismes générateurs de cette phase dissoute (source), ainsi que les phénomènes d'enrichissement, de lixiviation (transport réactif) et de retardation (sorption) ne sont pas considérés. Néanmoins, les résultats obtenus permettent d'apprécier l'évolution des conditions en métaux dissous dans l'eau souterraine issue des futures infrastructures.

Une analyse a été réalisée pour l'arsenic et le cuivre. Pour l'arsenic comme pour le cuivre, les résultats montrent que la majorité des concentrations en métaux dissous est captée par les fossés.

Dans le secteur de la halde nord, une partie des concentrations en métaux dissous percolent par le roc et fait résurgence dans les dépôts de surface. Les concentrations en arsenic sont en tout temps inférieures au critère RES et même inférieures à la teneur de fond estimée en 2018. Pour le cuivre, les concentrations sont supérieures au critère RES dans ce secteur, mais ne dépasse pas la concentration maximale mesurée dans l'eau souterraine.

Les haldes de codéposition n'ont aucun impact sur la qualité des cours d'eau CE1, CE3, CE4 et CE5. Seul le cours d'eau CE2 sera impacté, notamment par des concentrations provenant de la halde de codéposition nord-est. Les résultats montrent que même en prenant en compte les débits de base, les concentrations simulées en arsenic et en cuivre au cours d'eau CE2, provenant des infrastructures, sont inférieures au critère d'eau de surface le plus restrictif pour chacun des paramètres.

Les simulations de transport n'ayant pas de condition de retard, de dégradation ou d'absorption, il est possible d'estimer, pour l'ensemble des métaux à partir de la valeur maximale obtenue lors des essais de lixiviation, la concentration en métaux dissous projetée dans le cours d'eau CE2 issue de l'eau souterraine. On remarque que même en considérant le débit de base, aucun dépassement des différents critères n'est attendu dans le cours d'eau CE2.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BANTON O., BANGOY L. M. Hydrogéologie : multisciences environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université du Québec. Québec, 1999, 460 p.
- BROSSEAU, D. 2008. Caractérisation des dépôts meubles et reconstitution paléogéographique quaternaire de la région du réservoir Eastmain 1, Baie James, Québec. Mémoire de maîtrise, UQAM. 96 p. et annexes.
- BOUWER, J. et C. RICE. 1976. A slug test for determinig hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Ressources Research. V. 12 pp. 423-428.
- DE MARSILY, 1986, *Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers*, Edition 2, University of Michigan, Academic Press, 1986
- DEVLIN, J.F. 2015. HydrogeoSieveXL: an Excel-based tool to estimate hydraulic conductivity from grain-size analysis. Hydrogeology Journal, 23(4), p. 837-844.
- DEVLIN, J.F. 2016. *HydrogeoSieveXL 2.1*. Department of Geology, University of Kansas.
- DRISCOLL, F.G. 1986. Groundwater and wells, second Edition, Johnson Screens, St Paul, 1089.
- GMSI. (2020). *All site – General- Key Plan - Plan View.* Plan produit pour Galaxy Lithium Canada Inc. No.ref. 001-GE-DWG-0001-C3
- GOLDER INC. (2020). *James Bay Project – 2020 Value engineering.* Rapport produit pour Galaxy Lithium Canada Inc. 17 pages et annexes. No. ref. 19135464.
- LALLEMAND-BARRCS, A., and P. Peaudecerf, 1978, *Recherche des relations entre Ia valeur de Ia dispersivité macroscopique d'un aquifère, ses autres caractéristiques et les conditions de mesure*, Bull. Bur. Rech. Geol. Min., Sect. J, 4.
- LI, T. ET J.P. DUCRUC, 1999. Les provinces naturelles. Niveau I du cadre écologique de référence du Québec. Ministère de l'Environnement. 90 p.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC (MDDEP), 2012. *Directive 019 sur l'industrie minière – version mars 2012.* Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs.
- MDDEFP. 2013. *Critères de qualité de l'eau de surface.* Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Québec. 508 p. et annexes.
- MEF. 1999. *Guide de classification des eaux souterraines du Québec*. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Québec. 12 p.
- MDDELCC. 2015e. *Critères de la qualité de l'eau de surface.* Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 508 p. et annexes. Consulté en ligne au http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.asp
- MORRIS, D.A. AND JOHNSON, A.I. (1967) *Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials, as Analyzed by the Hydrologic.* Laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-1960. USGS Water Supply Paper: 1839-D.

- MOUKHSIL ET AL., 2003. Synthèse géologique et métallogénique de la ceinture de roches vertes de la Moyenne et de la basse Eastmain (Baie-James). Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Québec; ET 2002-06, 55 p., 1 plan.
- MTMDET, 2017. *Tome III – Ouvrages d'art, chapitre 4.* Publication Québec
- SIGEOM. 2018. *Cartes géologiques* (feuillets 033C03 et 033C06).
- SNC-LAVALIN. 2021. *James Bay Lithium Mine Project Detailed Geotechnical Investigation – Phases 2 and 3.* Technical Report. 63 p. et ann.
- SNC-LAVALIN. 2020. *James Bay Lithium Mine Project Detailed Geotechnical Investigation – Phase 2*. 137 p. et ann.
- THEIS. C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Trans American Geophysical Union, 16 th Annual Meeting, Part 2. pp. 519 524.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publication in Climatology 10: 185-311.
- WSP. 2018a. *Mine de Lithium Baie James – Étude spécialisée en hydrologie.* Rapport produit pour Galaxy Lithium (Canada) Inc. 21 p. et annexes.
- WSP. 2018b. Carte détaillée des dépôts de surface et propositions de bancs d'emprunt. Mine de lithium Baie-James. Rapport produit pour Galaxy Lithium (Canada) Inc. 23 p.et annexes.
- WSP. 2018c. ÉTUDE SPÉCIALISÉE SUR L'HYDROGÉOLOGIE. Mine de lithium Baie-James. Rapport produit pour Galaxy Lithium (Canada) Inc. 101 p.et annexes.

ANNEXE

A

DESIGN DE LA HALDE DE MORT TERRAIN ET DU BASSIN PROVENANT DE GOLDER (2020)

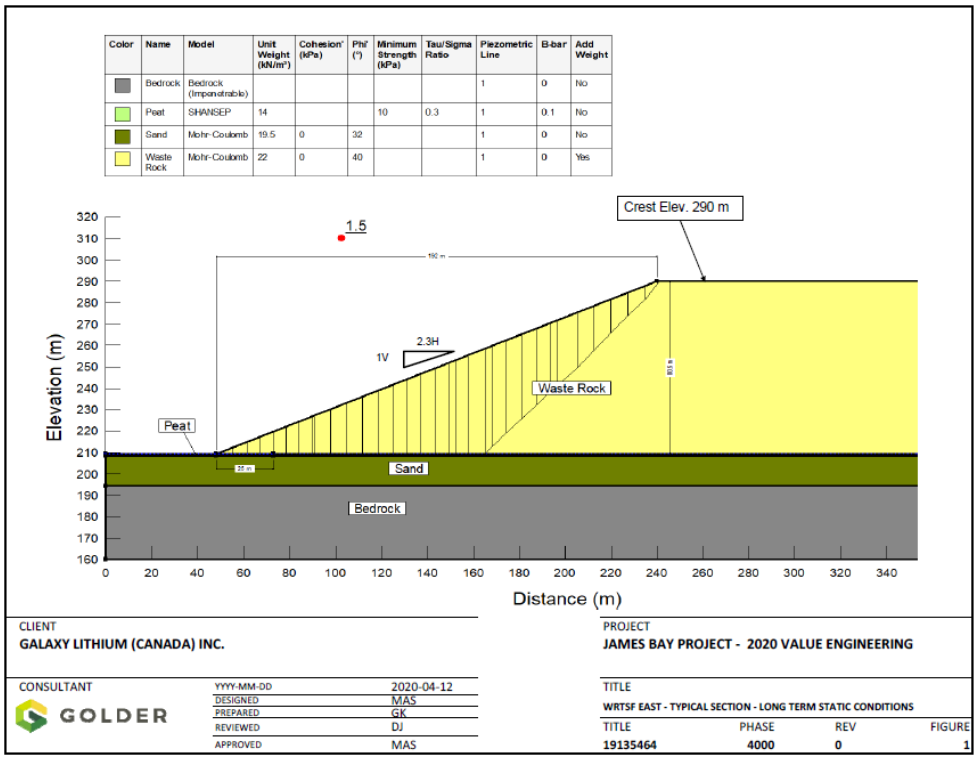


Figure 1 Section type du pied de la halde à matière organique et dépôts meubles, dans le secteur de la berme stabilisatrice de remblai de roches stériles (design provenant de Golder, 2020)[1]

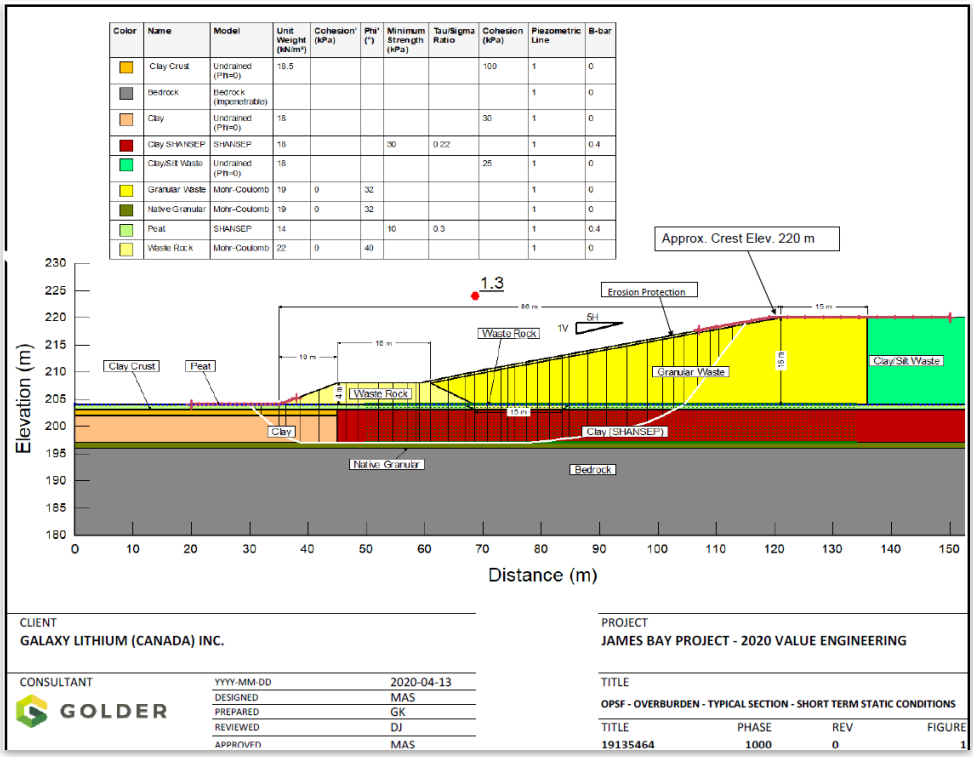


Figure 2 Section type de la halde à matière organique et dépôts meubles (design provenant de Golder, 2020)[1]

[1] Les coupes types de Golder visent à représenter une coupe générale de l'ensemble des haldes à des fins de vérification de leur stabilité. Les épaisseurs des unités hydrostratigraphiques pourraient ne pas être identiques à celles construites à partir de l'interpolation des épaisseurs mesurées en forage dans le secteur projeté des installations, tel que dans le modèle conceptuel 3D élaboré avec le logiciel Feflow.

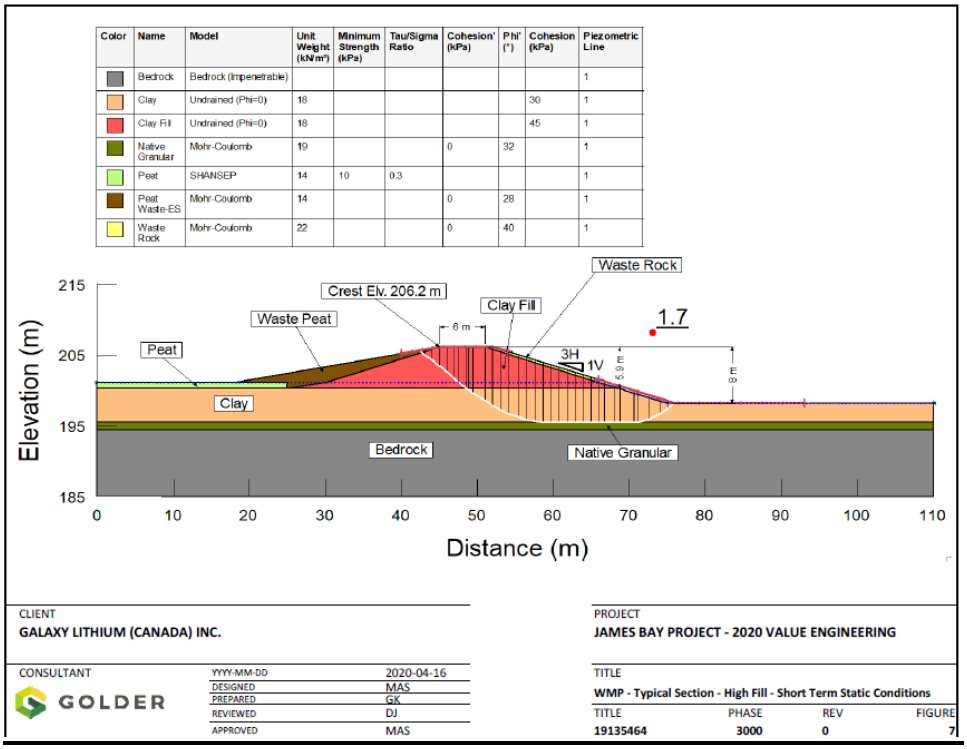


Figure 3. Section type de la digue du bassin de rétention (design provenant de Golder, 2020)[2]

[2] Les coupes types de Golder visent à représenter une coupe générale de l'ensemble des haldes à des fins de vérification de leur stabilité. Les épaisseurs des unités hydrostratigraphiques pourraient ne pas être identiques à celles construites à partir de l'interpolation des épaisseurs mesurées en forage dans le secteur projeté des installations, tel que dans le modèle conceptuel 3D élaboré avec le logiciel Feflow.