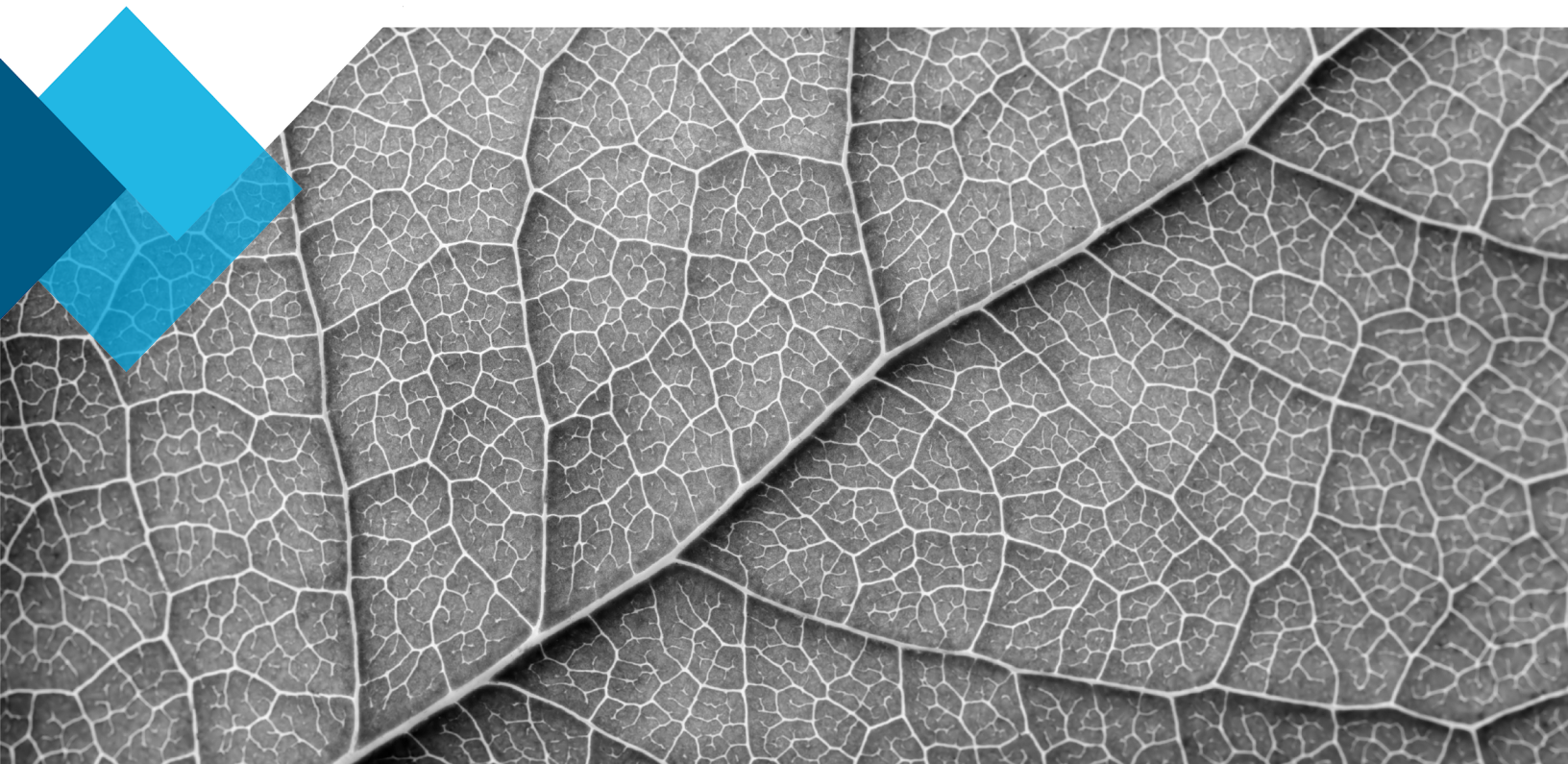




Projet Matawinie

Mise à jour du modèle hydrogéologique FEFLOW

Nouveau Monde Graphite inc.



Environnement et géosciences

février | 2020

Rapport
Ref. Interne N/Dossier n° : 669870 - N/Document n° : 669870-EG-L01-01-rev01

Projet Matawinie

Mise à jour du modèle hydrogéologique FEFLOW

Nouveau Monde Graphite inc.
331, rue Brassard
Saint-Michel-des-Saints (Québec) J0K 3B0

Préparé par :

Vérifié par :

Emmanuelle Millet, M.Sc.
Chargée de projet

Stéfan Foy, ing., M.Sc.
Directeur de projet
No de membre de l'OIQ : 124366

N/Dossier n° : 669870
N/Document n° : 669870-EG-L01-01-rev-01

Février 2020

Distribution : Mme Martine Paradis (NMG) (version électronique)



Table des matières

1	Introduction	1
2	Modèle hydrogéologique conceptuel	2
2.1	Piézométrie du site en 2019	2
2.2	Ajouts des données de conductivité hydraulique mesurées en 2019	5
2.3	Hydrostratigraphie du modèle	6
3	Modélisation de l'écoulement	10
3.1	Conditions limites	10
3.2	Calibration	11
3.2.1	Conductivités hydrauliques calibrées	12
3.2.2	Recharge calibrée	13
3.2.3	Piézométrie simulée et droite de calibration	15
3.2.4	Bilan d'eau du modèle	18
4	Dénoyage des phases 1 à 5	21
4.1	Débits de dénoyage pour chaque phase	21
4.2	Cartes d'isocontours de rabattements	21
5	Remontée du niveau d'eau dans la phase 5	27
5.1	Porosité efficace des unités	27
5.2	Estimation du temps de remontée du niveau d'eau dans la phase 5	30
6	Conclusions	33
7	Références	35

Liste des figures

Figure 2-1	Piézométrie du site (novembre 2019)	4
Figure 2-2	Conductivité hydraulique mesurée en fonction de la profondeur	8
Figure 2-3	Conductivité hydraulique mesurée en fonction de la profondeur à deux forages profonds	9
Figure 3-1	Conditions limites du modèle	11
Figure 3-2	Distribution de la conductivité hydraulique K en coupe, exagération verticale x 4	13
Figure 3-3	Zones de recharge calibrées (mm/an) et élévation (isolignes en mètre)	14
Figure 3-4	Droite de calibration montrant l'écart en les charges observées et simulées	16
Figure 3-5	Piézométrie simulée (en noir) et mesurée (en rouge)	17
Figure 4-1	Rabattements simulés à l'année 5	22
Figure 4-2	Rabattements simulés à l'année 8	23
Figure 4-3	Rabattements simulés à l'année 15	24
Figure 4-4	Rabattements simulés à l'année 20	25
Figure 4-5	Rabattements simulés à l'année 26	26
Figure 5-1	Porosité du roc par intervalle de profondeur de 20 m, d'après l'analyse des géocaméras	28
Figure 5-2	Courbes de rétention des résidus PAG et NAG, (SLI, 2019c)	29
Figure 5-3	Charges simulées à t = 26 ans, à la fin du dénoyage de la phase 5 (a) coupe longitudinale et (b) coupe transversale à la fosse	31
Figure 5-4	Remontée du niveau simulée dans la phase 5 en fonction du temps	32

Liste des tableaux

Tableau 2-1	Distribution de la conductivité hydraulique dans le roc et les dépôts meubles	5
Tableau 2-2	Conductivités hydrauliques mesurées par unité hydrostratigraphique	9
Tableau 3-1	Conductivités hydrauliques calibrées versus mesurées	12
Tableau 3-2	Bilan d'eau du modèle numérique et conceptuel	18
Tableau 4-1	Débits de dénoyage simulés pour chaque phase d'exploitation	21
Tableau 5-1	Porosité efficace des unités	30

Liste des annexes

Annexe A

Détail du calcul d'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE)

Annexe B

Maillage du modèle numérique Feflow

Annexe C

Piézométrie calibrée en coupe

Annexe D

Rabattements simulés en coupe

Annexe E

Élévations simulées du niveau de la nappe pendant les phases de dénoyage

Annexe F

Portée du rapport

Ce rapport est composé de 64 pages incluant les annexes et ne peut être reproduit en tout ou en partie sans l'autorisation de SNC-Lavalin GEM Québec inc.

1 Introduction

En 2017, SNC-Lavalin a été mandatée par Nouveau Monde Graphite inc. (NMG) pour réaliser une étude hydrogéologique (SLI 2018a) pour le site du gisement de graphite du projet Matawinie. En s'appuyant sur les données acquises lors de la campagne de terrain de 2017, l'étude visait à recueillir l'information géologique et hydrogéologique nécessaire à la description de l'état de référence initial du site et à l'évaluation des impacts potentiels tels que les activités de dénoyage de la mine à ciel ouvert sur les milieux récepteurs ainsi que la disposition des résidus miniers.

Dans cette optique, un modèle hydrogéologique en trois dimensions a été construit avec le logiciel Feflow (DHI-WASY GmbH) pour réaliser l'estimation des débits de dénoyage et la simulation du transport de métaux dissous venant de la fosse et de la halde.

En se basant sur les recommandations de l'étude préliminaire, une campagne hydrogéologique complémentaire géotechnique et hydrogéologique a été réalisée durant l'été 2019 (SLI 2019a). Les principaux travaux comprenaient la réalisation d'essais de perméabilité en profondeur, d'un essai de pompage, de relevés par géocaméra ainsi que des relevés de niveaux d'eau.

À partir des nouvelles données de terrain, une mise à jour du modèle hydrogéologique a été réalisée. Les éléments mis à jour sont présentés dans les sections suivantes et comprennent notamment :

- › La mise à jour des conductivités hydrauliques du modèle;
- › La mise à jour de la porosité efficace du roc, des stériles et des résidus;
- › La mise à jour de la distribution de la recharge;
- › La calibration sur la base des nouvelles données piézométriques;
- › La mise à jour des débits de dénoyage de chaque phase en régime permanent;
- › La mise à jour des cartes de rabattement pour chaque phase.

Cette note étant une mise à jour de l'étude réalisée en 2018, certains éléments d'analyse plus détaillés se trouvent dans le rapport de modélisation (SLI, 2019b).

2 Modèle hydrogéologique conceptuel

2.1 Piézométrie du site en 2019

La figure 2-1 présente la piézométrie issue du krigeage de 66 mesures de niveau d'eau recueillies en octobre 2019 au site minier. Le détail de l'information concernant les forages se trouve dans le rapport factuel des données de terrain (SLI, 2019a). Les mesures ont été réalisées au niveau de forages situés dans les dépôts meubles et dans le roc, et les niveaux d'eau varient entre 461 m (à F-18A-19) et 574 m d'élévation (à GT-17-19).

Afin de réaliser l'interpolation des données piézométriques, la méthodologie suivante a été appliquée :

- › Utilisation des coordonnées XYZ du milieu de la crépine pour les forages aménagés avec des tubages PVC, et
- › Utilisation des coordonnées XYZ du milieu de la portion ouverte au roc pour les forages exploratoires.

À noter que les forages miniers étant forés avec un angle de 45 degrés, une correction a été appliquée pour obtenir les coordonnées utilisables pour la carte piézométrique et la calibration.

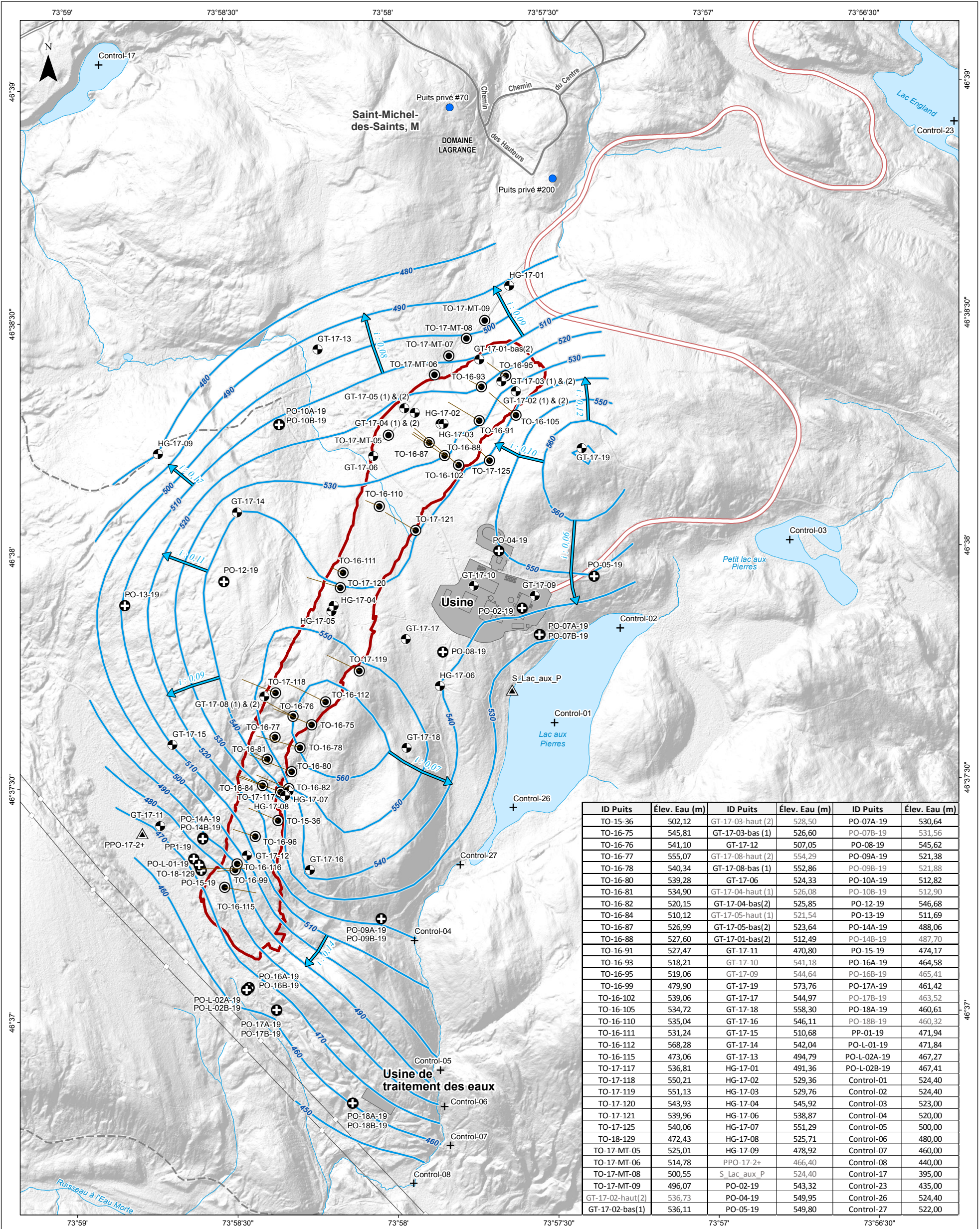
Afin de traiter les données en vue de l'interpolation, les étapes suivantes ont ensuite été réalisées :

- › Pour les puits multiniveaux, seule la mesure du niveau d'eau dans le roc a été conservée. Les valeurs des niveaux d'eau dans les dépôts meubles ont été écartées lors de l'interpolation lorsque qu'un puits à double niveau, crépiné au niveau des dépôts meubles et du roc, était présent au même endroit. En l'absence de puits installé dans le roc dans certains secteurs du site, les niveaux d'eau présents dans les dépôts meubles ont été conservés dans l'interpolation.
- › Les valeurs de niveau d'eau ayant un écart de plus de 5 m entre les données de novembre 2017 et octobre 2019 ont été écartées, soient 12 valeurs retirées. Le pompage sporadique d'une faible quantité d'eau dans certains forages d'exploration existants était effectué en 2017 et cette eau était utilisée pour le forage de nouveaux puits. Les écarts entre les valeurs de 2017 et 2019 seraient associés à des niveaux d'eau n'ayant pas retrouvé l'équilibre après leur pompage et lors du relevé piézométrique.
- › Ajout de 27 points de contrôle (élévation du niveau d'eau de certains lacs et cours d'eau majeurs) pour contraindre le krigeage de la piézométrie.

Les zones où les élévations de la nappe dans le roc sont les plus élevées constitueraient des zones de recharge privilégiées de l'aquifère de roc. Des conditions artésiennes de la nappe au roc sont également observées au nord-est et sud-ouest du gisement, en bas de pente ou près des cours d'eau ou étendues d'eau. À l'échelle locale, c'est-à-dire à l'échelle du site (Figure 2-1), la nappe est en forme de dôme dont le sommet est situé à l'endroit du gisement et de la future halde de mort terrain.

Dans les conditions actuelles, l'écoulement de l'eau souterraine s'effectue donc de manière radiale à partir de ces sommets, suivant le relief du sol et orienté à la fois vers l'est (lac aux Pierres) vers le sud (ruisseau à l'Eau Morte), vers le nord (Domaine Lagrange) et vers l'ouest (Rivière-Matawin, à une plus grande distance).

À l'échelle régionale des sous-bassins versants (BV) de la zone d'étude, la composante principale de l'écoulement d'eau souterraine serait orientée vers le nord-ouest, en direction de la Rivière-Matawin (SLI, 2018a). Ceci est validé par les données de SIH (Système d'Information Hydrogéologique) et des relevés de niveaux d'eau dans les puits privés situés en aval, entre le gisement et la Rivière-Matawin. En effet, les élévations d'eau souterraine dans ces puits privés sont relativement plus basses (entre 531 et 369 m).



ID Puits	Élev. Eau (m)	ID Puits	Élev. Eau (m)	ID Puits	Élev. Eau (m)
TO-15-36	502,12	GT-17-03-haut (2)	528,50	PO-07A-19	530,64
TO-16-75	545,81	GT-17-03-bas (1)	526,60	PO-07B-19	531,56
TO-16-76	541,10	GT-17-12	507,05	PO-08-19	545,62
TO-16-77	555,07	GT-17-08-haut (2)	554,29	PO-09A-19	521,38
TO-16-78	540,34	GT-17-08-bas (1)	552,86	PO-09B-19	521,88
TO-16-80	539,28	GT-17-06	524,33	PO-10A-19	512,82
TO-16-81	534,90	GT-17-04-haut (1)	526,08	PO-10B-19	512,90
TO-16-82	520,15	GT-17-04-bas(2)	525,85	PO-12-19	546,68
TO-16-84	510,12	GT-17-05-haut (1)	521,54	PO-13-19	511,69
TO-16-87	526,99	GT-17-05-bas(2)	523,64	PO-14A-19	488,06
TO-16-88	527,60	GT-17-01-bas(2)	512,49	PO-14B-19	487,70
TO-16-91	527,47	GT-17-11	470,80	PO-15-19	474,17
TO-16-93	518,21	GT-17-10	541,18	PO-16A-19	464,58
TO-16-95	519,06	GT-17-09	544,64	PO-16B-19	465,41
TO-16-99	479,90	GT-17-19	573,76	PO-17A-19	461,42
TO-16-102	539,06	GT-17-17	544,97	PO-17B-19	463,52
TO-16-105	534,72	GT-17-18	558,30	PO-18A-19	460,61
TO-16-110	535,04	GT-17-16	546,11	PO-18B-19	460,32
TO-16-111	531,24	GT-17-15	510,68	PP-01-19	471,94
TO-16-112	568,28	GT-17-14	542,04	PO-L-01-19	471,84
TO-16-115	473,06	GT-17-13	494,79	PO-L-02A-19	467,27
TO-17-117	536,81	HG-17-01	491,36	PO-L-02B-19	467,41
TO-17-118	550,21	HG-17-02	529,36	Control-01	524,40
TO-17-119	551,13	HG-17-03	529,76	Control-02	524,40
TO-17-120	543,93	HG-17-04	545,92	Control-03	523,00
TO-17-121	539,96	HG-17-06	538,87	Control-04	520,00
TO-17-125	540,06	HG-17-07	551,29	Control-05	500,00
TO-18-129	472,43	HG-17-08	525,71	Control-06	480,00
TO-17-MT-05	525,01	HG-17-09	478,92	Control-07	460,00
TO-17-MT-06	514,78	PPO-17-2+	466,40	Control-08	440,00
TO-17-MT-08	500,55	S Lac aux P	524,40	Control-17	395,00
TO-17-MT-09	496,07	PO-02-19	543,32	Control-23	435,00
GT-17-02-haut(2)	536,73	PO-04-19	549,95	Control-26	524,40
GT-17-02-bas(1)	536,11	PO-05-19	549,80	Control-27	522,00

Type de puits

- Forage minier exploratoire
- Trace du forage incliné
- Forage hydrogéologique et géotechnique
- Pointe filtrante
- Puits d'observation à double niveau
- Puits privé relevé

Piezométrie

- Isopieze (m) - Roc
- Direction d'écoulement de l'eau souterraine
- Élévation d'eau souterraine dans le roc (m)
- Données utilisées pour interpolation
- Données écartées pour interpolation

Composantes du projet (2026)

- Fosse
- Concentrateur et installations connexes
- Route d'accès

Infrastructures

- Route principale
- Route locale
- Chemin forestier carrossable
- Ligne de transport d'électricité

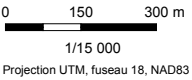
Note: Dans le cas des forages inclinés, la valeur d'élévation de l'eau souterraine a été attribuée à la position du milieu de la portion du forage qui est ouverte au roc.



PROJET MATAWINIE
Étude d'impact environnemental et social

Mise à jour de la modélisation hydrogéologique - NMG
Carte piézométrique - Automne 2019

Sources :
BDTQ, 1/20 000, MRNF Québec, 2007
BDTA, 1/250 000, MRN Québec, 2002
Adresses Québec, MERN Québec, 2017
Carte écoforestière, 4e inventaire, MRN Québec, 2013
Projet : 666896
Fichier: snc669870_EG_L01_C2-1_Piezo_2019_200127_00.mxd



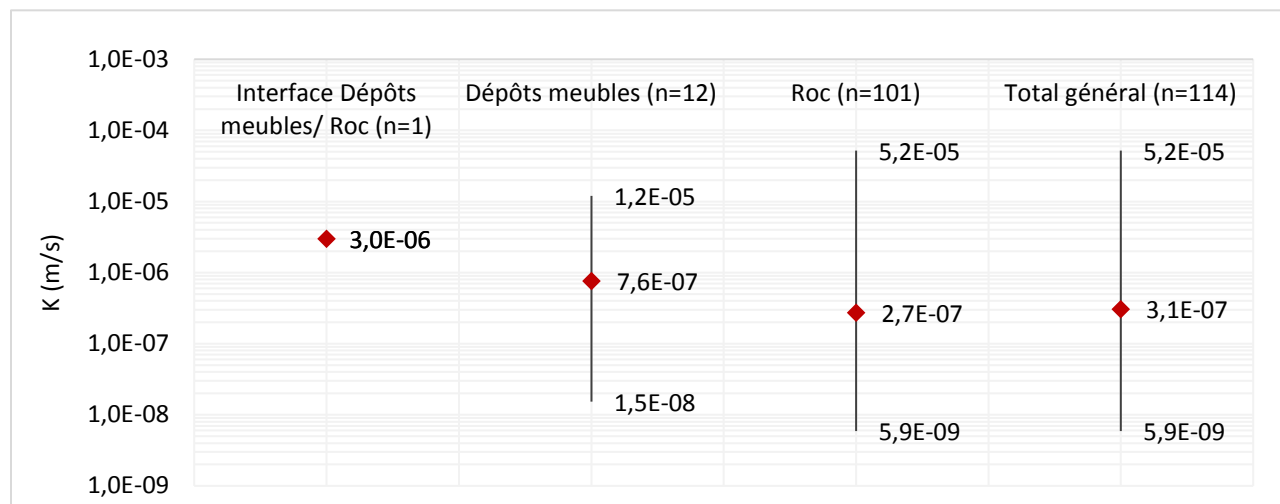
2.2 Ajouts des données de conductivité hydraulique mesurées en 2019

Entre 2016 et 2017, différents types d'essais in situ (essais « lugeon », essais de pompage, « slug » tests) ont permis de recueillir 91 données de conductivité hydraulique du roc et des dépôts meubles au niveau du site. Ces données sont majoritairement issues de forages localisés au niveau du gisement. En 2019, de nouvelles données de terrain ont été recueillies afin de compléter l'information à l'extérieur du gisement et en profondeur, formant un total de 114 mesures réparties de la façon suivante :

- › (101) dans le roc;
- › (12) dans les dépôts meubles;
- › (1) à l'interface des dépôts meubles et du roc.

Le tableau 2-1 présente les valeurs de conductivité hydraulique minimales, maximales et les moyennes géométriques pour les données de roc et les dépôts meubles. La distribution des données du roc est plus étalée que celle des dépôts meubles, avec des valeurs variant entre $5,9 \times 10^{-9}$ et $5,2 \times 10^{-5}$ m/s, contre $1,5 \times 10^{-8}$ et $1,2 \times 10^{-5}$ m/s pour les dépôts meubles.

Tableau 2-1 Distribution de la conductivité hydraulique dans le roc et les dépôts meubles



L'ajout des données recueillies en 2019 a permis d'étendre et mieux définir la plage de conductivités hydrauliques mesurées, pour le roc et les dépôts meubles. En ce qui concerne les dépôts meubles, on note que la valeur maximale mesurée a augmenté, passant de $2,3 \times 10^{-6}$ à $1,2 \times 10^{-5}$ m/s, soit presque un ordre de grandeur (SLI, 2019b). En ce qui concerne le roc, la valeur maximale mesurée en 2019 reste similaire à celle des années antérieures avec $5,2 \times 10^{-5}$ (mesurée à F-10A-2019, à 5 m de profondeur dans le secteur sud) contre $1,6 \times 10^{-5}$ (mesurée à GT-17-17 (à 6 m de profondeur dans le secteur centre-est) respectivement. Pour le roc ou pour les dépôts meubles, les valeurs minimales mesurées restent presque identiques.

La variabilité de la conductivité hydraulique du roc (incluant le gisement) est plus importante que celle des dépôts meubles, mais les valeurs des moyennes géométriques de ces deux unités restent relativement similaires : $7,6 \times 10^{-07}$ m/s pour le roc et $2,7 \times 10^{-07}$ m/s pour les dépôts meubles.

Afin de définir les unités hydrostratigraphiques du modèle, une analyse de la conductivité hydraulique en fonction de la profondeur a été réalisée dans la section suivante.

2.3 Hydrostratigraphie du modèle

Les unités hydrostratigraphiques représentent des formations géologiques ayant des propriétés hydrauliques similaires qui peuvent être représentées par une même unité dans un modèle hydrogéologique.

De manière générale, l'analyse des données de conductivité hydraulique en fonction de la profondeur (Figure 2-2) indique que la gamme de valeurs mesurées est relativement étendue en surface, particulièrement pour le roc, avec un intervalle compris entre $1,0 \times 10^{-08}$ et $5,0 \times 10^{-05}$ m/s, puis diminue avec la profondeur.

Les unités hydrostratigraphiques peuvent être définies de la manière suivante dans le modèle :

- › **Les dépôts meubles**, de 0 à 10 m de profondeur au niveau du gisement, qui correspondent à l'intervalle le plus perméable, avec une valeur de conductivité hydraulique moyenne de $6,5 \times 10^{-07}$ m/s. Cet horizon peut aussi bien correspondre à du roc de surface altéré, qu'à des dépôts meubles. L'épaisseur des dépôts est plus faible sur les hauts topographiques, mais peut atteindre plusieurs dizaines de mètres dans les bas topographiques. En particulier, au nord-est du secteur à l'étude, près de la Rivière-Matawin, l'épaisseur des dépôts meubles peut varier entre 1 et 35 m selon la base de données (SIH) du MELCC, au droit des puits privés situés dans le Domaine Lagrange.
- › **Le gisement**, de la surface à la base du modèle. L'analyse des données, à l'intérieur et à l'extérieur de la zone minéralisée, ne permet pas de faire de différenciation marquée du point de vue de la moyenne des conductivités hydrauliques. De plus, la majorité des données étant situées à l'intérieur du gisement, la comparaison des populations comporte un certain biais. Cependant, les observations de terrain indiquent que le secteur minéralisé serait davantage fracturé que l'extérieur de la zone (SLI, 2018a). En deçà de 100 m de profondeur, on observe également que les conductivités hydrauliques mesurées à l'extérieur du gisement (croix vertes, avec K autour de $3,0 \times 10^{-08}$ m/s) sont globalement inférieures à celles situées à l'intérieur (Figure 2-2).

Enfin, l'essai de pompage réalisé en 2017 à l'intérieur du gisement dans le secteur nord, donne une valeur moyenne de l'ordre de $1,4 \times 10^{-06}$ m/s ce qui est plus élevée que la moyenne des données dans le roc extérieur au gisement (SLI, 2018a). Pour ces raisons, le gisement a été considéré une unité hydrostratigraphique légèrement plus perméable que le roc encaissant ($2,5 \times 10^{-07}$ m/s). Le gisement est localement recouvert d'une faible épaisseur de dépôts meubles, entre 3 et 10 m d'épaisseur.

- › **Le roc peu profond**, de la surface à 140 m de profondeur environ, montrant une variabilité de conductivité hydraulique qui diminue avec la profondeur en restant centrée sur une valeur moyenne, d'environ $2,5 \times 10^{-07}$ m/s (ligne rouge de la Figure 2-2).
- › **Le roc profond**, au-delà de 140 m de profondeur et jusqu'à la base du modèle, qui représente la partie du roc non altérée et peu perméable. Deux forages profonds montrent une tendance régulière de diminution de la conductivité hydraulique du roc avec la profondeur (Figure 2-3). Ces forages sont situés au sud-ouest du gisement (proche de la phase 1), à l'extérieur de la zone minéralisée. L'analyse de ces forages indique que la conductivité hydraulique du roc profond est relativement faible, inférieure à $1,0 \times 10^{-08}$ m/s. Il a été supposé que cette faible perméabilité était représentative de l'ensemble du roc en profondeur en périphérie du gisement.

Figure 2-2 Conductivité hydraulique mesurée en fonction de la profondeur

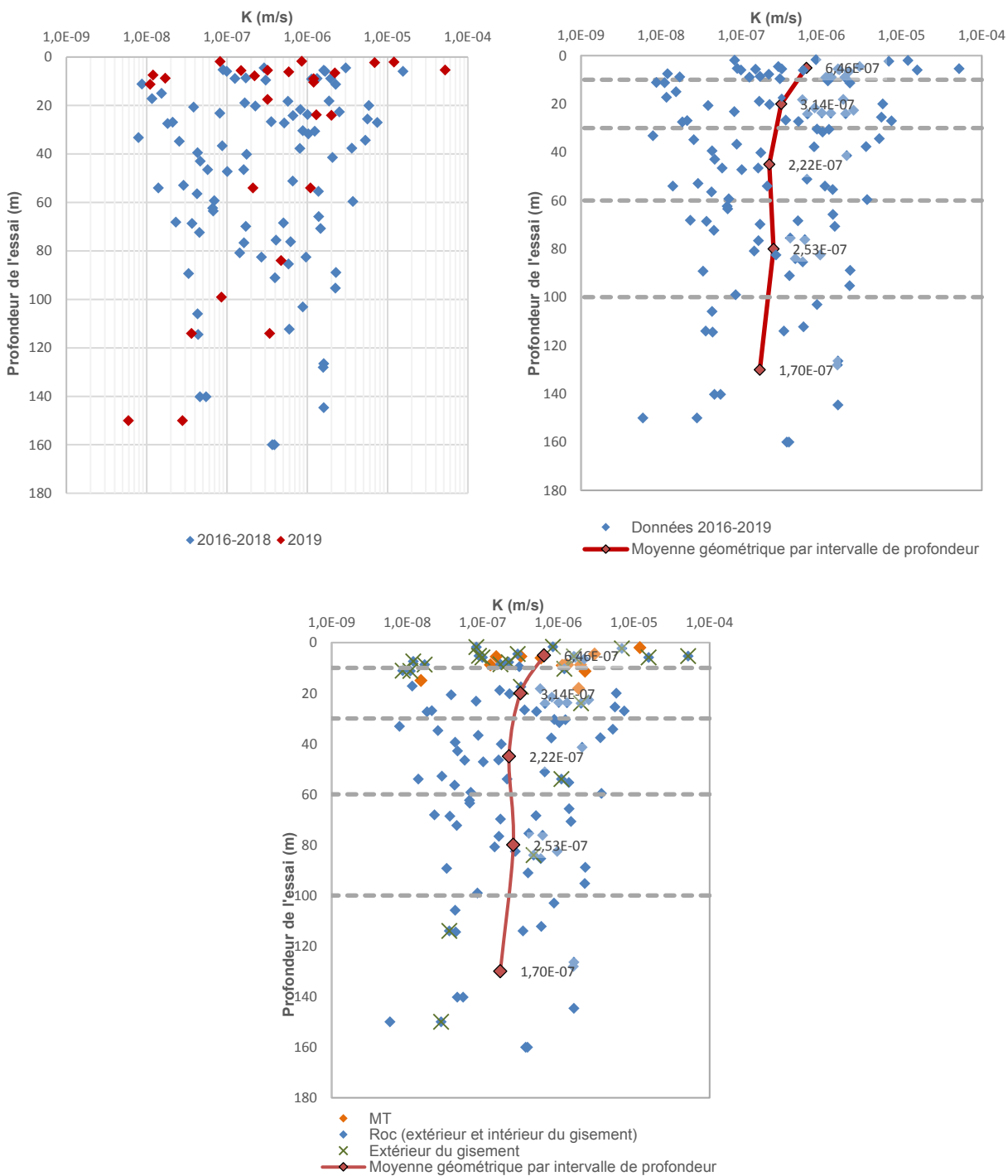
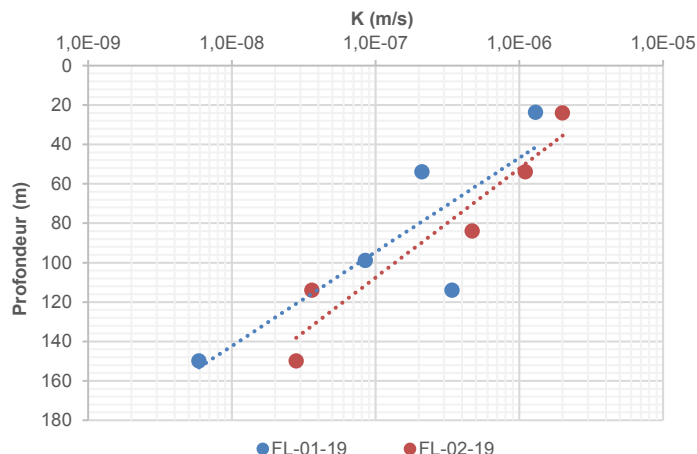


Figure 2-3 Conductivité hydraulique mesurée en fonction de la profondeur à deux forages profonds

Le tableau 2-2 présente les valeurs minimales, moyennes et maximales de conductivité hydraulique établies pour chaque unité hydrostratigraphique en fonction des intervalles de profondeur sélectionnés. La valeur moyenne de conductivité hydraulique a été utilisée comme valeur initiale dans le modèle numérique, puis ajustée lors du processus de calibration. Pour le gisement, c'est la valeur moyenne de l'essai de pompage réalisée dans le secteur nord, au cœur de la minéralisation, qui a été retenue comme intrant initial dans le modèle (SLI, 2018a). Pour le roc profond, la valeur initiale est basée sur les mesures réalisées aux forages profonds (FL-01-19 et FL-02-19) à une profondeur de 150 m.

Tableau 2-2 Conductivités hydrauliques mesurées par unité hydrostratigraphique

Unité hydrostratigraphique	Intervalles de profondeurs sélectionnés (m)	Conductivités hydrauliques observées		
		Minimum (m/s)	Moyenne géométrique (m/s)	Maximum (m/s)
Dépôts meubles et roc fracturé affleurant	0 - 10	$8,9 \times 10^{-08}$	$6,5 \times 10^{-07}$	$1,6 \times 10^{-05}$
Roc peu profond	10 - 140	$7,9 \times 10^{-09}$	$2,5 \times 10^{-07}$	$5,6 \times 10^{-06}$
Roc profond (valeur des forages profonds, Figure 2-3)	>140 m	n/a	$1,0 \times 10^{-08}$	n/a
Gisement (valeurs de l'essai de pompage secteur Nord)	0 – base du modèle	$3,1 \times 10^{-07}$	$1,4 \times 10^{-06}$	$1,0 \times 10^{-05}$

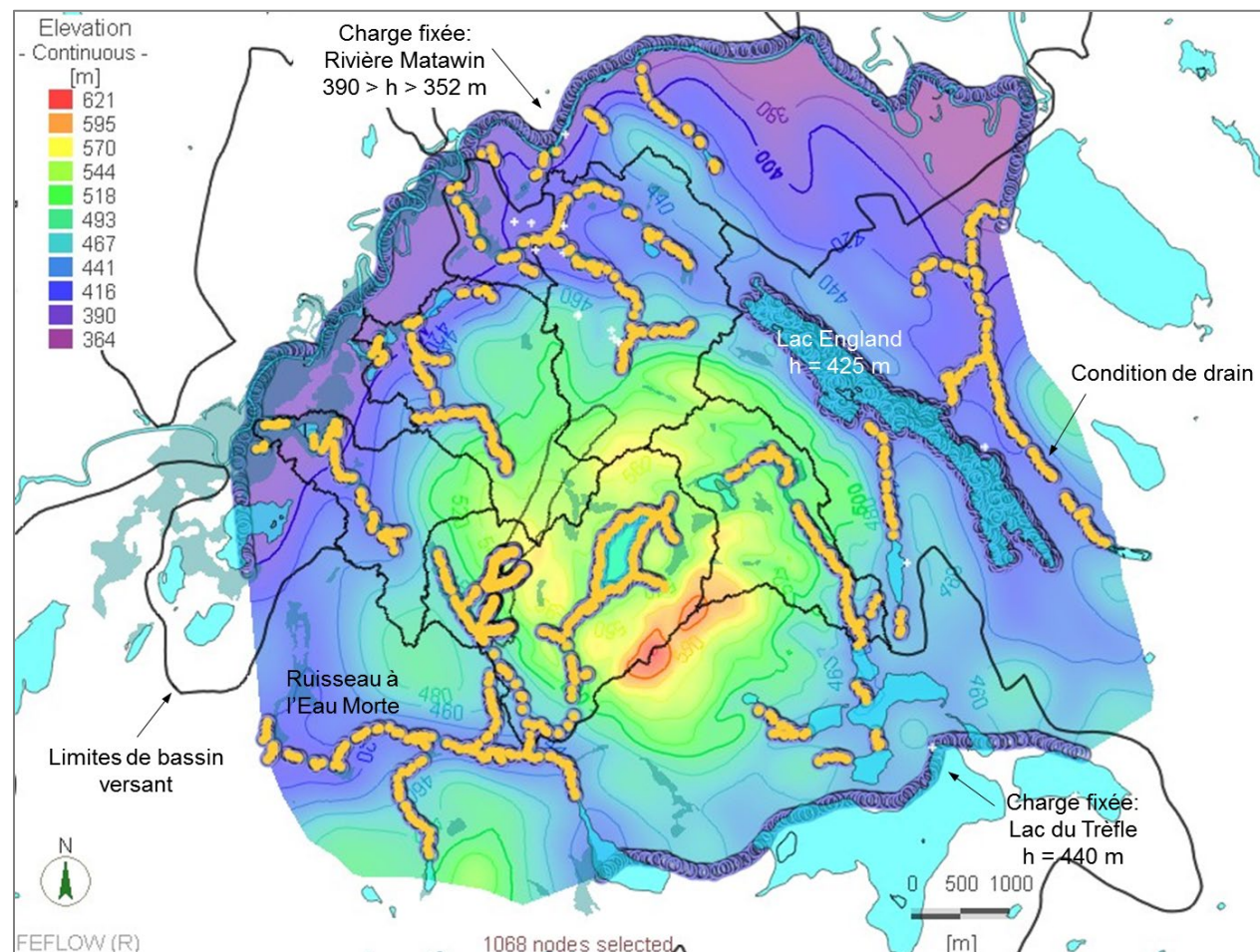
3 Modélisation de l'écoulement

Le modèle numérique a été construit en 3D avec le logiciel FEFLOW version 7.1 (Finite Element subsurface FLOW system) développé par DHI-WASY GmbH qui utilise l'analyse par éléments finis. C'est un logiciel qui est reconnu dans la communauté scientifique et fréquemment utilisé par les chercheurs et les firmes de génie-conseil pour simuler l'écoulement de l'eau souterraine et le transport de métaux dissous. Le maillage du modèle est identique à celui de l'étude SLI, 2019 b, et est constitué de 4 875 600 éléments tétraédriques formant 40 couches d'épaisseurs variables. La base plane du modèle a été fixée à une élévation constante de 100 m. Au niveau de la fosse, le maillage a été raffiné pour permettre une représentation de la géométrie plus précise. Le maillage est visible à l'annexe B.

3.1 Conditions limites

Afin de reproduire les conditions d'écoulement observées au site, les frontières physiques naturelles suivantes ont été appliquées aux limites du modèle (Figure 3-1) :

- › La Rivière-Matawin à l'aval hydraulique forme l'exutoire principal du modèle. Un gradient de charges fixes entre 390 et 352 m (correspondant à l'élévation du lit de la rivière) a été fixé sur l'ensemble des couches du modèle.
- › Le Petit lac du Trèfle et le lac du Trèfle, à l'amont hydraulique, constituent un exutoire local pour les eaux souterraines du système. Le lac du Trèfle présente une profondeur maximale de 32 m (MDDELCC, 2013a). Une charge de 440 m, correspondant à l'élévation moyenne du lac, a été fixée sur l'ensemble des couches du modèle bordant les deux lacs.
- › Le lac England, situé à l'est du gisement, présente une profondeur pouvant atteindre 10 m (MDDELCC, 2013b). Bien que ce lac soit moins profond que le lac du Trèfle, il est situé au pied de la montagne et agit probablement comme exutoire local des eaux souterraines. Une charge fixée de 425 m, correspondant à l'élévation du lac, a donc été appliquée sur la première couche du modèle au niveau du lac.
- › Une valeur initiale de recharge a été estimée à partir des données hydrologiques. Ce paramètre comporte la plus grande incertitude. Les zones où le roc affleure, où les dépôts meubles de surface sont plus perméables, ainsi que les secteurs à hauts reliefs topographiques, constituent des zones de recharge privilégiées de l'aquifère de roc. Il tombe annuellement environ 940 mm de précipitations sur le site du projet Matawinie. En tenant compte d'un coefficient de ruissellement de 0,22 (équivalent à 207 mm/an) estimé pour le site (SLI, 2018b), et en tenant compte de l'évapotranspiration (évaluée à 400-500 mm/an selon Statistique Canada), une première valeur de recharge nette de l'aquifère, estimée à 282 mm pour les zones à hauts reliefs topographiques a été utilisée. Cette valeur représente 30 % des précipitations annuelles. Afin de représenter les variations spatiales de recharge au site, une répartition simplifiée de valeurs de recharge a été utilisée. Ainsi, trois zones concentriques ont été différenciées en fonction de l'élévation et de la nature des formations de surface. Les valeurs de recharge nettes sur ces zones ont ensuite été ajustées lors du processus de calibration.
- › Une condition de drain (ou « seepage » dans le modèle) laissant sortir librement l'eau en surface au niveau des ruisseaux principaux, comme le ruisseau à l'Eau Morte, et permettant ainsi de représenter le drainage de la nappe au niveau des creux topographiques majeurs et zones de résurgence observées sur le terrain ou identifiées sur les cartes.

Figure 3-1 Conditions limites du modèle

3.2 Calibration

Les niveaux d'eau mesurés en 2019 ont été utilisés pour calibrer le modèle hydrogéologique. Ainsi, 66 points d'observation ont été utilisés dans le processus de calibration. Ces points de mesure du niveau de la nappe sont localisés principalement au niveau et pourtour du gisement.

Selon le processus de calibration, le modèle numérique est ajusté en variant les paramètres hydrogéologiques existants (conductivités hydrauliques et recharge) afin de reproduire adéquatement le réseau d'écoulement et les charges hydrauliques mesurées (ASTM D5981-96, 2002). En effet, l'objectif de la calibration est de déterminer un ensemble de paramètres entrants qui minimise la différence entre les charges hydrauliques simulées et mesurées, en respectant également les patrons d'écoulement. Le critère de calibration choisi pour l'étude est l'erreur NRMSE (Normalized Root Mean Square Error ou erreur quadratique moyenne normalisée), calculée à l'aide de l'équation ci-dessous. Une valeur de NRMSE inférieure à 10 % est généralement acceptée par l'industrie, et représente un seuil de calibration acceptable (Robertson GeoConsultants Inc. & SRK Consulting, 2012).

L'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) est définie par la formule suivante :

$$\text{NRMSE (\%)} = \frac{1}{(h_{\max} - h_{\min})} \times \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_s - h_m)^2 \right]^{1/2}$$

Où :

- › N : nombre total d'observations
- › h_s : charge hydraulique simulée [m]
- › h_m : charge hydraulique mesurée [m]
- › $h_{\max}$: charge hydraulique mesurée maximum [m]
- › $h_{\min}$: charge hydraulique mesurée minimum [m]

3.2.1 Conductivités hydrauliques calibrées

Au niveau des conductivités hydrauliques, les valeurs assignées dans le modèle sont basées sur la moyenne géométrique des données de terrain. Un grand nombre de mesures de conductivité hydraulique étant disponibles, le choix a été fait de ne pas trop s'éloigner des valeurs moyennes. Les valeurs des conductivités hydrauliques calibrées sont donc très proches ou égales aux valeurs moyennes mesurées.

Seules les conductivités des dépôts meubles et du gisement ont été légèrement ajustées. Pour les dépôts meubles, la conductivité hydraulique a été augmentée de $6,5 \times 10^{-07}$ m/s à $1,0 \times 10^{-06}$ m/s pour permettre un meilleur ajustement de la nappe. Au niveau du gisement, la valeur initiale de $1,4 \times 10^{-06}$ m/s a été abaissée à $4,0 \times 10^{-07}$ m/s car le modèle ne parvenait pas, localement, à maintenir une charge hydraulique suffisamment élevée. Finalement, les valeurs calibrées du roc peu profond et du gisement sont voisines, la valeur calibrée retenue pour le gisement étant deux fois supérieure à celle du roc peu profond encaissant.

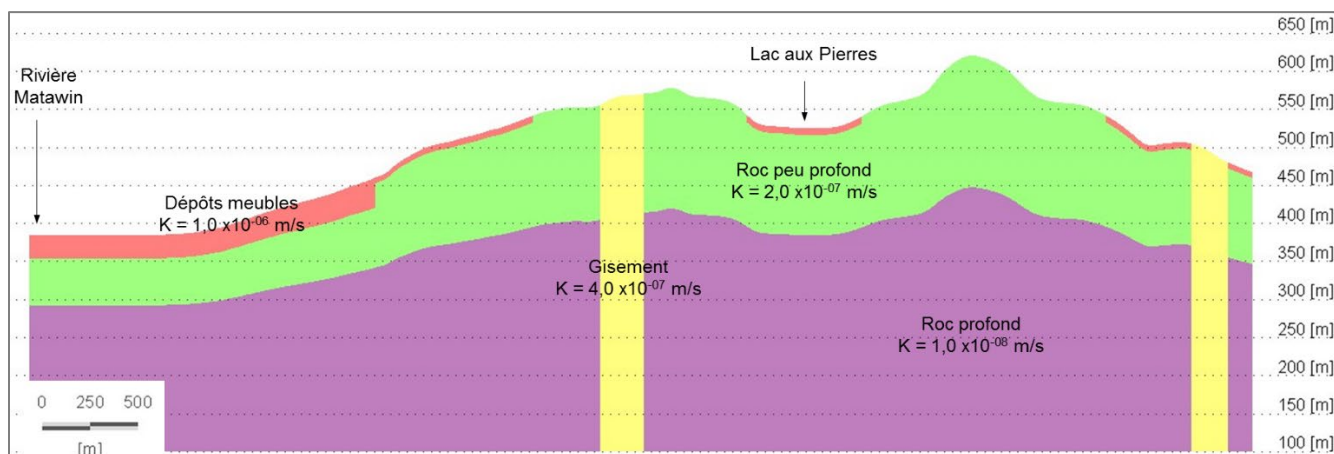
Le tableau 3-1 présente les conductivités calibrées pour les différentes unités hydrostratigraphiques.

Tableau 3-1 Conductivités hydrauliques calibrées versus mesurées

Unité hydrostratigraphique	Intervalles de profondeurs sélectionnés (m)	Moyenne géométrique des conductivités hydrauliques observées (m/s)	Conductivités hydrauliques calibrées (m/s)
Dépôts meubles et roc fracturé affleurant	0 - 10	$6,5 \times 10^{-07}$	$1,0 \times 10^{-06}$
Roc peu profond	10 - 140	$2,5 \times 10^{-07}$	$2,0 \times 10^{-07}$
Roc profond	>140 m	$1,0 \times 10^{-08}$	$1,0 \times 10^{-08}$
Gisement	0 – base du modèle	$1,4 \times 10^{-06}$	$4,0 \times 10^{-07}$

La figure 3-2 présente les unités hydrostratigraphiques calibrées le long d'une coupe perpendiculaire à la fosse.

Figure 3-2 Distribution de la conductivité hydraulique K en coupe, exagération verticale x 4



3.2.2 Recharge calibrée

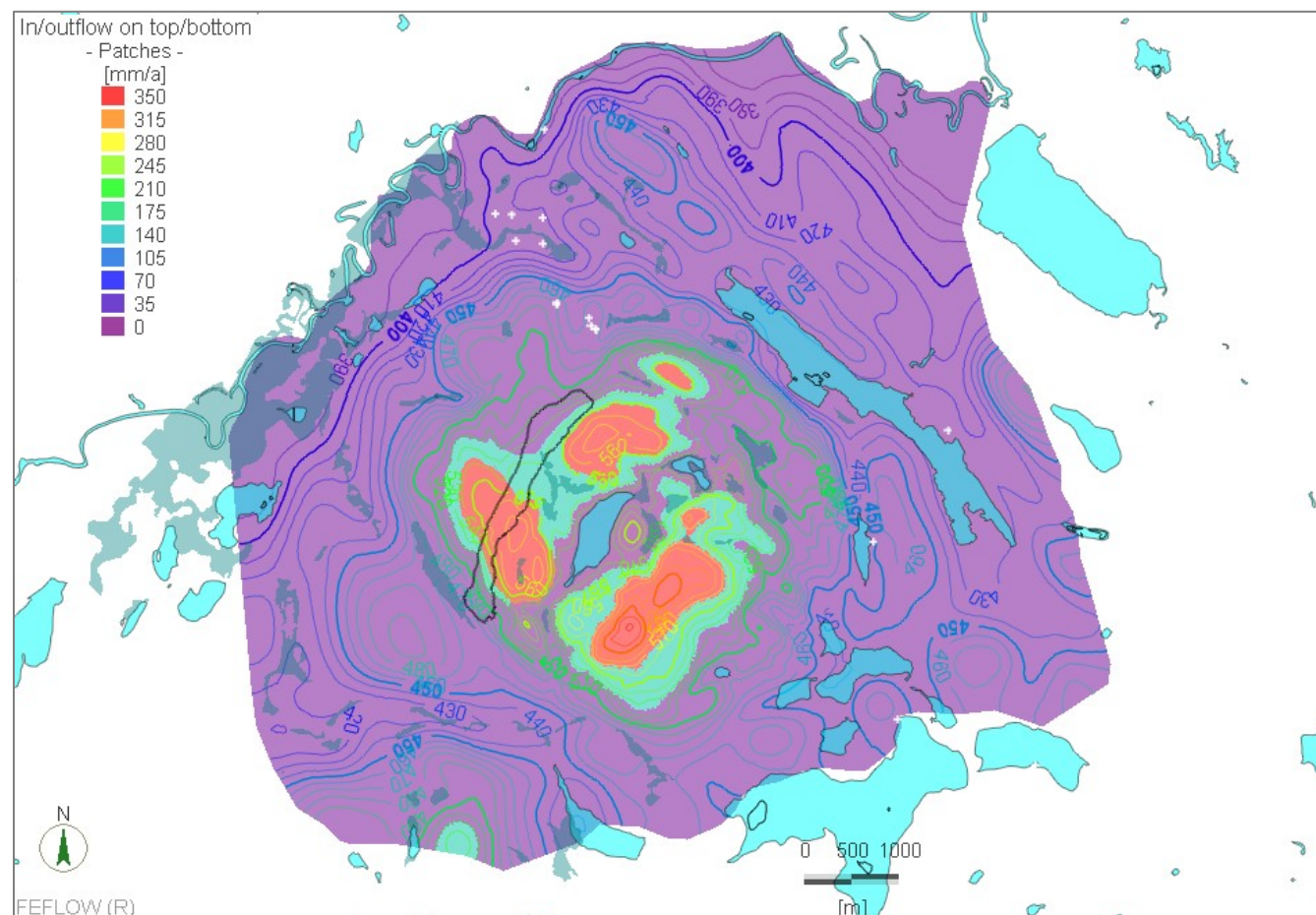
La recharge est principalement l'inconnue du système, et la calibration a consisté à estimer la recharge selon les conditions en place et en tentant de reproduire les mesures piézométriques. La recharge est un paramètre de modélisation difficile à évaluer, et aucune mesure directe n'est disponible. Cependant, certaines informations indirectes peuvent être utilisées pour estimer la recharge spatialement dans le modèle :

- › La présence de fractures sur les affleurements rocheux qui favorisent l'infiltration;
- › La présence d'une épaisseur importante (jusqu'à 40 m) de dépôts meubles potentiellement moins perméables dans certains bas topographiques;
- › Une épaisseur faible (entre 0 et 3 m) de dépôts meubles sur les hauts topographiques;
- › L'observation de conditions artésiennes dans certains secteurs;
- › La présence supposée de gradients verticaux ascendants aux abords des exutoires du modèle ou dans les creux topographiques, comme c'est probablement le cas près de la Rivière-Matawin. À ces endroits, ces gradients peuvent se traduire par une zone où l'infiltration verticale est faible voire nulle. On peut également noter la présence de milieux humides le long de la Rivière-Matawin, pouvant aussi bien représenter le fait que l'eau s'infiltre moins (c.-à-d. dépôts meubles peu perméables), ou que l'eau fait résurgence (c.-à-d. gradients verticaux vers le haut), ou les deux.

Ainsi, dans le modèle, (3) trois zones concentriques de recharge ont été différenciées en fonction de l'élévation relative et de la nature des formations de surface. Il s'agit d'une attribution simplifiée de la recharge. Les valeurs suivantes ont été ajustées lors du processus de calibration. La figure 3-3 présente les zones de recharge du modèle calibré :

- › Une recharge nette au roc de 10 mm/an sur la couronne externe du modèle. Cette recharge plus faible correspond à une zone d'élévation et topographie variables, comprenant entre autres les vallées et dépressions, ainsi que les zones dont l'élévation ne dépasse pas 520 m; ces zones renferment des dépôts meubles silteux pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur et où les gradients hydrauliques peuvent être ascendants (zones de résurgence).
- › Une recharge nette au roc de 150 mm/an sur la couronne centrale du modèle. Cette recharge correspond à une zone où les dépôts meubles sont plus minces et où l'élévation est environ comprise entre 520 et 535 m.
- › Une recharge nette au roc de 350 mm/an au centre du modèle, où les reliefs sont les plus importants (élévation supérieure à 535 m). Cette zone de recharge privilégiée est reliée à la présence d'affleurements rocheux fracturés et de reliefs en tête de bassin versant.

Figure 3-3 Zones de recharge calibrées (mm/an) et élévation (isolignes en mètre)



3.2.3 Piézométrie simulée et droite de calibration

Un modèle hydrogéologique peut être considéré comme calibré lorsque la valeur de NRMSE est basse et lorsque les patrons d'écoulement simulés sont représentatifs de ceux déduits de la piézométrie mesurée au site. Les 66 puits utilisés pour réaliser la carte piézométrique (Figure 2-1) ont également servi pour la calibration et le calcul d'erreur du modèle, dont le détail est présenté à l'annexe A.

La valeur de l'erreur quadratique normalisée (NRMSE) obtenue au terme de la calibration est de 8,6 % ce qui est inférieur à la cible acceptable de calibration de 10 % (Robertson GeoConsultants Inc. & SRK Consulting, 2012). L'erreur moyenne au carrée au niveau des charges simulées est de 10 m environ ce qui est acceptable compte tenu de la forte variabilité topographique du site (Anderson et Woessner, 1992). En effet, les charges maximales et minimales mesurées au niveau du site sont de 573,76 m (GT-17-19) et 460,61 m (F-18A-19) respectivement, soit un écart maximal mesuré de plus de 110 m. Les charges simulées sont relativement bien distribuées le long de la droite de calibration à l'intérieur d'un intervalle de confiance de +/-10 m (Figure 3-4). Au niveau de la fosse particulièrement, les charges observées sont bien reproduites par le modèle. Cependant, le modèle surestime légèrement les charges simulées pour les valeurs de charges mesurées inférieures à 515 m environ. Ces mesures correspondent à des puits situés au sud-ouest du gisement, au niveau du milieu humide CP4. La présence des milieux humides dans ce secteur peut être un indice d'une zone de résurgence de la nappe d'eau souterraine qui pourrait expliquer les charges simulées élevées. À l'inverse, le modèle sous-estime certaines charges simulées au niveau de puits situés dans les hauts topographiques, comme pour GT-17-19 où l'écart $h_{\text{obs}} - h_{\text{sim}}$ est de +9 m environ.

D'un point de vue qualitatif, le modèle reproduit de manière satisfaisante le patron d'écoulement radial observé au niveau du gisement (Figure 3-5). L'écoulement principal en provenance du gisement se fait en direction de la Rivière-Matawin. Au sud-ouest du gisement, le modèle reproduit également un écoulement vers le ruisseau à l'Eau Morte. Enfin, le modèle montre un écoulement peu profond partant de la ligne de partage des eaux située au sud et à l'est du mur de la fosse, vers le lac aux Pierres, dont le niveau simulé est de 530 m environ (contre un niveau mesuré de 525 m). La comparaison de l'espacement des isopièzes simulées et observées (Figure 3-5) suggère également que les gradients d'écoulement sont globalement bien respectés au niveau du site. La piézométrie en coupe perpendiculaire et parallèle au gisement est présentée à l'annexe C.

Il est à remarquer qu'à plus grande distance du secteur central du modèle qui comprend le gisement, donc à l'extérieur de la zone où une carte piézométrique a été réalisée à partir des niveaux d'eau mesurés en 2019, le choix d'une valeur unique de recharge (de 10 mm) résulte en un patron d'écoulement simulé relativement simplifié et lissé. Ce patron est surtout influencé par les conditions de type drain et charges fixes imposées au droit des plans et cours d'eau.

Figure 3-4 Droite de calibration montrant l'écart en les charges observées et simulées

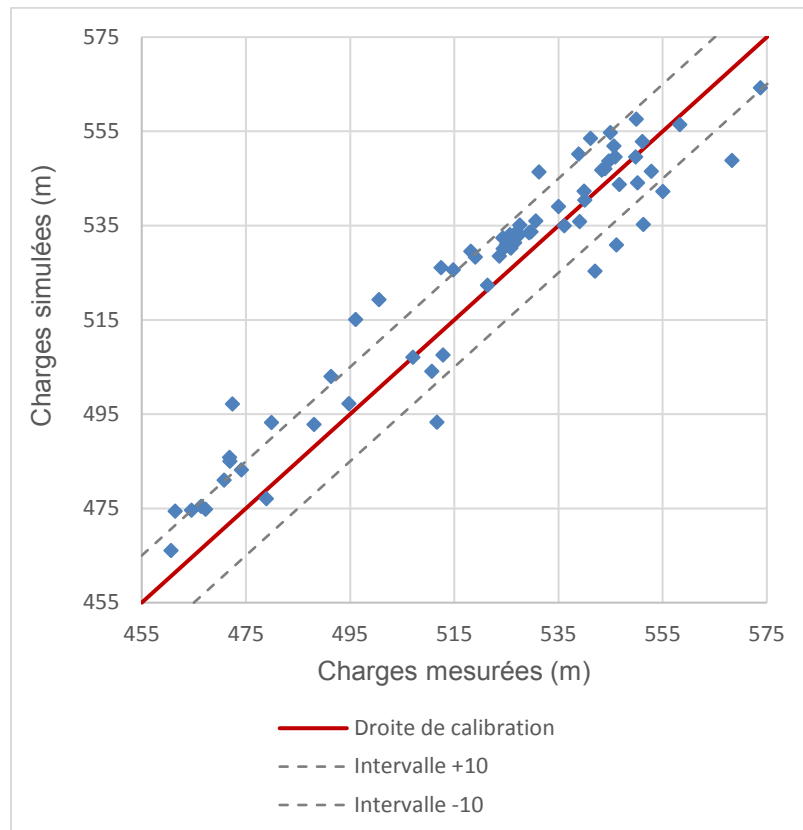
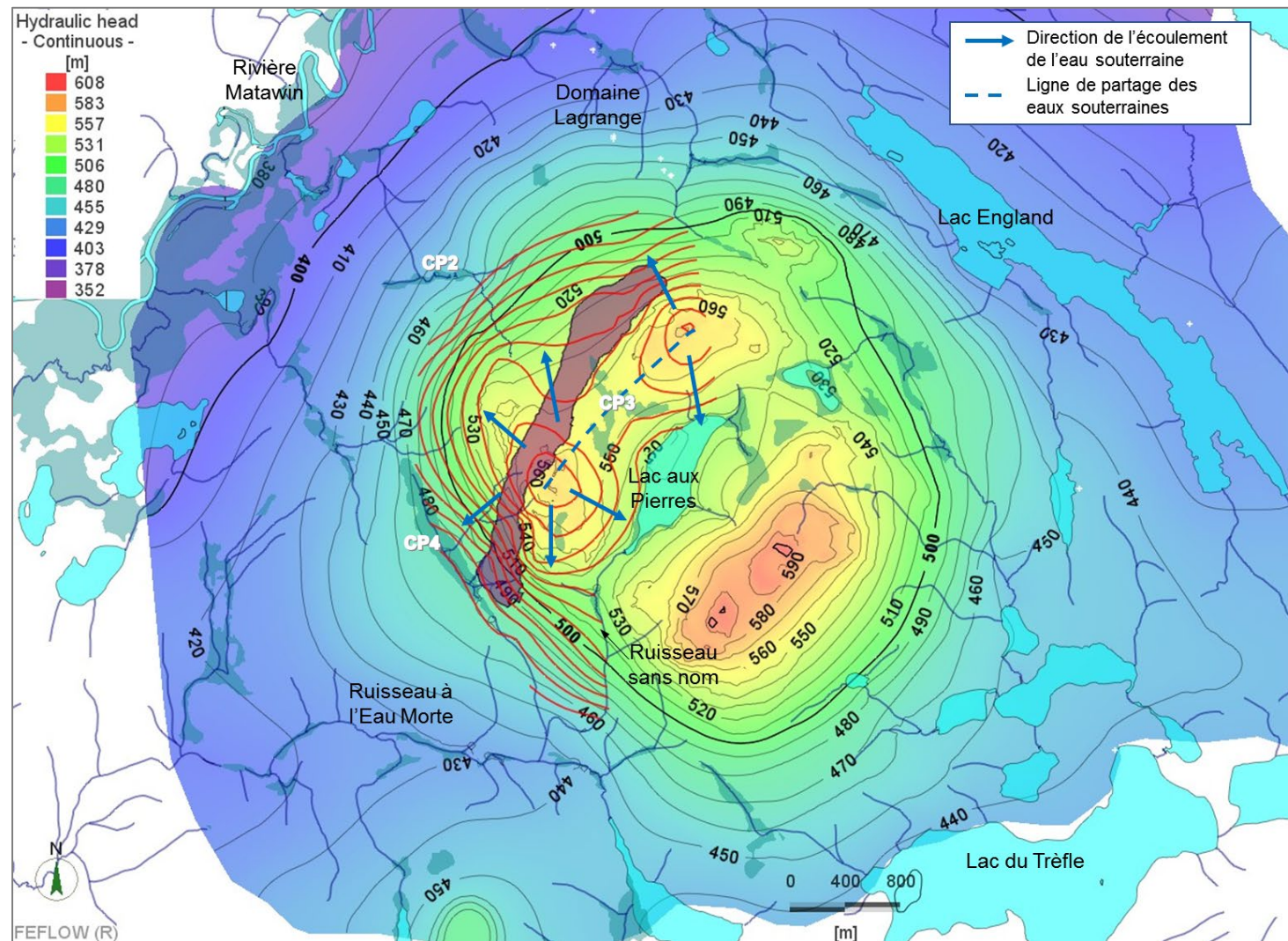


Figure 3-5 Piézométrie simulée (en noir) et mesurée (en rouge)



3.2.4 Bilan d'eau du modèle

Le bilan d'eau quantifie les différentes composantes d'entrée et de sortie d'eau (en m³/jour) du modèle hydrogéologique. Ce bilan est utilisé dans le processus de calibration pour valider les valeurs plausibles de flux en se basant sur les données disponibles et sur la vision du modèle conceptuel. Les valeurs de chaque composante du système sont compilées dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2 Bilan d'eau du modèle numérique et conceptuel

Composantes	Modèle numérique : débit d'eau souterraine (m ³ /jour)		Modèle conceptuel : estimation basée sur les données (m ³ /jour)		Description
	Entrées d'eau	Sorties d'eau	Entrées d'eau	Sorties d'eau	
Recharge liée aux précipitations	4 190	0	Estimée au site à 280 mm/an	0	Les précipitations sont estimées à 940 mm/an, et l'infiltration au niveau du site est estimée à 282 mm/an après retrait du ruissellement et de l'évapotranspiration
Rivière- Matawin	0	1 150	Supposée nulle	4 200	Débit d'étiage estimé de 4,5 m ³ /s pour une superficie de BV de 1 390 km ²
Lac du Trèfle	0	450	Supposée nulle	Inconnue	Exutoire secondaire du système, le lac du Trèfle à une profondeur de plus de 30 m
Lac England	175	605	Supposée nulle	Inconnue	Exutoire secondaire du système, le lac England a une profondeur d'environ 10 m
Ruisseau à l'Eau Morte	0	890	Supposée nulle	2 300	Débit d'étiage estimé de 0,16 m ³ /s pour une superficie de BV de 85 km ²
Ruisseau sans nom du BV Sud	0	1 300	Supposée nulle	850	Débit d'étiage estimé de 0,01 m ³ /s pour une superficie de BV de 5,3 km ²

Bilan général : recharge, lacs et rivières

Au niveau de la recharge, une estimation de 282 mm/an a été réalisée au niveau du site en tenant compte du ruissellement et de l'évapotranspiration. À l'échelle du modèle, la recharge a été obtenue par calibration, car il n'existe pas de mesures directes. Dans le modèle, la recharge est la principale entrée d'eau alors que les lacs et rivières alentour agissent majoritairement comme des exutoires. À l'échelle du modèle, le flux de recharge correspond à une entrée d'eau d'environ 4 190 m³/jour. Un quart du flux entrant sort directement au niveau de la Rivière-Matawin. Un autre quart sort au niveau des lacs England et du Trèfle avec des débits sortants de 605 et 450 m³/jour respectivement. La moitié restante du flux entrant sort au niveau du réseau hydrographique – tel que le ruisseau à l'Eau Morte – qui alimente ultimement la Rivière-Matawin. Dans la partie aval du lac England, le lac alimente localement la nappe avec un flux de 175 m³/jour environ.

Conceptuellement, même si les lacs et rivières sont considérés comme des exutoires, il n'est pas exclu qu'ils puissent agir localement, dans le temps et l'espace, comme des entrées d'eau du système hydrogéologique.

Réseau hydrographique

En ce qui concerne les rivières, la prise en compte des données hydrologiques est un outil de vérification supplémentaire pouvant être utilisé pour valider la représentativité d'un modèle hydrogéologique. En particulier, il est important de s'assurer qu'en étiage, lorsqu'un cours d'eau est essentiellement alimenté par les eaux souterraines, le cumul des débits de drainage simulés par le modèle le long de son tracé est comparable au débit mesuré à l'aval du cours d'eau. L'analyse des débits d'étiage a ainsi été réalisée pour la Rivière-Matawin, le ruisseau à l'Eau Morte et le ruisseau sans nom situé au niveau du BV Sud, englobant le lac aux Pierres.

Ruisseau à l'Eau Morte

Le ruisseau à l'Eau Morte est un ruisseau pérenne qui draine un BV de 85 km². Il possède un débit d'étiage moyen estimé d'environ 0,16 m³/s ou 13 700 m³/jour, ce qui correspond au débit de drainage de la nappe par le ruisseau (SLI, 2019d). L'analyse de la piézométrie semble confirmer que le ruisseau à l'Eau Morte draine – au moins en surface – la nappe souterraine, car le niveau d'eau dans les puits du secteur est supérieur ou égal à l'élévation du ruisseau à proximité (Figure 2-1). En effet, le niveau piézométrique mesuré en 2019 à PO18A19, puits le plus proche du ruisseau, est de 460 m, et l'élévation du ruisseau varie entre 460 et 440 aux points de contrôle 7 et 8 respectivement. L'élévation de la nappe est donc plus élevée que celle du ruisseau à cet endroit et, il est donc probable qu'il draine la nappe.

Le débit sortant par la condition de drain au niveau du ruisseau à l'Eau Morte est 890 m³/jour. Le débit d'étiage du ruisseau à l'Eau Morte est estimé à 13 700 m³/jour pour une superficie de 85 km². En réalisant un produit croisé pour la superficie de ce BV comprise dans le modèle, environ 14 km², le débit d'étiage serait de 2 320 m³/jour. Le modèle sous-estime d'environ 2,6 fois le débit d'étiage du ruisseau à l'Eau-Morte pour la portion du BV comprise dans le modèle. Compte tenu des incertitudes présentes à la fois dans les modèles hydrologique et hydrogéologique, on peut considérer que l'estimation provenant du modèle hydrogéologique est dans l'ordre de grandeur de l'estimation hydrologique.

Rivière-Matawin

Pour la Rivière-Matawin, les données de débit sont extraites de la station hydrométrique de la base de données HYDAT d'Environnement Canada. La station Rivière-Matawin à St-Michel des Saints est située à proximité du site Matawinie, et draine un BV de 1 387 km². Le débit d'étiage de la Rivière-Matawin est estimé à environ 4,5 m³/s ou 388 800 m³/jour (SLI, 2019d). À l'instar du ruisseau à l'Eau Morte et en se basant sur les données hydrologiques, il est possible d'estimer le débit d'étiage de la Rivière-Matawin représentatif de la portion du modèle. Ainsi une valeur de 4 200 m³/jour est obtenue et peut être comparée aux 1 150 m³/jour extraits du modèle numérique. Le modèle sous-estime d'environ 3,7 fois le débit d'étiage de la Rivière-Matawin pour la portion du BV comprise dans le modèle. Compte tenu des incertitudes présentes à la fois dans les modèles hydrologique et hydrogéologique, on peut considérer que l'estimation provenant du modèle hydrogéologique est dans l'ordre de grandeur de l'estimation hydrologique.

Ruisseau sans nom au niveau du BV Sud

Le ruisseau sans nom du BV Sud est situé au centre du modèle et englobe le lac aux Pierres et le milieu humide CP4. Le débit d'étiage estimé est de 0,01 m³/s (ou 850 m³/jour) pour une superficie de BV de 5,3 km² (SLI, 2019d). Le BV étant entièrement inclus dans le modèle, le débit de 850 m³/jour peut être directement comparé au débit de 1 300 m³/jour extrait du modèle hydrogéologique et reste dans le même ordre de grandeur.

4 Dénoyage des phases 1 à 5

4.1 Débits de dénoyage pour chaque phase

Les simulations ont été réalisées en régime permanent afin d'évaluer les débits de dénoyage moyens pour les différentes phases minières.

Le tableau 4-1 présente les résultats du dénoyage simulé à la fin de chaque phase minière. En tenant compte d'un facteur de sécurité de 1,25, les débits de dénoyage varieraient en fonction de la dimension et la profondeur des fosses, de 1 070 à 2 000 m³/jour. Les débits les plus importants sont obtenus pour les phases 4 et 5, avec des valeurs respectives de 1 740 et 2 000 m³/jour.

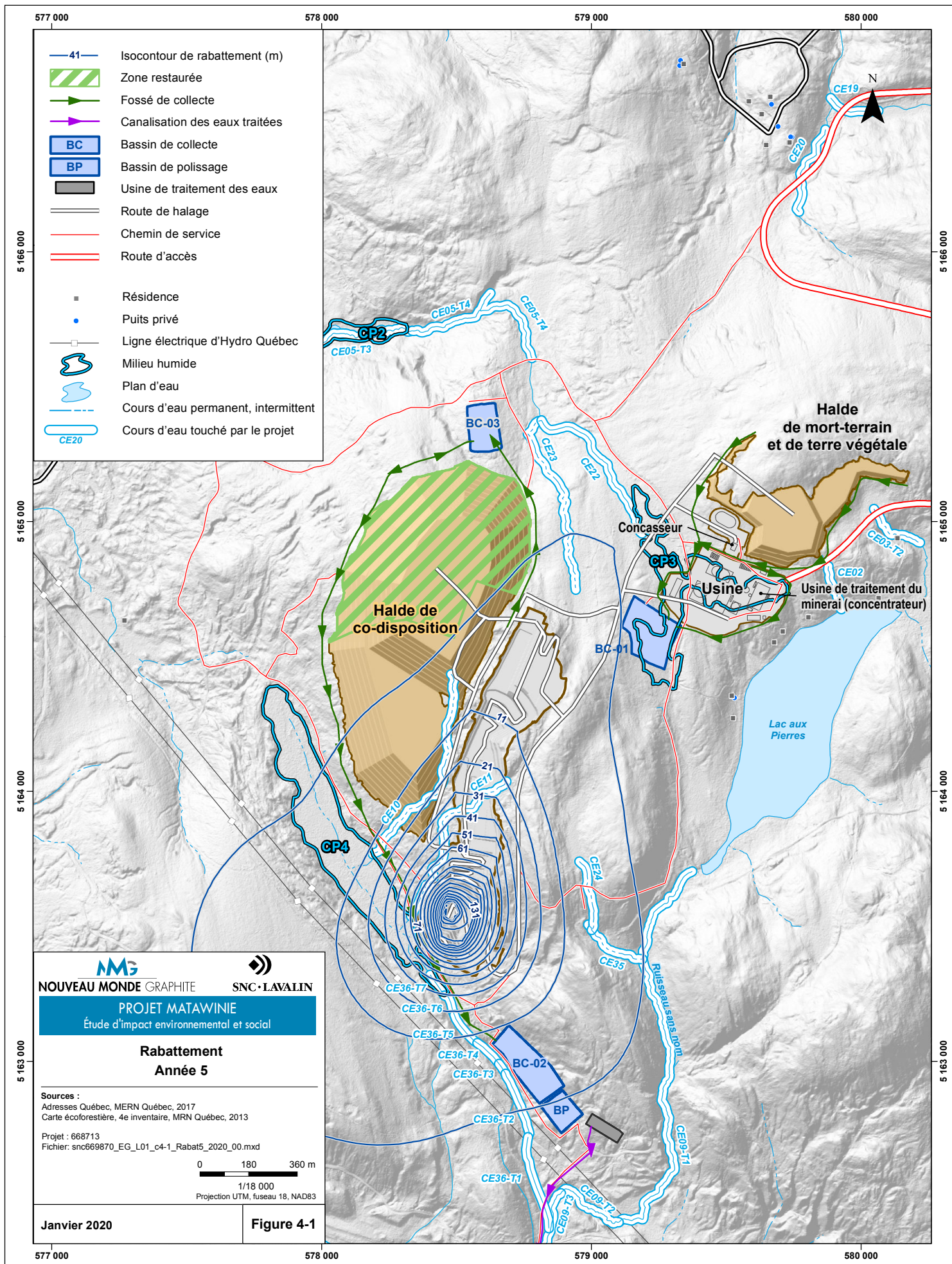
Tableau 4-1 Débits de dénoyage simulés pour chaque phase d'exploitation

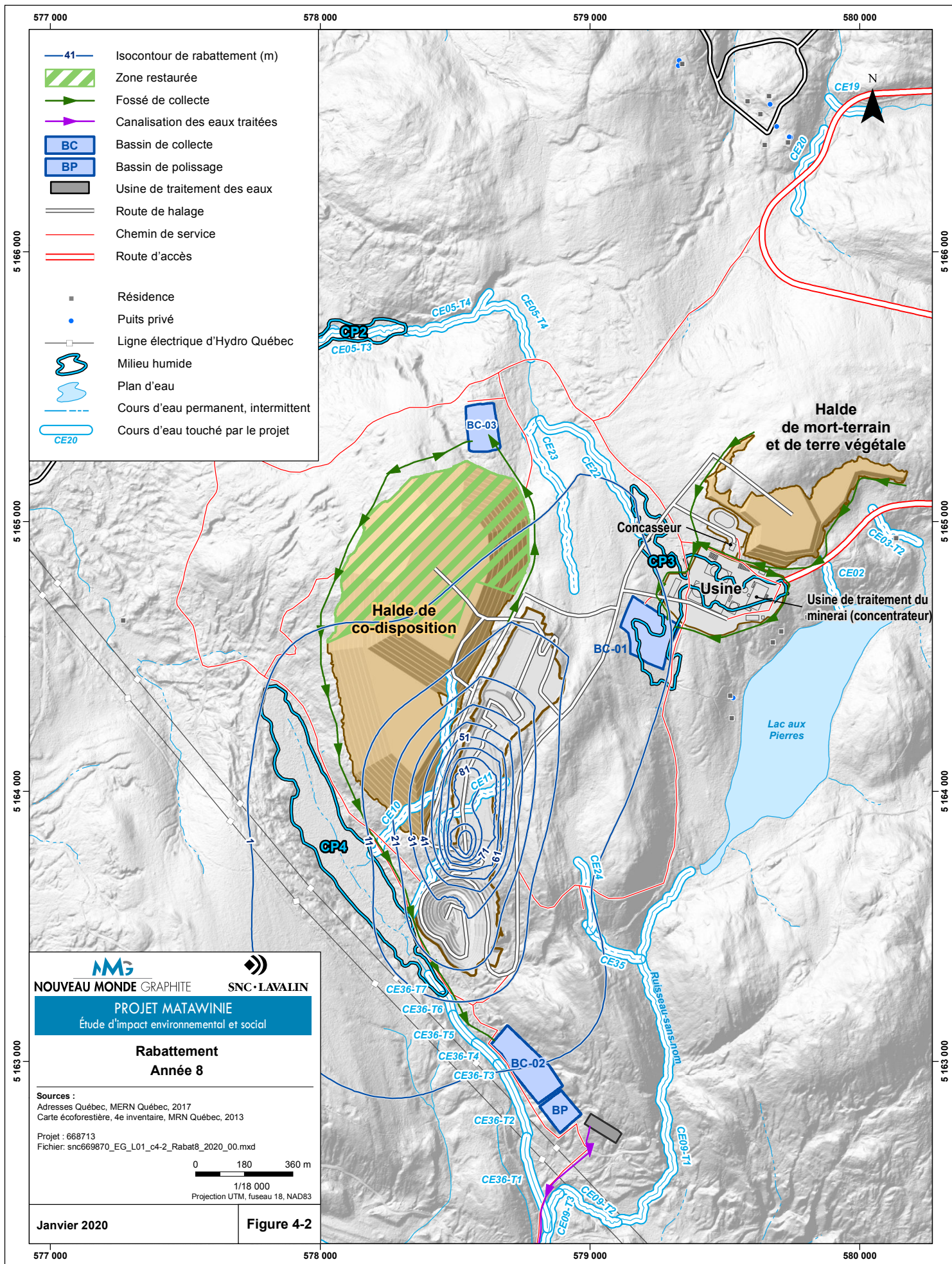
Phase d'exploitation	Débits simulés pour dernière année d'exploitation (m ³ /j)	Facteur de sécurité de 1,25 sur les débits de dénoyage (m ³ /j)
Phase 1	850	1 070
Phase 2	960	1 200
Phase 3	1 150	1 440
Phase 4	1 390	1 740
Phase 5	1 600	2 000

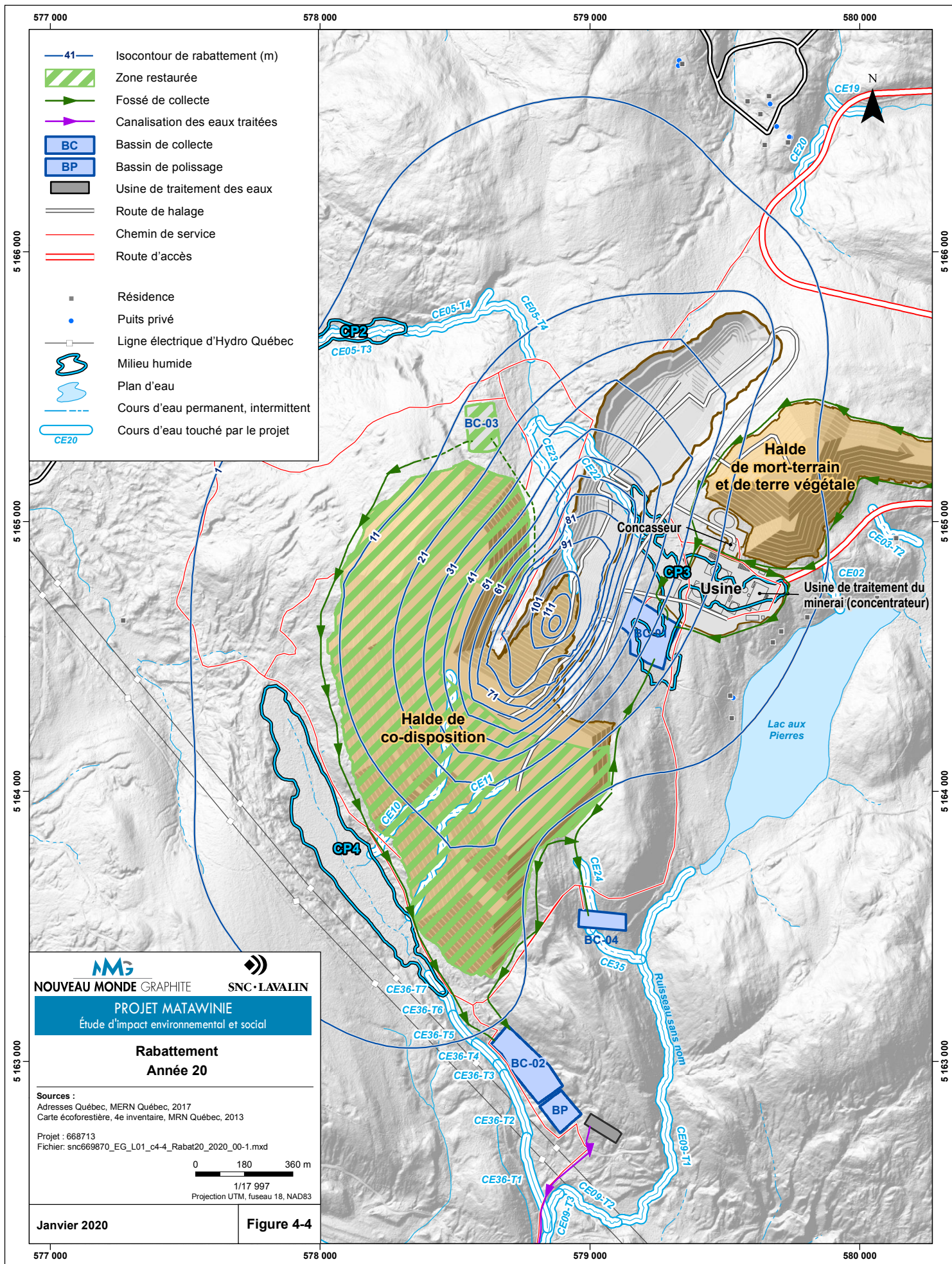
4.2 Cartes d'isocontours de rabattements

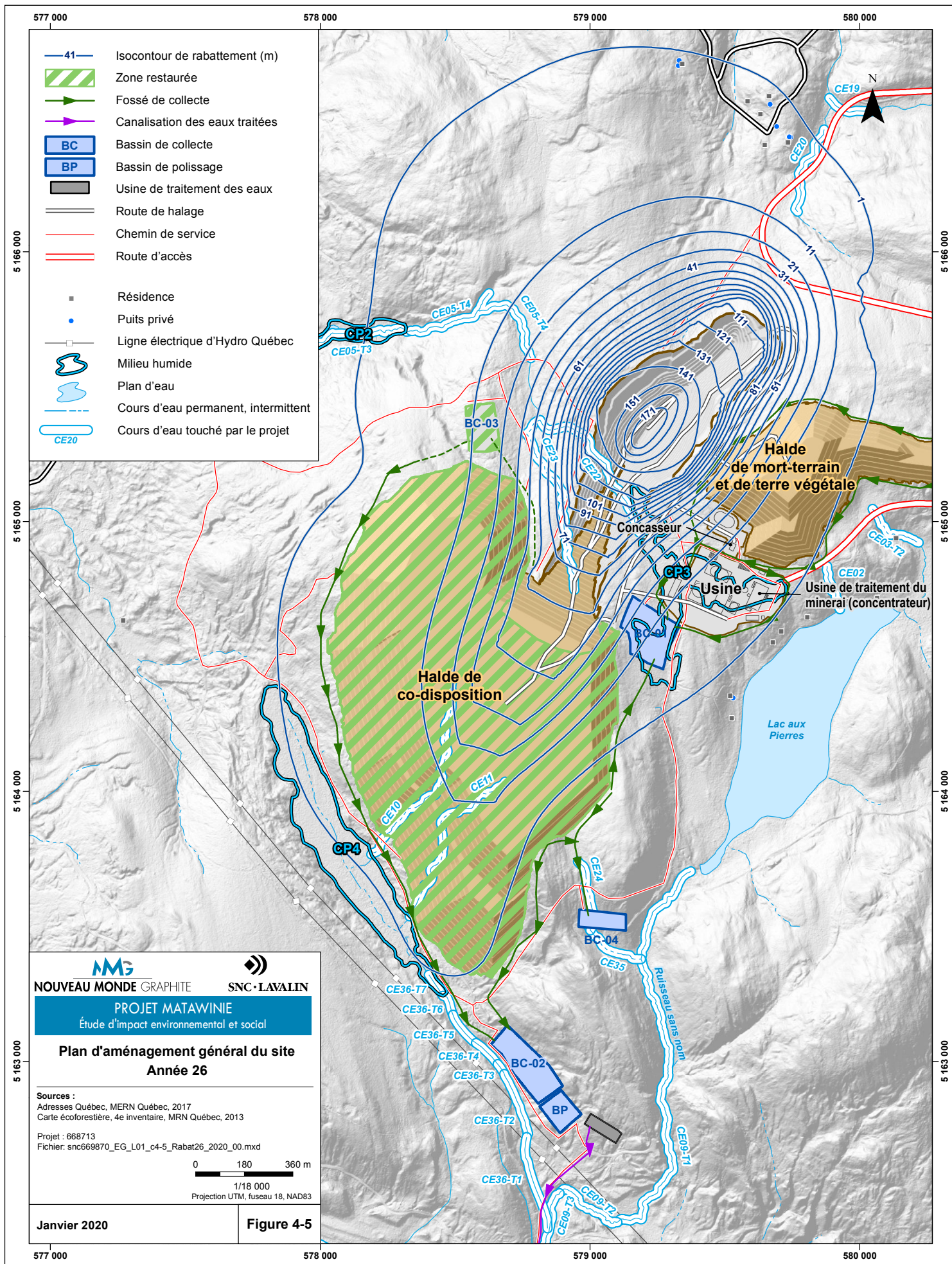
Les rabattements simulés dus au dénoyage des principales phases minières sont présentés, en plan pour chaque phase, à partir de la figure 4-1. L'isocontour le plus éloigné de la fosse représente un rabattement simulé de la nappe de 1 mètre. Les rabattements simulés de chaque phase sont conservateurs puisqu'ils sont représentatifs de la profondeur finale d'exploitation. Il est attendu que durant les premiers temps de l'exploitation d'une phase, le dénoyage et les rabattements seront plus faibles, et augmenteront progressivement avec l'élargissement et l'approfondissement de la fosse. Ainsi, dans les premières années d'exploitation, avant que les profondeurs d'exploitation finales soient atteintes, les rabattements seraient également plus faibles que les résultats présentés aux figures 4-1 à 4-5. Pour les simulations de dénoyage, un retour dans la fosse des résidus et stériles miniers a été considéré à partir de l'année 6. Comme la phase 4 et un approfondissement de la phase 3, le dénoyage de la phase 4 est réalisé en dénoyant la phase 3 pendant 7 ans, puis la phase 4 pendant 5 ans. La phase 4 est donc dénoyée pendant 12 ans, avec les profondeurs maximales des phases 3 et 4 successivement.

Les rabattements sont visibles le long d'une coupe longitudinale au gisement à l'annexe D. Les élévations simulées du niveau de la nappe pendant les phases de dénoyage sont présentées à l'annexe E.









5 Remontée du niveau d'eau dans la phase 5

5.1 Porosité efficace des unités

La porosité efficace représente la fraction connectée du volume des pores qui contribue à l'écoulement ou au transport de masse. La porosité efficace des matériaux est donc un paramètre important dans le transport de contaminant ou l'estimation du temps de remontée du niveau de l'eau après dénoyage.

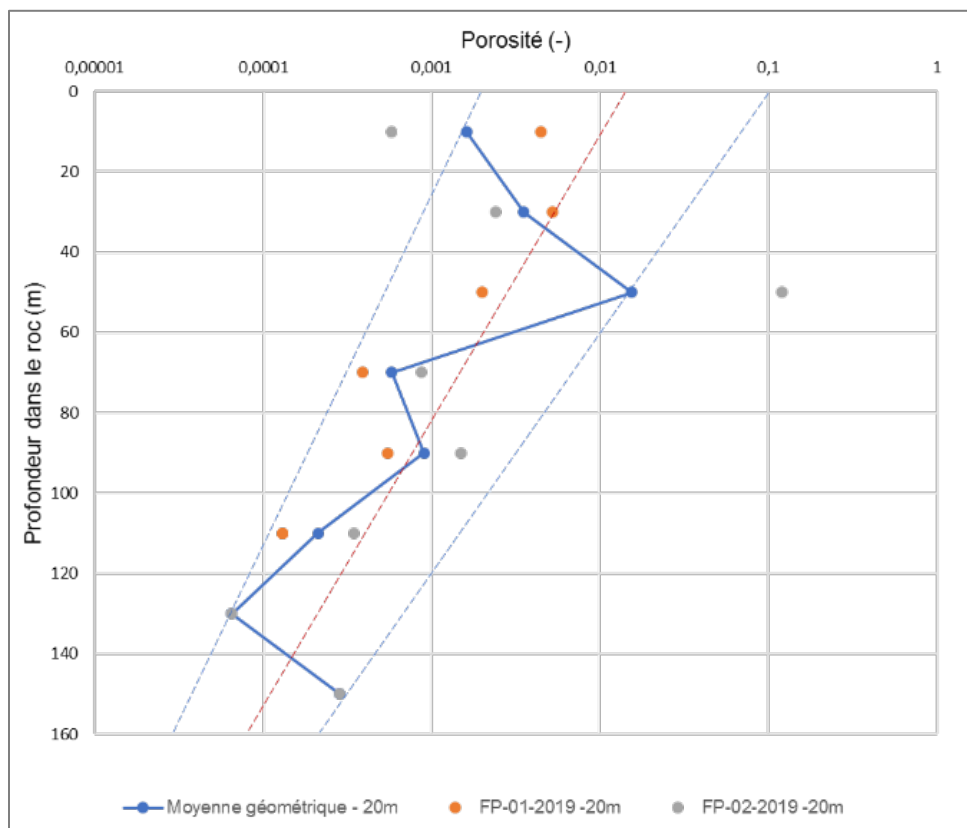
Dépôts meubles et roc

Pour les dépôts meubles, la porosité de 0,17 a été estimée à partir de la littérature (Johnson, 1967).

Pour le roc, les interprétations des relevés de géocaméras ont été utilisées pour estimer la porosité totale en prenant pour hypothèse que la porosité totale est ici égale à la porosité efficace. Les forages utilisés sont FP-01-2019 et FP-02-2019, deux forages profonds situés au sud-ouest du gisement. L'analyse des géocaméras fournit le type de structures (joints fermés, joints partiellement ouverts ou joints ouverts) et l'ouverture des joints (mm), dans le cas où cette ouverture est supérieure à la limite de détection de l'appareil qui est de 1,3 mm. Pour les joints partiellement ouverts, une valeur d'ouverture égale à la moitié de la limite de détection est utilisée pour le calcul de la porosité, soit 0,65 mm. Les valeurs de l'ouverture des joints ouverts et partiellement ouverts sont ensuite sommées pour estimer la porosité par intervalle de 20 m de profondeur (Figure 5-1).

Sur la figure 5-1, la courbe bleue indique la moyenne géométrique des données et indique une diminution de la porosité avec la profondeur. Selon ces interprétations, entre la surface et 150 m de profondeur environ, la porosité varie entre 0,015 et 0,00007. On note également une valeur de porosité très élevée au niveau de FP-02-2019 vers 50 m de profondeur. Cette valeur est liée à la présence d'une zone faillée présentant des ouvertures importantes, avec un intervalle principal d'ouvertures qui s'étend sur 1 183 mm.

Ainsi, dans le modèle, des porosités de 0,003 et 0,0001 ont été assignées respectivement pour le roc altéré (entre 0 et 100 m) et le roc sain (entre 100 m et la base du modèle). Ces valeurs sont d'un à un demi-ordre de grandeur plus faibles que celles considérées dans la version précédente du modèle.

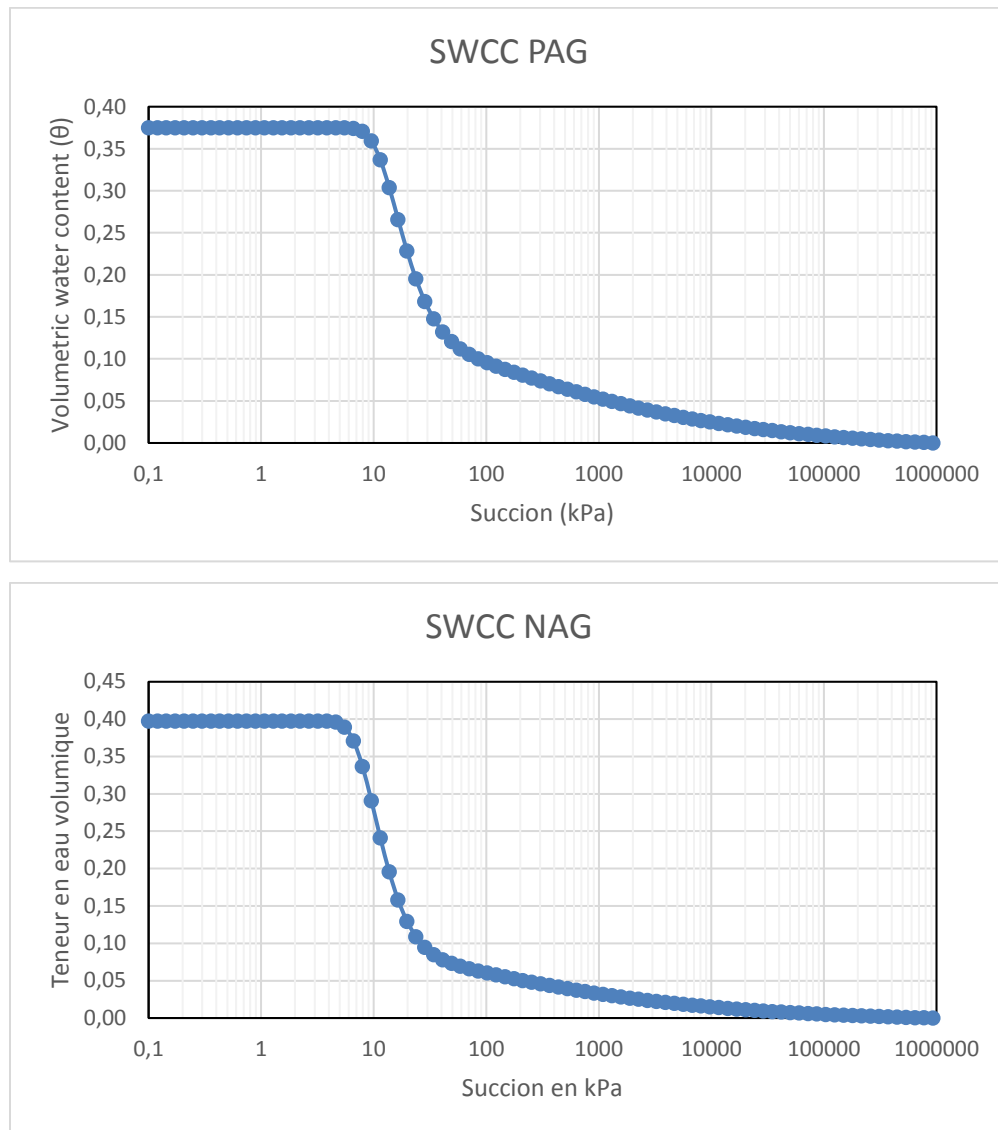
Figure 5-1 Porosité du roc par intervalle de profondeur de 20 m, d'après l'analyse des géocaméras

Matériaux retournés dans la fosse

Pour les résidus PAG et NAG, les courbes granulométriques ont été utilisées pour estimer les courbes de rétentions en eau (Figure 5-2), ainsi que la porosité totale et la porosité efficace. Les porosités totales des PAG et NAG sont respectivement de 0,38 et 0,40. Les porosités efficaces peuvent être estimées en retranchant de la porosité totale la valeur de teneur en eau extractible sous une forte succion (point d'inflexion situé entre -10 et -100 kPa sur la courbe de rétention), lesquelles sont de 0,12 et 0,09 respectivement. Ainsi, les porosités efficaces des PAG et NAG sont de 0,26 et 0,31 respectivement.

Étant donné que la granulométrie pour les stériles n'est pas connue, la porosité est basée sur la littérature (Hopp et al., 2011) et la porosité efficace est estimée à 0,36 (SLI, 2019c). La répartition attendue en volume selon la séquence d'exploitation des résidus miniers et stériles miniers est la suivante : 11 % de PAG, 49 % de NAG et 40 % de stériles miniers. La porosité efficace totale des résidus de la fosse a donc été estimée à partir de la moyenne pondérée de ces matériaux. Ainsi on obtient, une porosité globale de 0,32 pour le matériel déposé dans la fosse.

Figure 5-2 Courbes de rétention des résidus PAG et NAG, (SLI, 2019c)



Le tableau 5-1 présente les porosités efficaces des unités du modèle.

Tableau 5-1 Porosité efficace des unités

Porosité efficace	Valeur du modèle (s.u.)	Références
Dépôts meubles	0,17	Johnson (1967)
Roc altéré	0,003	Analyse des géocaméras
Roc sain	0,0001	Analyse des géocaméras
PAG	0,26	Courbe de rétention basée sur la granulométrie (SLI, 2019c)
NAG	0,31	Courbe de rétention basée sur la granulométrie (SLI, 2019c)
Stériles	0,36	Hopp et al. (2011)
Résidus et stériles dans la fosse	0,32	Moyenne pondérée en fonction de la répartition en volume dans la fosse

5.2 Estimation du temps de remontée du niveau d'eau dans la phase 5

Afin d'estimer le temps de remontée du niveau d'eau dans la phase 5 (vide), une simulation en régime transitoire est réalisée en tenant compte des hypothèses suivantes :

- › Le dénoyage de la phase 5 ne tient pas compte du dénoyage des phases précédentes;
- › La géométrie finale de la phase 5 est utilisée dès le début du dénoyage (fond de l'excavation à 305 m d'élévation);
- › La recharge sur la halde est réduite à 5 mm/an en raison de la présence de la géomembrane (SLI, 2019b);
- › Le modèle ne tient pas compte de l'évaporation dans le lac qui sera formé dans l'espace de la phase 5;
- › Les phases 1, 2, 3 et 4 sont entièrement remplies de résidus miniers ou stériles miniers;
- › La phase 5 est vide, et le vide est représenté dans le modèle par une porosité de 1 et une conductivité hydraulique K de 0,1 m/s (Szczepinski, 2019);
- › Le dénoyage relié à la phase 5 est réalisé sur une période de 6 ans, de l'année 20 à 26;
- › Dans le modèle, le dénoyage est réalisé grâce à la condition de drain qui est placé sur les parois et le fond de la phase 5.

Avant le dénoyage, l'élévation de la nappe dans le roc au niveau de la phase 5 est de 510 m environ. Au centre de la phase 5, la nappe est abaissée de 205 m (510 – 305 m). La figure 5-3 présente le niveau de la nappe et les charges simulées à $t = 26$ ans, en coupe longitudinale et transversale au gisement, après 6 ans de dénoyage.

À la fin du dénoyage, la phase 5 est dénoyée et la remontée du niveau de la nappe est suivie grâce à un point d'observation fictif placé dans le roc directement sous la phase 5. Les résultats sont présentés à la figure 5-4. On observe que 80 % de la remontée du niveau d'eau s'effectue dans les trois premières années suivant l'arrêt du dénoyage. Le niveau de la nappe remonte rapidement dans les premiers temps en raison des forts gradients hydrauliques créés par la différence de niveaux piézométriques entre le fond de la fosse et le roc en périphérie, et de la géométrie conique de la phase.

Le niveau statique (environ 500 m) est atteint après environ 30 ans. Le niveau initial avant dénoyage, d'environ 510 m, n'est pas retrouvé en raison du vide de la fosse et du matériel plus perméable remis en place dans les fosses des phases précédentes. En effet, avant l'excavation, le roc permettait de maintenir les charges hydrauliques plus hautes grâce à sa faible perméabilité plus faible.

Figure 5-3 Charges simulées à $t = 26$ ans, à la fin du dénoyage de la phase 5 (a) coupe longitudinale et (b) coupe transversale à la fosse

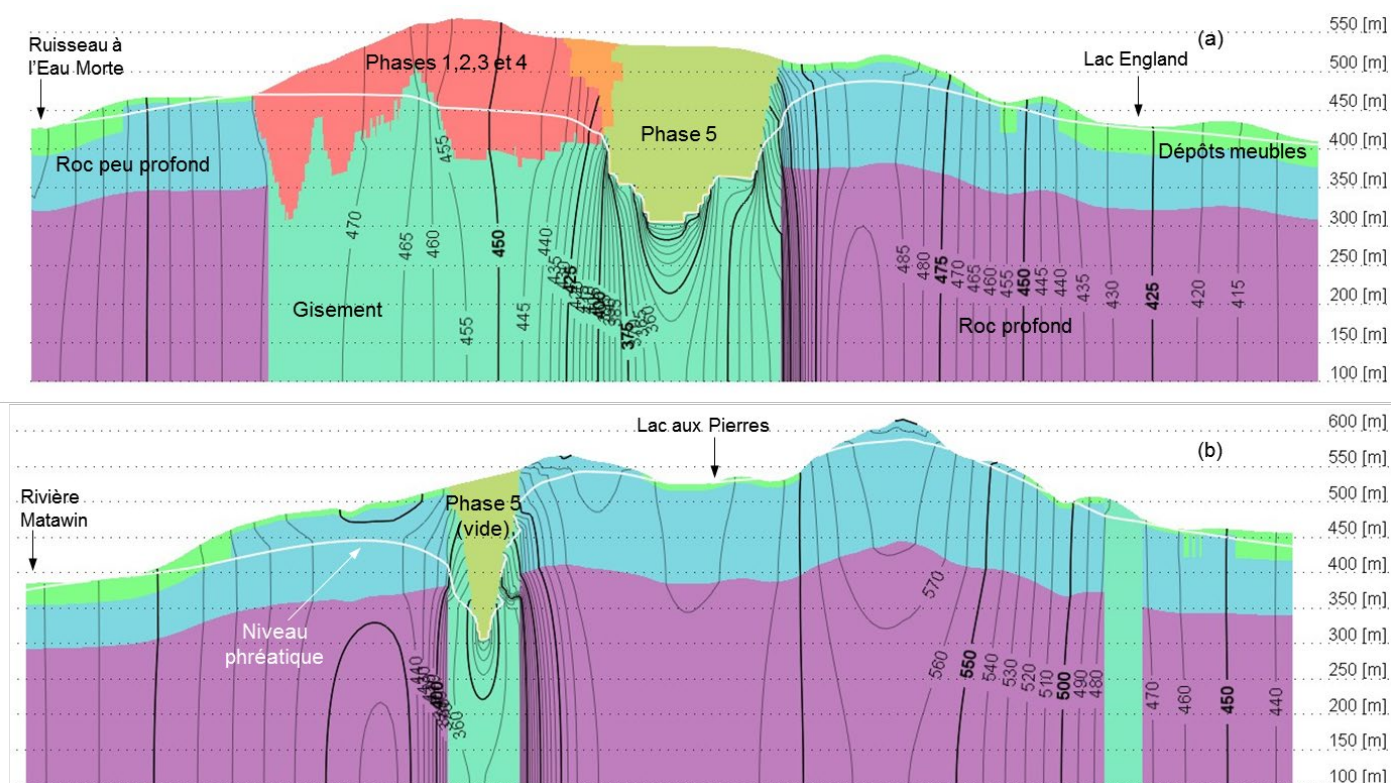
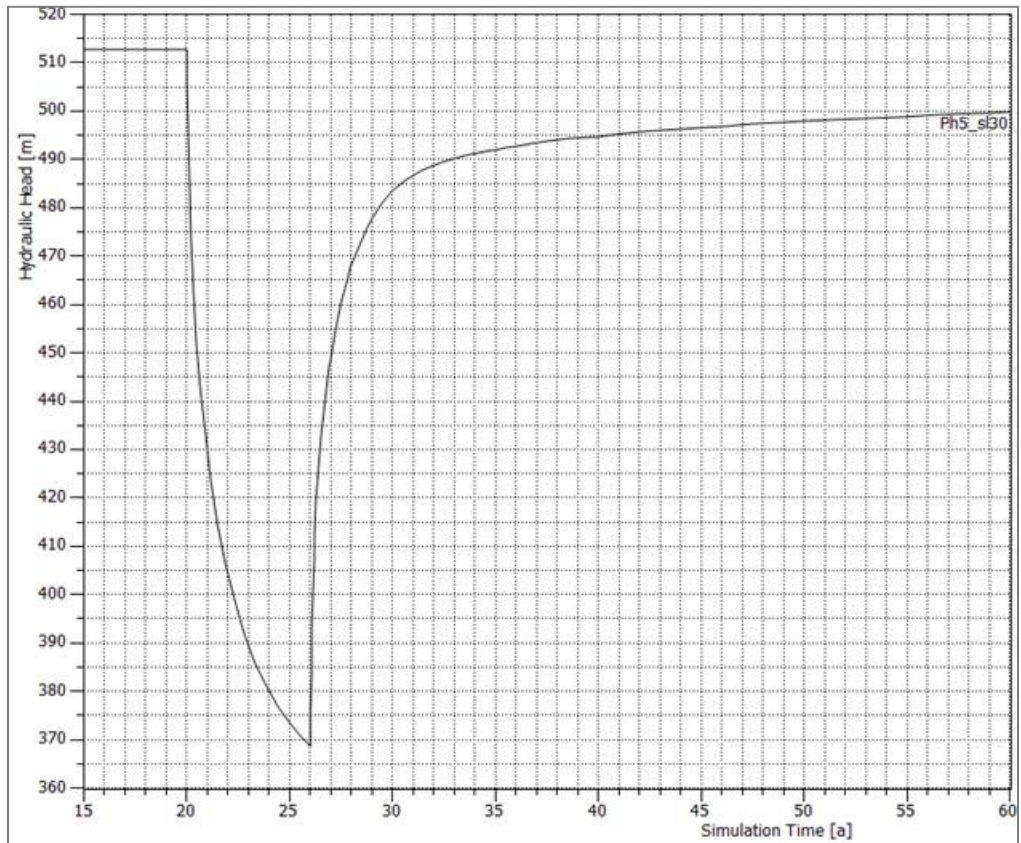


Figure 5-4 Remontée du niveau simulée dans la phase 5 en fonction du temps



6 Conclusions

Objectifs du mandat

Sur la base de nouvelles données de terrain acquises durant la campagne hydrogéologique complémentaire géotechnique et hydrogéologique de l'été 2019 (SLI 2019a), SNC-Lavalin a été mandatée par NMG afin de réaliser la mise à jour de la modélisation hydrogéologique et du dénoyage des phases 1 à 5 du gisement de graphite du projet Matawinie. Ce dernier est situé à environ 5 km au sud-ouest de la municipalité de Saint-Michel-des-Saints, dans la MRC de Matawinie, Lanaudière, Québec.

Modélisation des écoulements

Le modèle hydrogéologique conceptuel est basé principalement sur l'interprétation des résultats des travaux de terrain réalisés en 2016, 2017 et 2019. En effet, l'ensemble des données recueillies lors des essais de pompage, de la réalisation d'essais hydrauliques en forage (packer tests), des essais de perméabilité (slug tests), et des analyses granulométriques ont permis de préciser les conditions d'écoulement du site, ainsi que les propriétés des unités géologiques.

La construction du modèle hydrogéologique 3D a été réalisée avec le logiciel FEFLOW qui utilise le calcul par éléments finis. La piézométrie simulée du modèle calibré reproduit de manière satisfaisante les niveaux d'eau des puits d'observation, avec un NRMSE de 8,6 %. Au niveau du gisement, le modèle reproduit un écoulement radial, vers le nord en direction de la Rivière-Matawin, et vers le sud-ouest en direction du ruisseau à l'Eau Morte. Le modèle reproduit également la ligne de partage des eaux observée entre le gisement et le lac aux Pierres, d'orientation nord-est/sud-ouest. Un écoulement peu profond part de la ligne de partage des eaux en direction du lac aux Pierres.

Débits de dénoyages & rabattements simulés

Le dénoyage des fosses induit un rabattement du niveau naturel de la nappe souterraine du site. Le dénoyage de chaque fosse a été simulé en utilisant la profondeur et la durée finale d'exploitation afin d'évaluer l'ampleur de ce rabattement et son impact sur les milieux récepteurs. Les rabattements simulés de chaque phase sont conservateurs puisqu'ils sont représentatifs de la profondeur finale d'exploitation. Il est attendu que durant les premiers temps de l'exploitation d'une phase, le dénoyage et les rabattements seront plus faibles, et augmenteront progressivement avec l'élargissement et l'approfondissement de la fosse.

Ainsi, dans les premières années d'exploitation, avant que les profondeurs d'exploitation finales soient atteintes, les rabattements seraient également plus faibles que les résultats présentés. En utilisant un contour de 1 m pour représenter le rabattement minimal de la nappe, le milieu humide au sud de la phase 1 (CP4) pourrait être affecté dès le début des activités minières. Un rabattement pourrait affecter le lac aux Pierres à la fin du dénoyage de la phase 3, c'est-à-dire entre les années 15 et 20. Toutefois, l'impact réel sur les milieux humides et le lac aux Pierres dépend du degré de connexion de ces milieux avec l'aquifère rocheux. Enfin, à l'année 26, un rabattement entre 1 et 4 m pourrait être observé au niveau des puits du Domaine Lagrange les plus proches de la phase 5.

Remontée du niveau d'eau dans la phase 5

Afin d'estimer le temps de remontée du niveau d'eau dans la fosse à la phase 5, une simulation en régime transitoire a été réalisée. À la fin du dénoyage, la phase 5 est dénoyée et la remontée du niveau de la nappe est suivie grâce à un point d'observation fictif placé dans le roc directement sous la phase 5. Les résultats montrent que 80 % de la remontée du niveau d'eau s'effectue dans les trois premières années suivant l'arrêt du dénoyage et le niveau statique est atteint après 30 ans environ.

Limitations et recommandations

La modélisation hydrogéologique est basée d'une part, sur l'interprétation des résultats des travaux de terrain, et d'autre part, sur plusieurs hypothèses théoriques. Ces hypothèses permettent d'extrapoler à plus grande échelle les données disponibles et les représenter sous une forme simplifiée, en gardant cependant une représentation valide des conditions hydrogéologiques importantes du site. Ainsi, le modèle a permis de reproduire de façon générale l'écoulement naturel de l'eau souterraine et de simuler des impacts du dénoyage sur les milieux récepteurs. Toutefois, le modèle développé représente une version conservatrice du système hydrogéologique naturel et de la future fosse qui comporte certaines limitations :

- › Le modèle numérique est une simplification d'un milieu réel plus complexe et ne peut être employé seul dans le cadre d'un processus décisionnel.
- › L'approche de modélisation utilisée pour cette étude repose sur l'hypothèse d'une équivalence entre le milieu rocheux fracturé et un milieu poreux. Cette approche est validée lorsque le milieu rocheux comprend un réseau de fractures suffisamment dense qui réagit comme un milieu poreux équivalent à l'échelle du domaine modélisé. Il est à noter qu'à l'échelle plus locale, les écoulements préférentiels au niveau des fractures sont difficiles à représenter, étant donné l'imprévisibilité inhérente des fractures à cette échelle.
- › Une représentation simplifiée de la recharge a été utilisée.
- › Pour les simulations de dénoyage, la profondeur maximale de chaque phase a été considérée dès le début de l'exploitation de la phase : dénoyage non progressif.

Les recommandations suivantes permettront d'augmenter les connaissances hydrogéologiques du site, d'améliorer le modèle conceptuel et de valider les données obtenues. Dans cette optique, le réseau existant de puits d'observation pourra être optimisé par l'ajout de puits supplémentaires :

- › Mise en place d'un programme de suivi des niveaux d'eau et installation de points d'observation et de contrôle entre la fosse et les milieux récepteurs potentiels : principalement au niveau des milieux humides CP4, CP2, du lac aux Pierres et des puits privés du Domaine Lagrange. À noter qu'une connaissance préalable des fluctuations naturelles du niveau de la nappe est nécessaire pour l'analyse précise des rabattements liés à l'exploitation de la fosse.
- › Collecte de données géochimiques au niveau des points d'observation, avant et pendant l'exploitation. À noter que le réseau initial de suivi évoluera dans le temps pour suivre les phases d'exploitation du gisement.
- › Mise à jour du modèle numérique avec les données collectées à chaque phase d'exploitation.

7 Références

- Anderson M.P., Woessner W.W., (1992). Applied groundwater modeling, Simulation of flow and advective transport, Academic Press, San Diego California.
- ASTM (2002). Standard Guide for Calibrating a Ground-Water Flow Model Application. ASTM D5981-96.
- Hopp L., McDonnella J., and Condonb P. (2011). Lateral Subsurface Flow in a Soil Cover over Waste Rock in a Humid Temperate Environment.
- Johnson, A.I. (1967). Specific yield – Compilation of specific yields for various materials U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1662-D, 74 pp.
- MDDELCC (2013a). Carte bathymétrique – lac du Trèfle.
ftp://ftp.mddep.gouv.qc.ca/CEHQ/cartes_bathymetriques/PDF/05730.pdf
- MDDELCC (2013 b). Carte bathymétrique – lac England.
ftp://ftp.mddep.gouv.qc.ca/CEHQ/cartes_bathymetriques/PDF/00211.pdf
- Robertson GeoConsultants Inc. & SRK Consulting (2012). Groundwater Modelling Guidelines to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities. British Columbia.Ministry of Environment. Report No. 194001.
- SLI (2018a). Étude hydrogéologique - Zone Ouest du bloc Tony. Rapport Rev. 00; no. dossier 633679. Pour Entreprises minières Nouveau Monde.
- SLI (2018 b). Climat et hydrologie. Projet Matawinie du Nouveau Monde Graphite. Rapport no. Rev. 633679_SLEG_Hydrologie_R01.
- SLI (2019a). Investigation hydrogéologique complémentaire, Rapport factuel, no. dossier 666896-2300-4GER-0001.
- SLI (2019 b). Modélisation hydrogéologique; no. dossier 654068-9300-4WER-0001.
- SLI (2019c). Simulations numériques dans le cadre de l'ingénierie de faisabilité pour la gestion des résidus et stériles miniers. no. dossier 654068-9000-4WER-0001.
- SLI (2019d). Projet Matawinie –Climat et hydrologie, N/Dossier n° : 653897_011_SLEG_Climat_Hydrologie_L01, rapport sectoriel 011, Lévis 35 p.
- Szczepinski (2019). The Significance of Groundwater Flow Modeling Study for Simulation of Opencast Mine Dewatering, Flooding, and the Environmental Impact, Water 2019, 11, 848; doi:10.3390/w11040848.
- WASY Software, 2005. FEFLOW 6.2 finite element subsurface flow and transport simulation system: user's manual. WASY Institute, Berlin, 192pp.

Détail du calcul d'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE)

DÉTAIL DU CALCUL DE NRMSE

Liste des 66 puits considérés pour la calibration : le surlignage bleu et rouge identifie les puits où le niveau d'eau mesuré est minimal ou maximal, respectivement.

Nom du puits	Charges observées (m)	Charges simulées (m)	Erreur ²
F-02-19	543,32	546,79	12
F-04-19	549,95	557,61	59
F-05-19	549,80	549,59	0
F-07A-19	530,64	536,01	29
F-08-19	545,62	551,88	39
F-09A-19	521,38	522,34	1
F-10A-19	512,82	507,55	28
F-12-19	546,68	543,73	9
F-13-19	511,69	493,34	337
F-14A-19	488,06	492,82	23
F-15-19	474,17	483,21	82
F-16A-19	464,58	474,65	101
F-17A-19	461,42	474,46	170
F-18A-19	460,61	466,05	30
FL-01-19	471,84	485,87	197
FL-02A-19	467,27	474,81	57
GT-17-01-bas(2)	512,49	526,09	185
GT-17-02-bas(1)	536,11	534,98	1
GT-17-03-bas(1)	526,60	531,41	23
GT-17-04-bas(2)	525,85	530,24	19
GT-17-05-bas(2)	523,64	528,55	24
GT-17-06	524,33	532,44	66
GT-17-08-bas (1)	552,86	546,52	40
GT-17-09	544,64	548,72	17
GT-17-10	541,18	553,54	153
GT-17-11	470,80	481,00	104
GT-17-12	507,05	507,06	0
GT-17-13	494,79	497,22	6
GT-17-14	542,04	525,37	278
GT-17-15	510,68	504,08	44
GT-17-16	546,11	530,93	230

Nom du puits	Charges observées (m)	Charges simulées (m)	Erreur ²
GT-17-17	544,97	554,77	96
GT-17-18	558,30	556,47	3
GT-17-19	573,76	564,27	90
HG-17-01	491,36	503,01	136
HG-17-02	529,36	533,49	17
HG-17-03	529,76	533,70	16
HG-17-04	545,92	549,59	13
HG-17-06	538,87	550,23	129
HG-17-07	551,29	535,29	256
HG-17-08	525,71	533,07	54
HG-17-09	478,92	477,09	3
PF-17-3	466,40	475,42	81
PP1-19	471,94	485,04	172
S_Lac_aux_P	524,40	530,14	33
TO-16-102	539,06	535,87	10
TO-16-110	535,04	539,06	16
TO-16-111	531,24	546,42	230
TO-16-112	568,28	548,84	378
TO-16-77	555,07	542,26	164
TO-16-87	526,99	533,62	44
TO-16-88	527,60	535,12	57
TO-16-91	527,47	533,09	32
TO-16-93	518,21	529,59	129
TO-16-95	519,06	528,32	86
TO-16-99	479,90	493,27	179
TO-17-118	550,21	544,11	37
TO-17-119	551,13	552,86	3
TO-17-120	543,93	547,06	10
TO-17-121	539,96	542,32	6
TO-17-125	540,06	540,40	0
TO-17-MT-05	525,01	530,99	36
TO-17-MT-06	514,78	525,63	118
TO-17-MT-08	500,55	519,35	353
TO-17-MT-09	496,07	515,09	362
TO-18-129	472,43	497,19	613

Calcul du NRMSE :

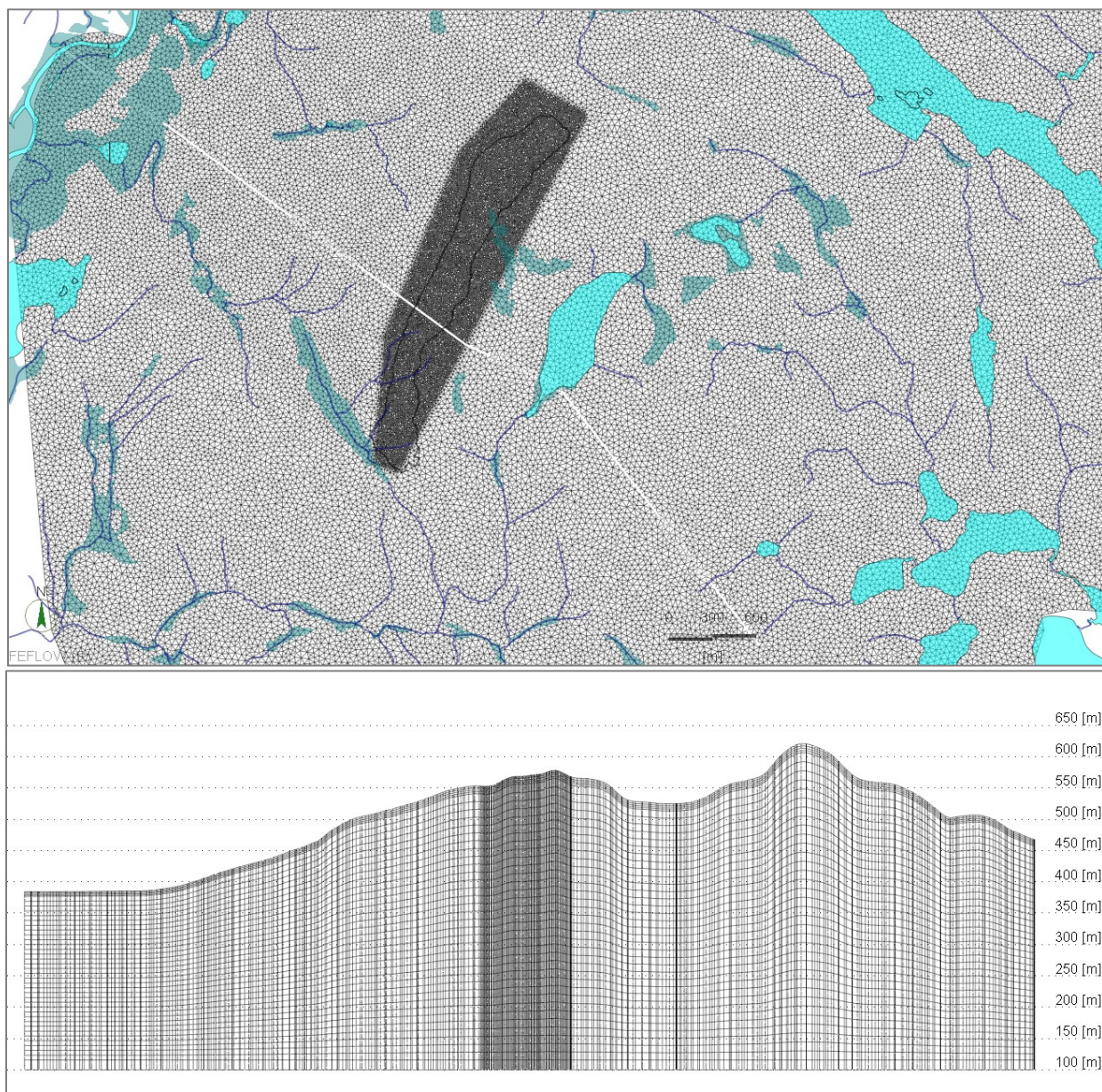
$$\text{NRMSE (\%)} = \frac{1}{(h_{\max} - h_{\min})} \times \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_s - h_m)^2 \right]^{1/2}$$

$$\text{NRMSE (\%)} = \frac{1}{(573,76 - 460,61)} \times \left[\frac{1}{66} \sum_{i=1}^{63} (h_s - h_m)^2 \right]^{1/2}$$

$$\text{NRMSE (\%)} = 8.65$$

Annexe B

Maillage du modèle numérique Feflow



Maillage en carte et en coupe transversale au gisement. Exagération verticale x4

Horizontalement, les éléments présentent les dimensions suivantes :

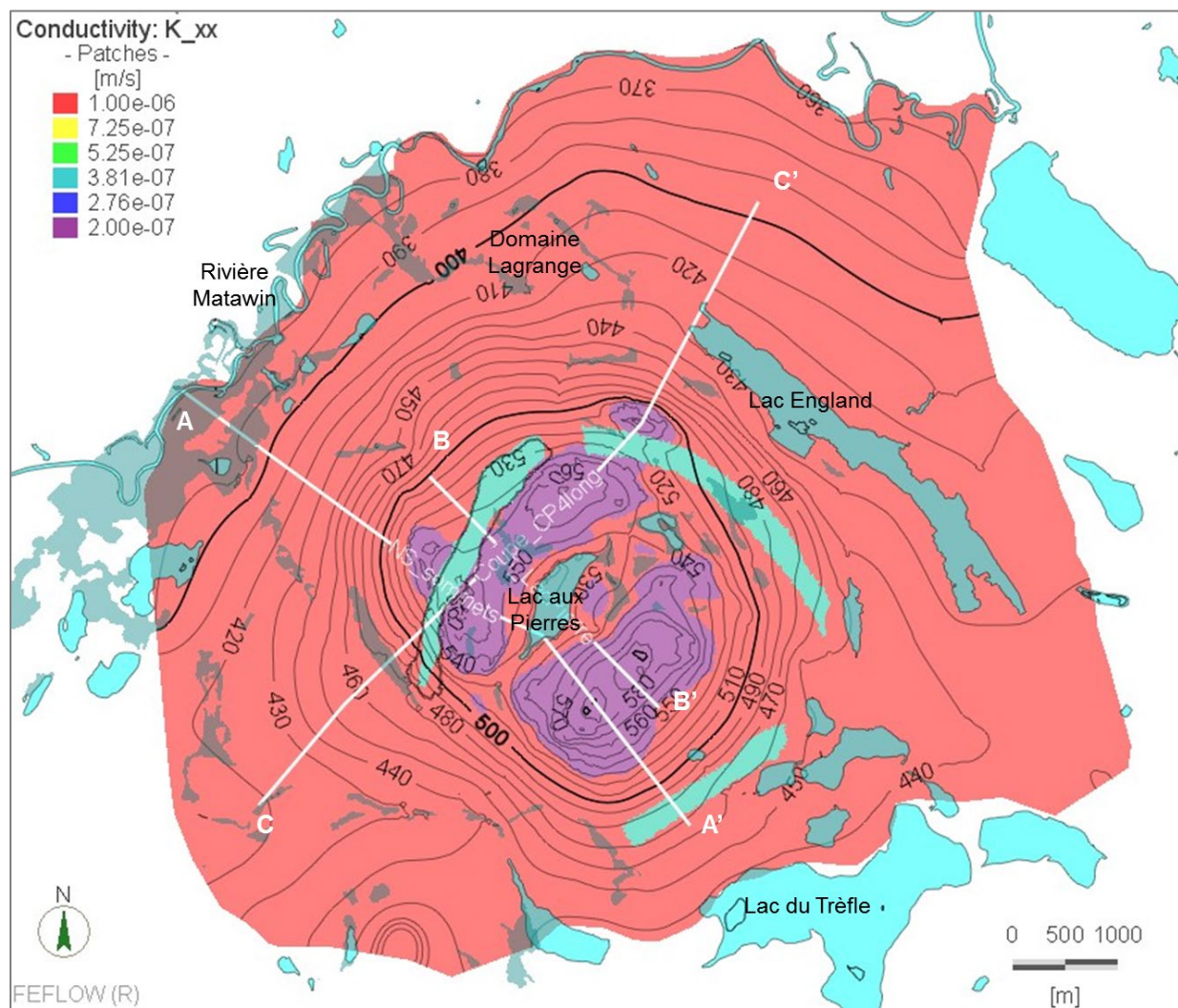
- › À l'extérieur de la fosse, 30 m de côté, et
- › Dans la fosse 10 m de côté.

Verticalement, les couches présentent des dimensions variables :

- › L'épaisseur des couches est variable avec une épaisseur moyenne de 10 m au centre du modèle;
- › Les huit premières couches du modèle ont une épaisseur de 3 m afin de mieux représenter la géométrie des formations superficielles.

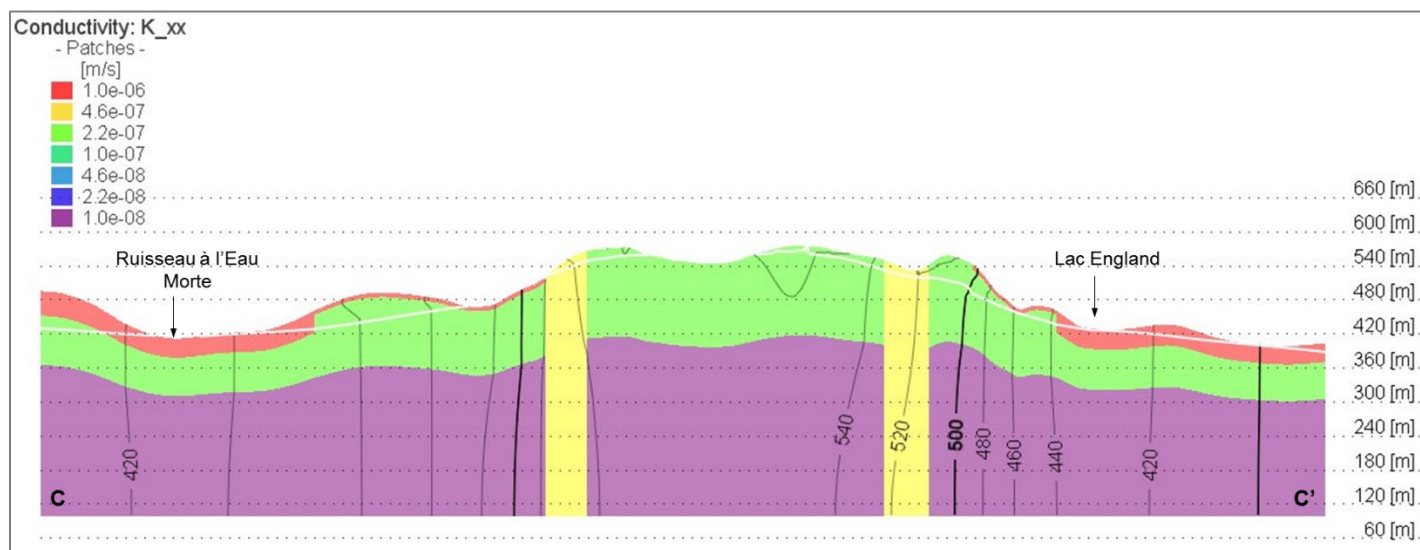
Annexe C

Piézométrie calibrée en coupe



Piézométrie simulée et localisation des coupes en plan

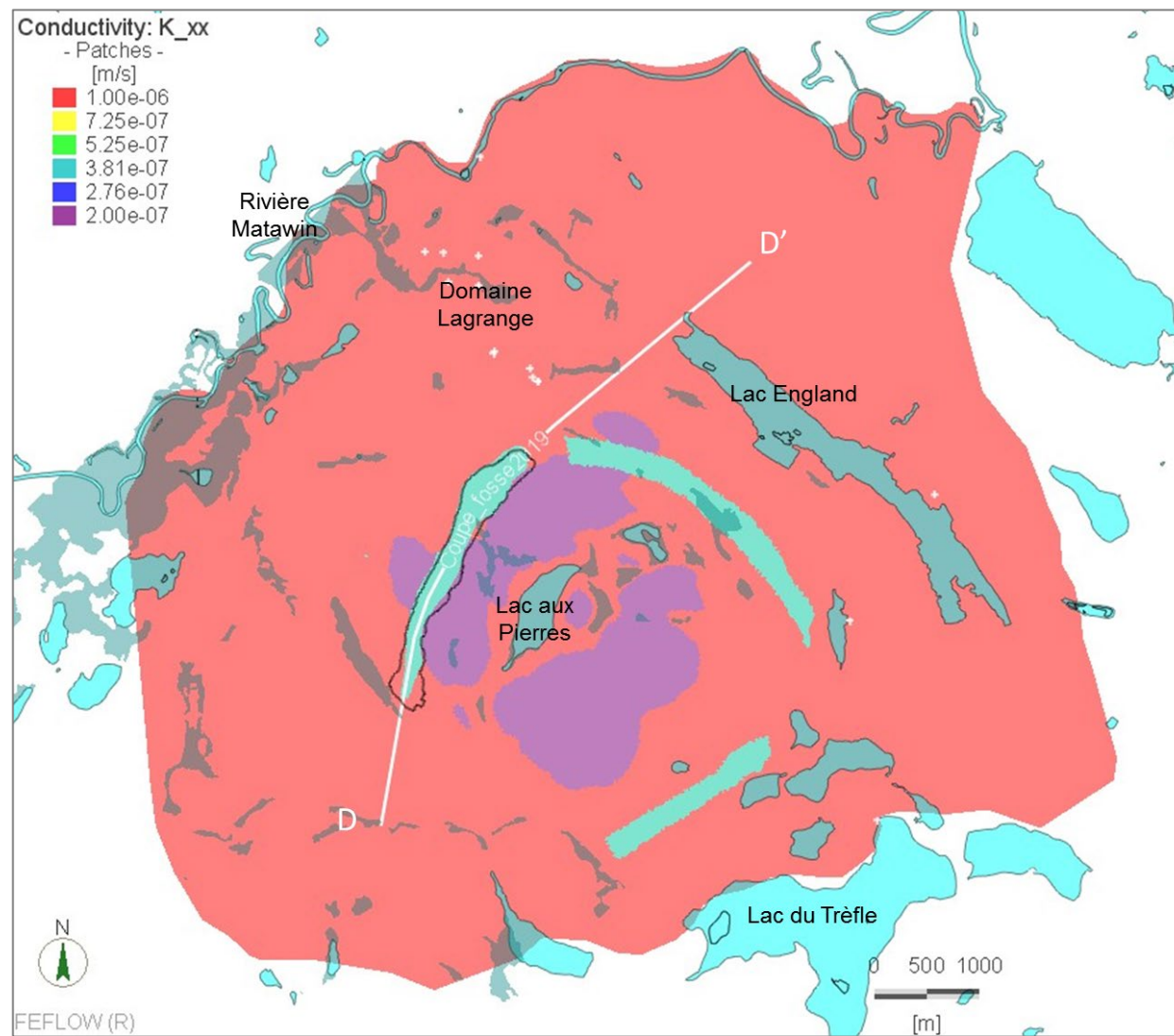




Annexe D

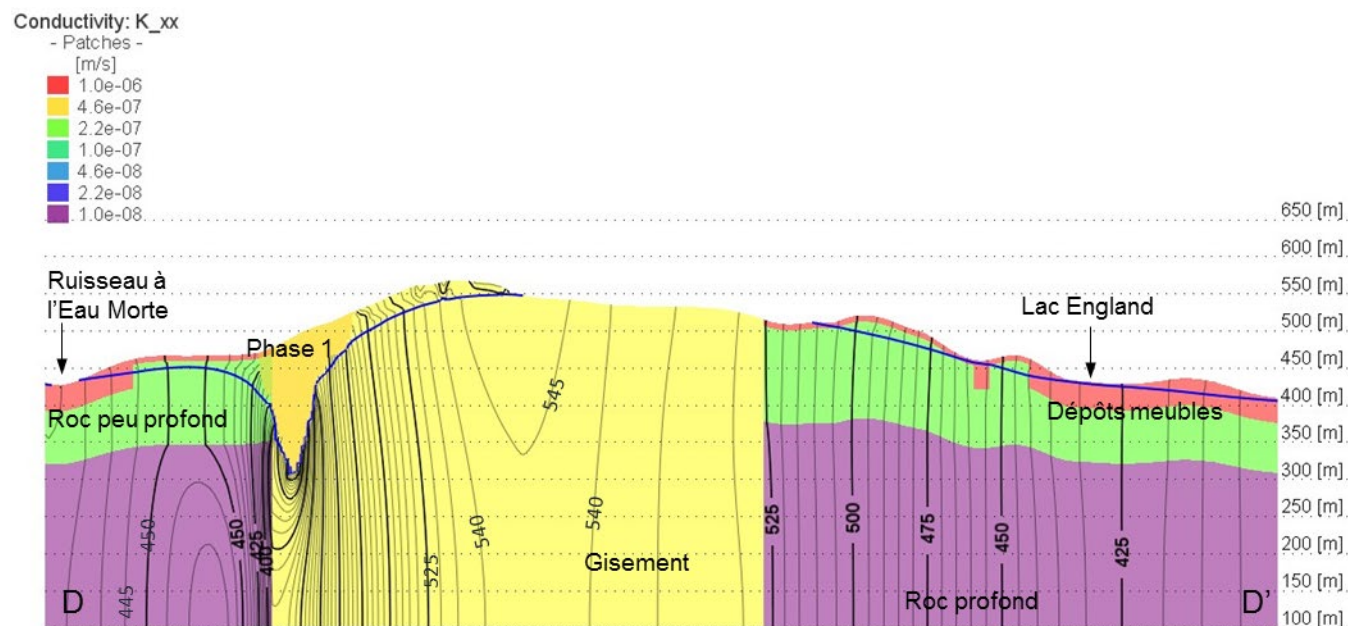
Rabattements simulés en coupe

DÉNOYAGE DES PHASES 1 À 5 : COUPE LONGITUDINALE AU GISEMENT

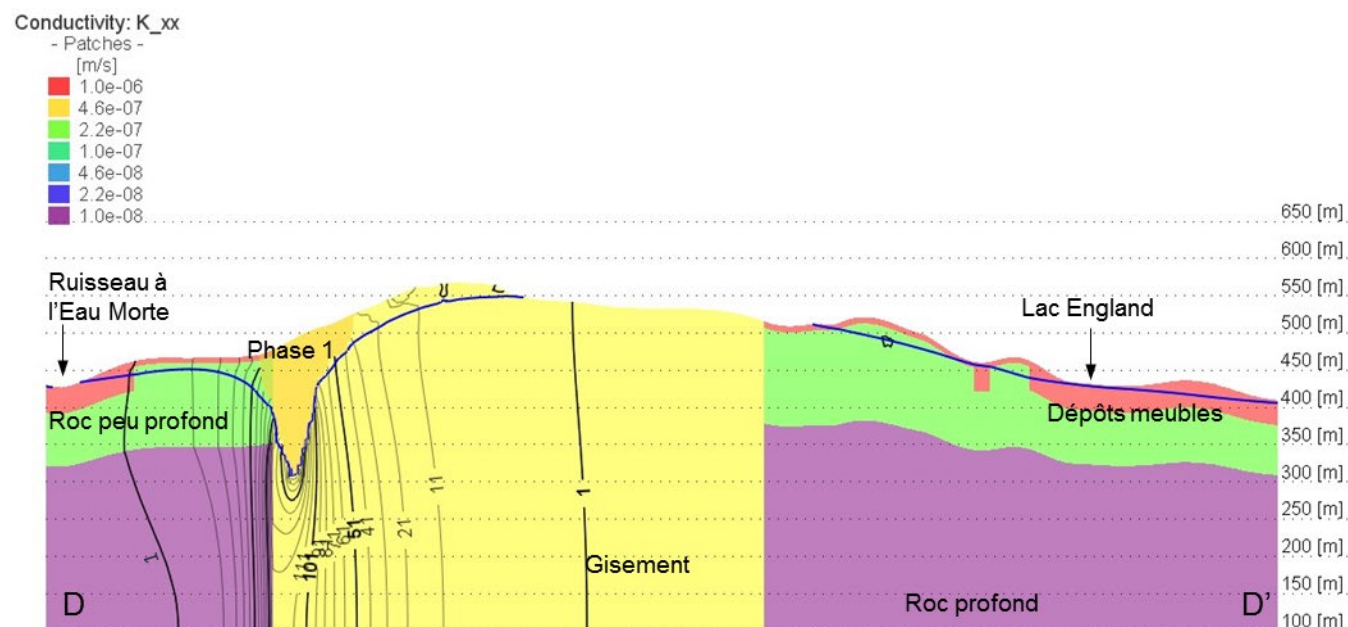


Localisation de la coupe longitudinale au gisement pour visualisation du dénoyage

PHASE 1 - ANNÉE 05 : COUPE LONGITUDINALE AU GISEMENT



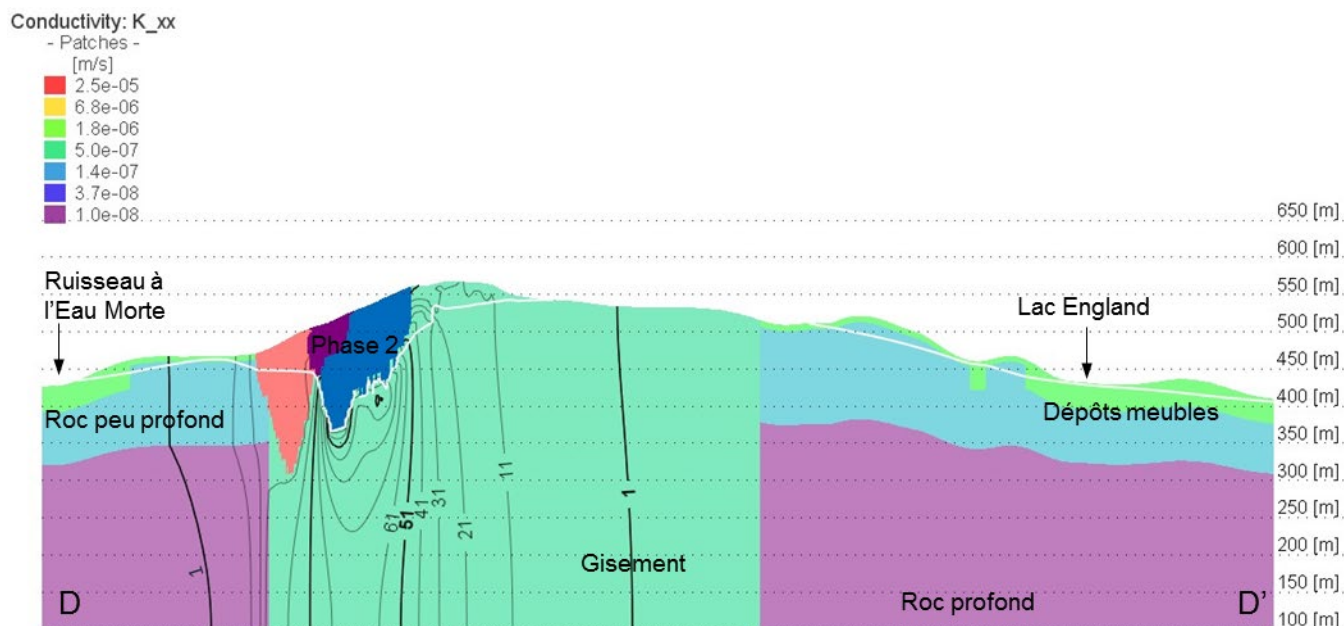
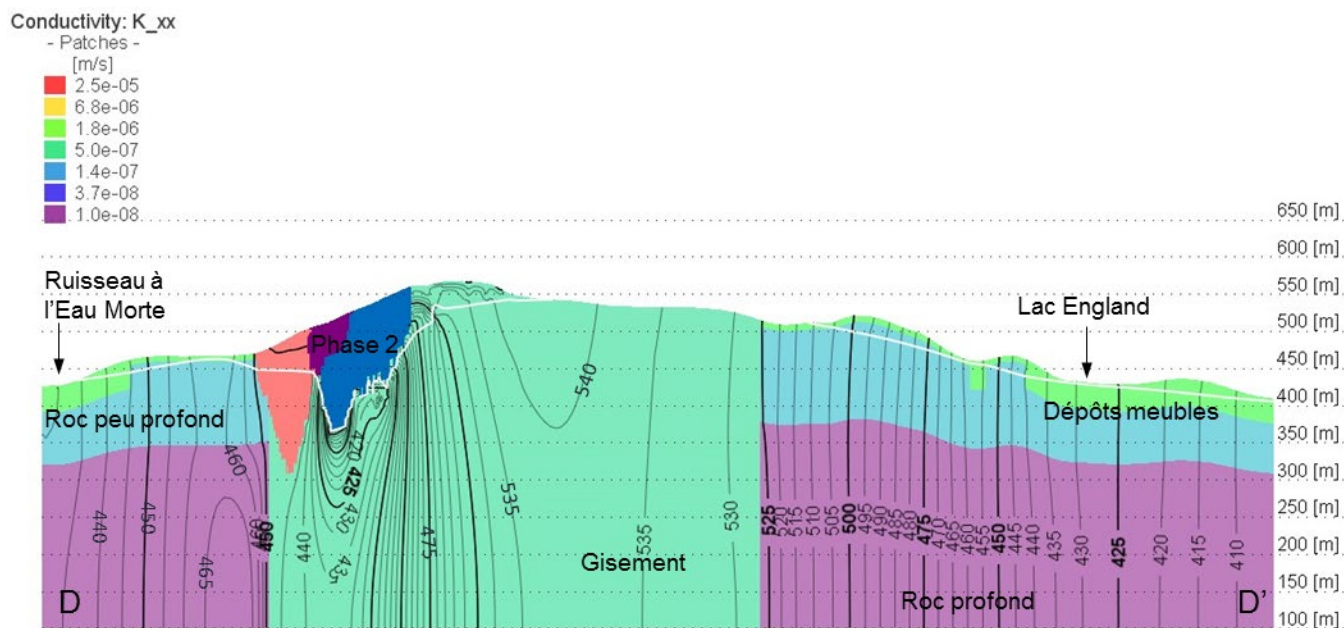
Charges simulées (m) après 5 ans de dénoyage, de l'année 0 à 5 (exagération verticale x4)



Rabattelements simulés (m) après 5 ans de dénoyage, de l'année 0 à 5 (exagération verticale x4)

La ligne bleue représente la surface de la nappe.

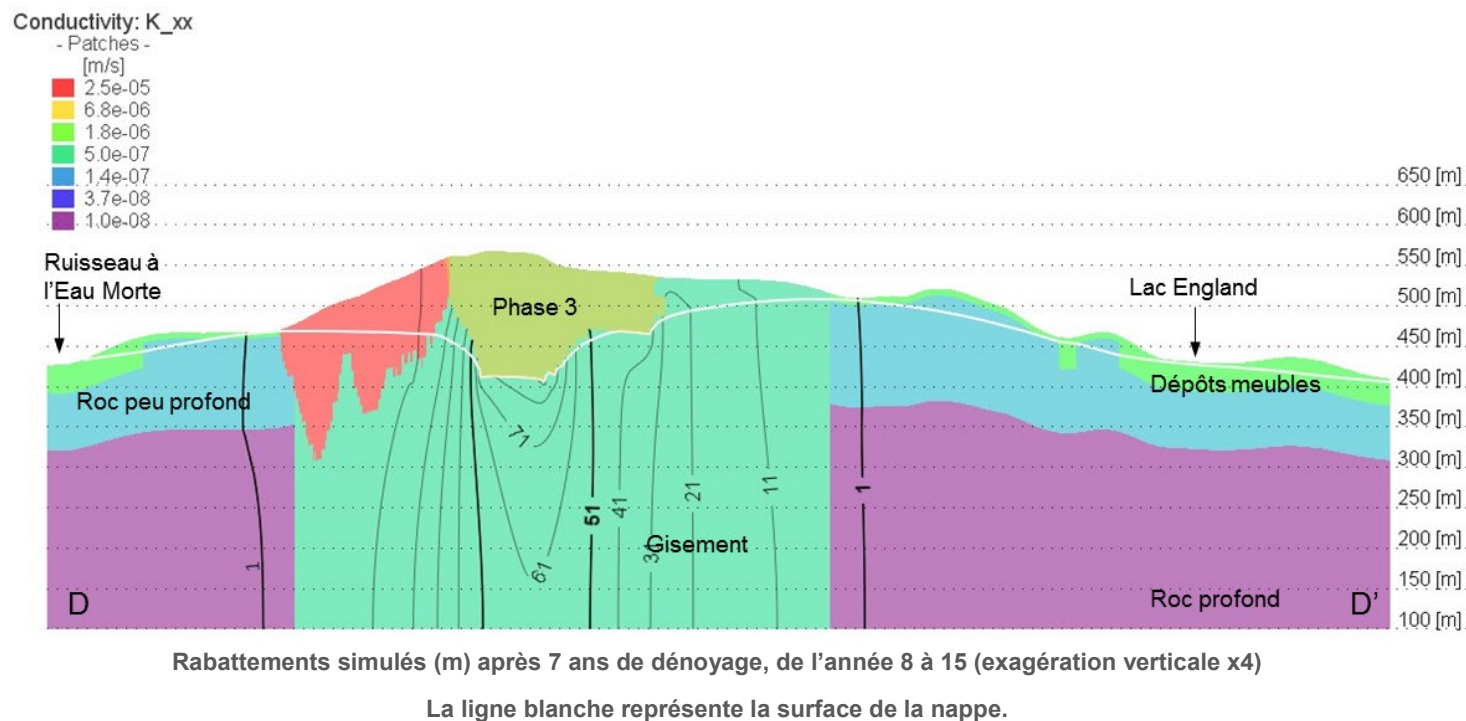
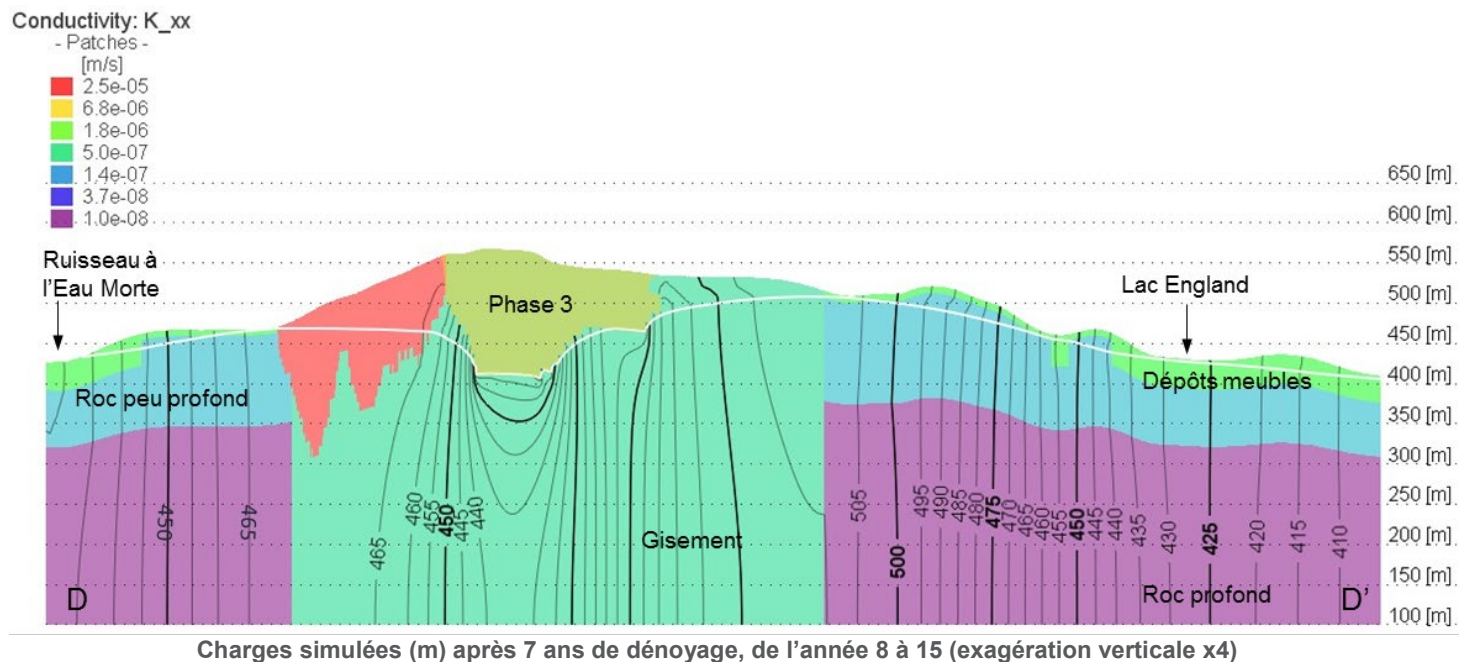
PHASE 2 - ANNÉE 08 : COUPE LONGITUDINALE AU GISEMENT



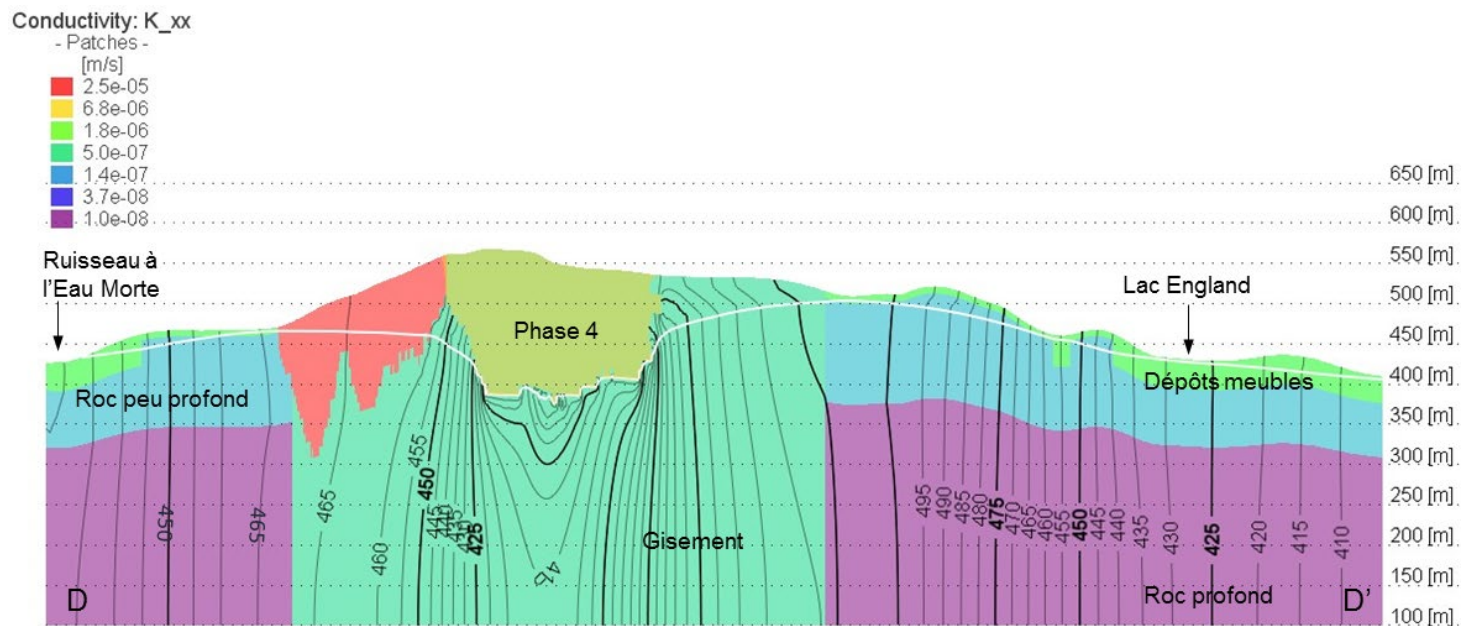
La ligne blanche représente la surface de la nappe.

La phase 1 (rouge) est remplie de stériles miniers et résidus miniers ayant une conductivité hydraulique estimée de de $2,5 \times 10^{-05}$ m/s.

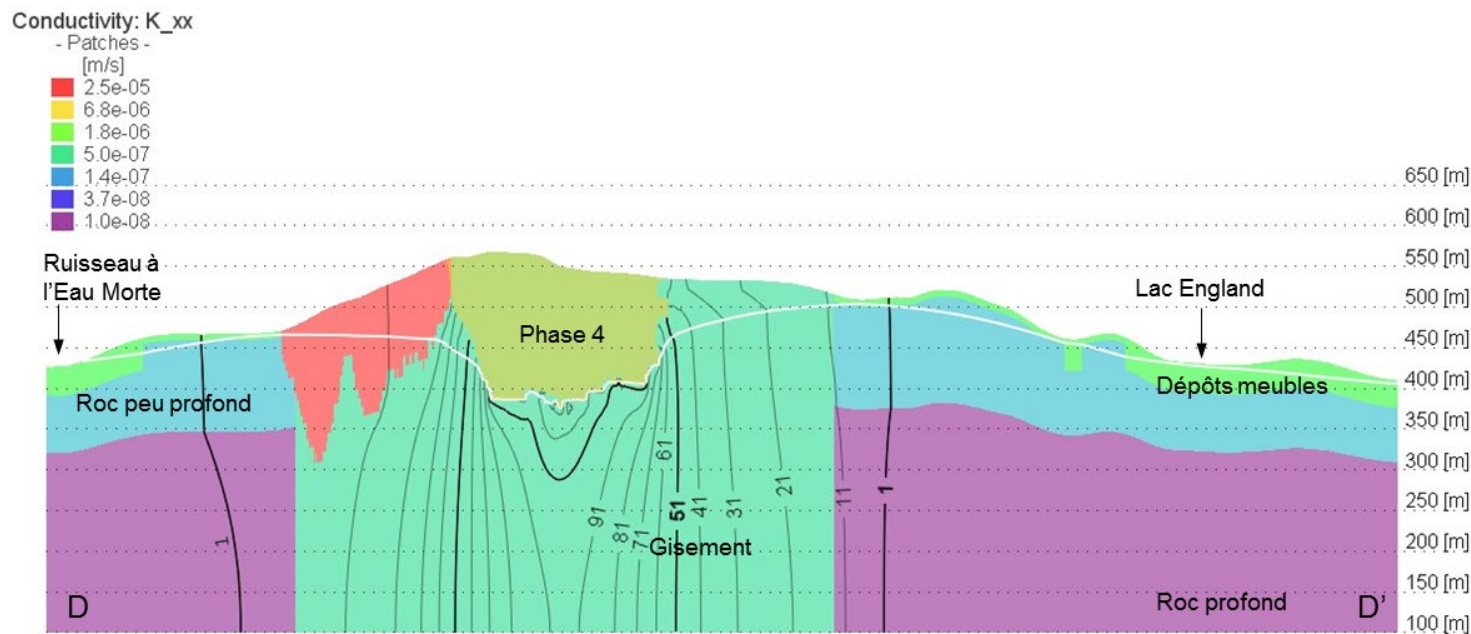
PHASE 3 - ANNÉE 15 : COUPE LONGITUDINALE AU GISEMENT



PHASE 4 - ANNÉE 20 : COUPE LONGITUDINALE AU GISEMENT



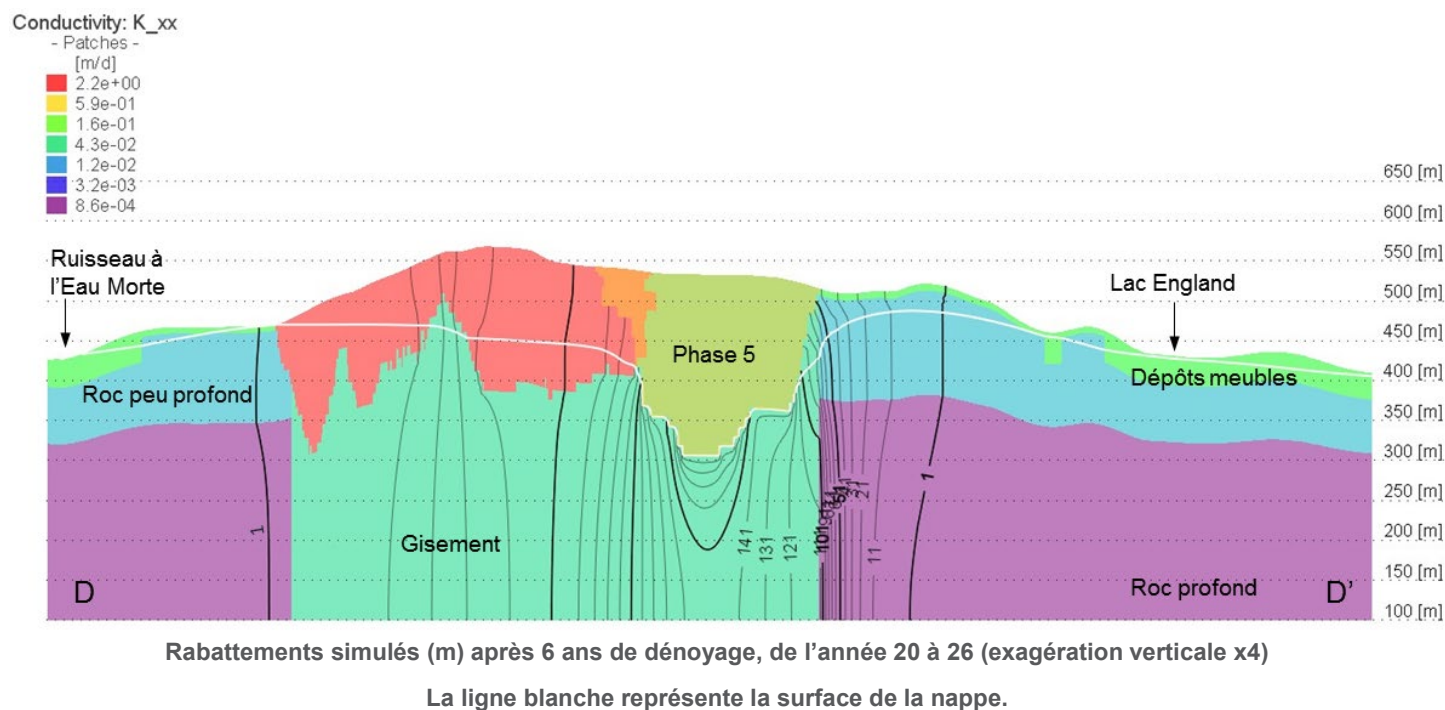
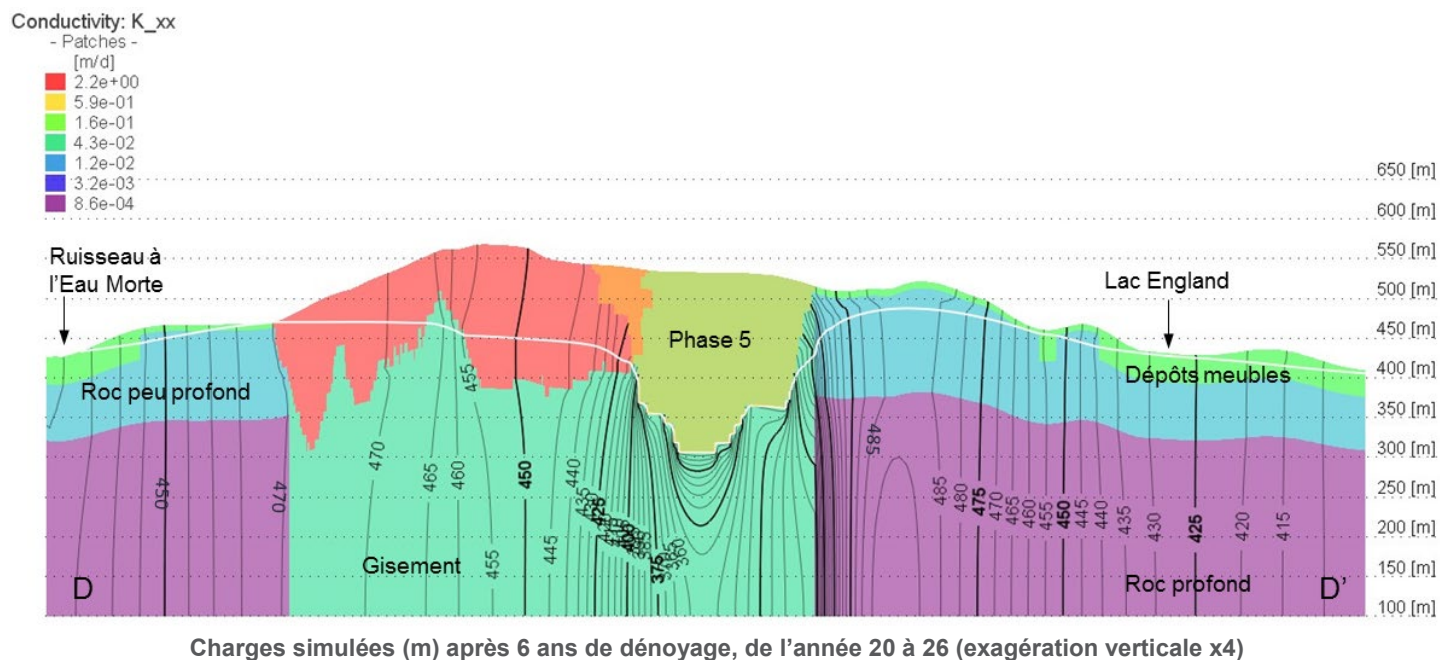
Charges simulées (m) après 12 ans de dénoyage, de l'année 8 à 15, puis 15 à 20 (exagération verticale x4)



Rabattelements simulés (m) après 12 ans de dénoyage, de l'année 8 à 15, puis 15 à 20 (exagération verticale x4)

La ligne blanche représente la surface de la nappe.

PHASE 5 - ANNÉE 26 : COUPE LONGITUDINALE AU GISEMENT

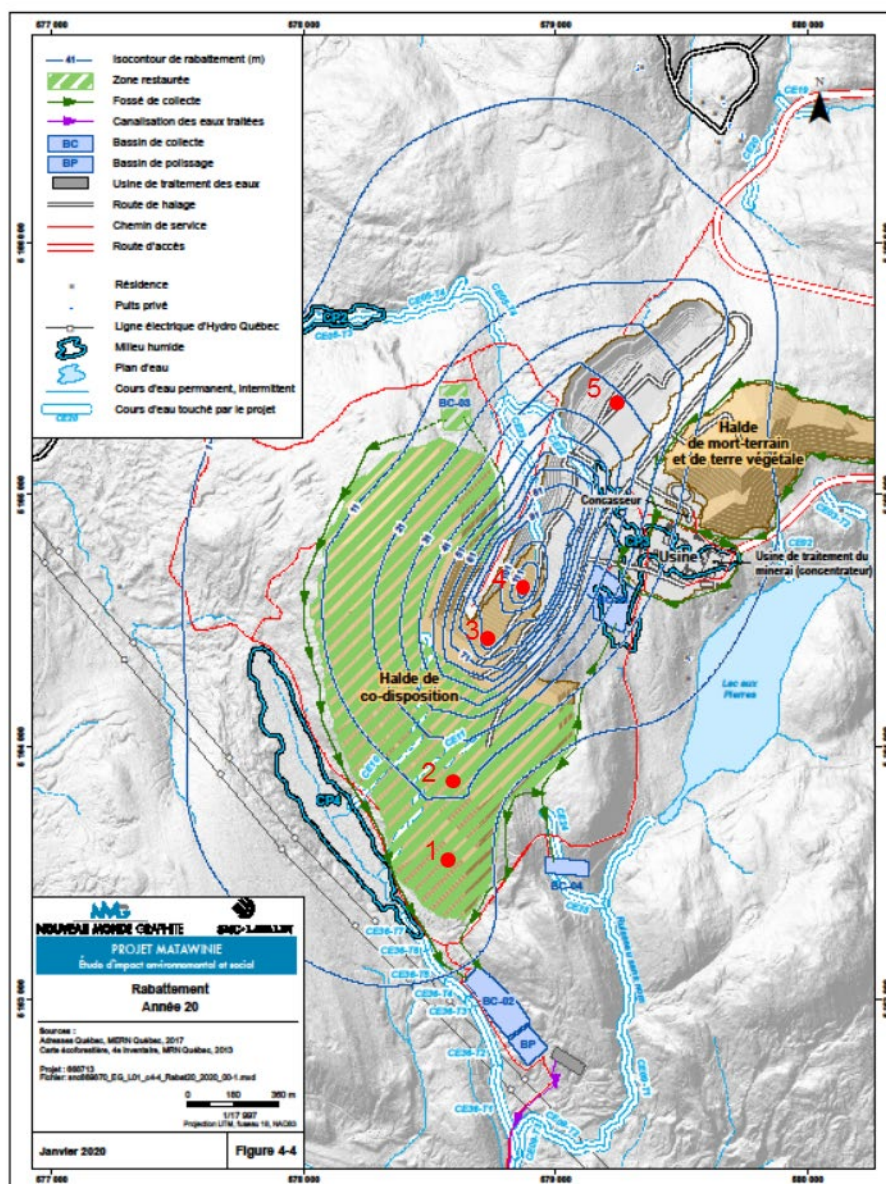


Annexe E

Élévations simulées du niveau de la nappe pendant les phases de dénoyage

ÉLÉVATIONS SIMULÉES PENDANT LES PHASES DE DÉNOYAGE

Les niveaux attendus de l'eau souterraine à la suite du rabattement ont été estimés avec la modélisation hydrogéologique. Les résultats sont basés sur les cartes de rabattement présentées dans le rapport (figures 4-1 à 4-5) et montrent les niveaux d'eau et les rabattements simulés pour chacune des 5 phases d'exploitation. Ces niveaux sont basés sur des résultats de simulation en régime transitoire, et la lecture est réalisée approximativement à l'emplacement le plus profond de chaque phase (voir figure ci-dessous).



Position des points de lecture du niveau de la nappe sur la carte des rabattements simulés à l'année 20

Tableau 1 Élévations simulées pendant les phases de dénoyage

Year	Élévation simulée du niveau d'eau au centre de la fosse (m)				
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Y05	320	-	-	-	-
Y08	450	385	-	-	-
Y15	475	475	430	-	-
Y20	475	475	-	385	-
Y26	475	475	450	450	305

Tableau 2 Niveau disponible pour la déposition des résidus PAG selon les phases du projet

Year	Niveau maximal prévu pour déposition des résidus acidogènes (m)				
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Y05	-	-	-	-	-
Y08	320-450	-	-	-	-
Y15	320-475	385-475	-	-	-
Y20	320-475	385-475	-	-	-
Y26	320-475	385-475	430-450	385-450	-

Les cases grises dans le tableau 1 représentent l'élévation de la nappe avec les élévations maximales d'exploitation de chaque phase. Pour la colonne « Phase 1 » du tableau 1, on observe une remontée du niveau d'eau après la période de dénoyage initiale de 5 ans. Ainsi à l'année 8 (Y08), le niveau d'eau dans la phase 1 est de 450 m pour atteindre 475 m à l'année 26. À noter qu'à partir de l'année 15, le niveau de la nappe est relativement stable dans la phase 1, autour de 475 m.

Le tableau 2 montre les niveaux disponibles (élévation dans la fosse) où une remontée de la nappe est prévue, et donc les zones où les résidus miniers acidogènes peuvent être disposés selon les données actuelles du projet. Puisqu'il s'agit d'une modélisation numérique avec plusieurs hypothèses, la remontée de la nappe devra être validée avec le plan de déposition et le suivi des eaux souterraines et une mise à jour du modèle hydrogéologique lors de l'exploitation de la fosse. Les principales limitations aux modèles sont :

- › Chaque simulation de dénoyage est indépendante et ne considère pas la baisse de niveau de la nappe liée au dénoyage des phases antérieures.
- › Le dénoyage dans le modèle est instantané et considère le niveau maximal d'exploitation de chaque phase dès le début du dénoyage, ce qui est très conservateur. Dans la réalité, l'intensité du dénoyage augmentera au fur et à mesure de l'exploitation, avec l'augmentation de la profondeur de la phase.

- › La lecture des niveaux d'eau est réalisée au centre de chaque phase tel qu'indiqué sur la figure précédente (point le plus profond), mais cette lecture comporte une certaine imprécision du fait d'une importante variabilité spatiale (les isocontours de rabattement étant très rapprochés au centre de la fosse).

Annexe F

Portée du rapport

1. Utilisation du rapport

a. Utilisation du rapport

Le présent rapport a été préparé, et les travaux qui y sont mentionnés ont été réalisés par SNC-Lavalin GEM Québec inc. (SNC-Lavalin) exclusivement à l'intention du client (le Client) auquel le rapport est adressé, qui a pris part à l'élaboration de l'énoncé des travaux et en comprend les limites. La méthodologie, les conclusions, les recommandations et les résultats cités au présent rapport sont fondés uniquement sur l'énoncé des travaux et assujettis aux exigences en matière de temps et de budget, telles que décrites dans l'offre de services et/ou dans le contrat en vertu duquel le présent rapport a été émis. L'utilisation de ce rapport, le recours à ce dernier ou toute décision fondée sur son contenu par un tiers est la responsabilité exclusive de ce dernier. SNC-Lavalin n'est aucunement responsable de tout dommage subi par un tiers du fait de l'utilisation de ce rapport ou de toute décision fondée sur son contenu. Les conclusions, les recommandations et les résultats cités au présent rapport (i) ont été élaborés conformément au niveau de compétence normalement démontré par des professionnels exerçant des activités dans des conditions similaires de ce secteur, et (ii) sont déterminés selon le meilleur jugement de SNC-Lavalin en tenant compte de l'information disponible au moment de la préparation du présent rapport. Les services professionnels fournis au Client et les conclusions, les recommandations et les résultats cités au présent rapport ne font l'objet d'aucune autre garantie, explicite ou implicite. Les conclusions et les résultats cités au présent rapport sont valides uniquement à la date du rapport et peuvent être fondés, en partie, sur de l'information fournie par des tiers. En cas d'information inexacte, de la découverte de nouveaux renseignements ou de changements aux paramètres du projet, des modifications au présent rapport pourraient s'avérer nécessaires. Les résultats de cette étude ne constituent en aucune façon une garantie que le terrain à l'étude est exempt de toute contamination. Le présent rapport doit être considéré dans son ensemble, et ses sections ou ses parties ne doivent pas être vues ou comprises hors contexte. Si des différences venaient à se glisser entre la version préliminaire (ébauche) et la version définitive de ce rapport, cette dernière prévaudrait. Rien dans ce rapport n'est mentionné avec l'intention de fournir ou de constituer un avis juridique. Le contenu du présent rapport est de nature confidentielle et exclusive. Il est interdit à toute personne, autre que le Client, de reproduire ou de distribuer ce rapport, de l'utiliser ou de prendre une décision fondée sur son contenu, en tout ou en partie, sans la permission écrite expresse du Client et de SNC-Lavalin.

b. Modifications au projet

Les données factuelles, les interprétations et les recommandations contenues dans ce rapport ont trait au projet spécifique tel que décrit dans le rapport et ne s'appliquent à aucun autre projet ni autre site. Si le projet est modifié du point de vue conception, dimensionnement, emplacement ou niveau, SNC-Lavalin devra être consulté de façon à confirmer que les recommandations déjà données demeurent valides et applicables.

c. Nombre de sondages

Les recommandations données dans ce rapport n'ont pour but que de servir de guide à l'ingénieur en conception. Le nombre de sondages pour déterminer toutes les conditions souterraines qui peuvent affecter les travaux de construction (coûts, techniques, matériel, échancier), devrait normalement être plus élevé que celui pour les besoins du dimensionnement. Le nombre de points d'échantillonnage et d'analyses chimiques ainsi que la fréquence d'échantillonnage et le choix des paramètres peuvent influencer la nature et l'envergure des actions correctives ainsi que les techniques et les coûts de traitement ou de disposition. Les entrepreneurs qui soumissionnent ou qui sous-traitent le travail, devraient compter sur leurs propres études ainsi que sur leurs propres interprétations des résultats factuels des sondages pour apprécier de quelle façon les conditions souterraines peuvent affecter leur travail et les coûts des travaux.

d. Interprétation des données, commentaires et recommandations

À moins d'avis contraire, l'interprétation des données et des résultats, les commentaires et les recommandations contenus dans ce rapport sont fondés, au mieux de notre connaissance, sur les politiques, les critères et les règlements environnementaux en vigueur à l'emplacement du projet et à la date de production du rapport. Si ces politiques, critères et règlements font l'objet de modifications après la soumission du rapport, SNC-Lavalin devra être consulté pour réviser les recommandations à la lumière de ces changements. Lorsqu'aucune politique, critère ou réglementation n'est disponible pour permettre l'interprétation des données et des résultats analytiques, les commentaires ou recommandations exprimés par SNC-Lavalin sont basés sur la meilleure connaissance possible des règles acceptées dans la pratique professionnelle. Les analyses, commentaires et recommandations contenus dans ce rapport sont fondés sur les données et observations recueillies sur le site, lesquelles proviennent de travaux d'échantillonnage effectués sur le site. Il est entendu que seules les données directement recueillies à l'endroit des sondages, des sites d'échantillonnage et à la date de l'échantillonnage sont exactes et que toute interpolation ou extrapolation de ces résultats à l'ensemble ou à une partie du site comporte des risques d'erreurs qui peuvent elles-mêmes influencer la nature et l'ampleur des actions requises sur le site.

2. Rapports de sondage et interprétation des conditions souterraines

a. Description des sols et du roc

Les descriptions des sols et du roc données dans ce rapport proviennent de méthodes de classification et d'identification communément acceptées et utilisées dans la pratique de la géotechnique. La classification et l'identification du sol et du roc font appel à un jugement. SNC-Lavalin ne garantit pas que les descriptions seront identiques en tout point à celles faites par un autre géotechnicien possédant les mêmes connaissances des règles de l'art en géotechnique, mais assure une exactitude seulement à ce qui est communément utilisé dans la pratique de la géotechnique.

b. Conditions des sols et du roc à l'emplacement des sondages

Les rapports de sondage ne fournissent que des conditions du sous-sol à l'emplacement des sondages seulement. Les limites entre les différentes couches sur les rapports de sondage sont souvent approximatives, correspondant plutôt à des zones de transition, et ont donc fait l'objet d'une interprétation. La précision avec laquelle les conditions souterraines sont indiquées, dépend de la méthode de sondage, de la fréquence et de la méthode d'échantillonnage ainsi que de l'uniformité du terrain rencontré. L'espacement entre les sondages, la fréquence d'échantillonnage et le type de sondage sont également le reflet de considérations budgétaires et de délais d'exécution qui sont hors du contrôle de SNC-Lavalin.

c. Conditions des sols et du roc entre les sondages

Les formations de sol et de roc sont variables sur une plus ou moins grande étendue. Les conditions souterraines entre les sondages sont interpolées et peuvent varier de façon significative autant en plan qu'en profondeur des conditions rencontrées à l'endroit des sondages. SNC-Lavalin ne peut en effet garantir les résultats qu'à l'endroit des sondages effectués. Toute interprétation des conditions présentées entre les sondages comporte des risques. Ces interprétations peuvent conduire à la découverte de conditions différentes de celles qui étaient prévues. SNC-Lavalin ne peut être tenu responsable de la découverte de conditions de sol et de roc différentes de celles décrites ailleurs qu'à l'endroit des sondages effectués.

d. Niveaux de l'eau souterraine

Les niveaux de l'eau souterraine donnés dans ce rapport correspondent seulement à ceux observés à l'endroit et à la date indiqués dans le rapport ainsi qu'en fonction du type d'installation piézométrique utilisé. Ces conditions peuvent varier de façon saisonnière ou suite à des travaux de construction sur le site ou sur des sites adjacents. Ces variations sont hors du contrôle de SNC-Lavalin.

3. Niveaux de contamination

Les niveaux de contamination décrits dans ce rapport correspondent à ceux détectés à l'endroit et à la date indiqués dans le rapport. Ces niveaux peuvent varier selon les saisons ou par suite d'activités sur le site à l'étude ou sur des sites adjacents. Ces variations sont hors de notre contrôle. Les niveaux de contamination sont déterminés à partir des résultats des analyses chimiques effectuées sur un nombre limité d'échantillons de sol, d'eau de surface ou d'eau souterraine. La nature et le degré de contamination entre les points d'échantillonnage peuvent varier de façon importante de ceux à ces points. La composition chimique des eaux souterraines à chaque point d'échantillonnage est susceptible de changer en raison de l'écoulement souterrain, des conditions de recharge par la surface, de la sollicitation de la formation investiguée (i.e. puits de pompage ou d'injection à proximité du site) ainsi que de la variabilité saisonnière naturelle. La précision des niveaux de contamination de l'eau souterraine dépend de la fréquence et du nombre d'analyses effectuées. La liste des paramètres analysés est basée sur notre meilleure connaissance de l'historique du site et des contaminants susceptibles d'être trouvés sur le site et est également le reflet de considérations budgétaires et de délais d'exécution. Le fait qu'un paramètre n'ait pas été analysé n'exclut pas qu'il soit présent à une concentration supérieure au bruit de fond ou à la limite de détection de ce paramètre.

4. Suivi de l'étude et des travaux

a. Vérification en phase finale

Tous les détails de conception et de construction ne sont pas connus au moment de l'émission du rapport. Il est donc recommandé que les services de SNC-Lavalin soient retenus pour apporter toute la lumière sur les conséquences que pourraient avoir les travaux de construction sur l'ouvrage final.

b. Inspection durant l'exécution

Il est recommandé que les services de SNC-Lavalin soient retenus pendant la construction, pour vérifier et confirmer d'une part que les conditions souterraines sur toute l'étendue du site ne diffèrent pas de celles données dans le rapport et d'autre part, que les travaux de construction n'auront pas un effet défavorable sur les conditions du site.

5. Changement des conditions

Les conditions de sol décrites dans ce rapport sont celles observées au moment de l'étude. À moins d'indication contraire, ces conditions forment la base des recommandations du rapport. Les conditions de sol peuvent être modifiées de façon significative par les travaux de construction (trafic, excavation, etc.) sur le site ou sur les sites adjacents. Une excavation peut exposer les sols à des changements dus à l'humidité, au séchage ou au gel. Sauf indication contraire, le sol doit être protégé de ces changements ou remaniements pendant la construction. Lorsque les conditions rencontrées sur le site diffèrent de façon significative de celles prévues dans ce rapport, dues à la nature hétérogène du sous-sol ou encore à des travaux de construction, il est du ressort du Client et de l'utilisateur de ce rapport de prévenir SNC-Lavalin des changements et de fournir à SNC-Lavalin l'opportunité de réviser les recommandations de ce rapport. Reconnaître un changement des conditions de sol demande une certaine expérience. Il est donc recommandé qu'un ingénieur géotechnicien expérimenté soit dépêché sur le site afin de vérifier si les conditions ont changé de façon significative.

6. Drainage

Le drainage de l'eau souterraine est souvent requis aussi bien pour des installations temporaires que permanentes du projet. Une conception ou exécution impropre du drainage peut avoir de sérieuses conséquences. SNC-Lavalin ne peut en aucun cas prendre la responsabilité des effets du drainage à moins que SNC-Lavalin ne soit spécifiquement impliqué dans la conception détaillée et le suivi des travaux de construction du système de drainage.

7. Caractérisation environnementale – Phase I (Phase I)

Ce rapport a été rédigé suite à des activités de recherche diligentes et à partir d'une évaluation de sources de données ponctuelles ou des renseignements obtenus auprès de tiers et qui peuvent comporter des incertitudes, lacunes ou omissions. Ces sources d'informations sont sujettes à des modifications au fil du temps, par exemple, selon l'évolution des activités sur le terrain à l'étude et ceux environnants. La Phase I n'inclut aucun essai, échantillonnage ou analyse de caractérisation par un laboratoire. Sauf exception, la Phase I s'appuie sur l'observation des composantes visibles et accessibles sur la propriété et celles voisines et qui pourraient porter un préjudice environnemental à la qualité du terrain à l'étude. Les titres de propriété mentionnés dans ce rapport sont utilisés pour identifier les anciens propriétaires du site à l'étude et ils ne peuvent en aucun cas être considérés comme document officiel pour reproduction ou d'autres types d'usages. Enfin, tout croquis, vue en plan ou schéma apparaissant dans le rapport ou tout énoncé spécifiant des dimensions, capacités, quantités ou distances sont approximatifs et sont inclus afin d'assister le lecteur à visualiser la propriété.



SNC • LAVALIN

5500 boul. des Galeries
Québec (Québec) Canada G2K 2E2
418.621.5500 - 418.621.8887

