



Mine **Arnaud**

## Projet minier Arnaud



Complément n° 7  
à l'étude d'impact sur l'environnement

### RAPPORT DE MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE RÉVISION 1





PROJET MINIER ARNAUD

COMPLÉMENT N° 7 À  
L'ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

RAPPORT DE MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE  
RÉVISION 1



PROJET MINIER ARNAUD  
COMPLÉMENT N° 7 À  
L'ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT  
RAPPORT DE MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE  
RÉVISION 1

Présenté à

Mine Arnaud inc.

Par

GENIVAR inc.

MARS 2013  
121-17926-00



## ÉQUIPE DE RÉALISATION

---

### **GENIVAR inc.**

Chargé de discipline	:	Simon Latulippe, ing.
Chargée de projet modélisation	:	Isabelle Hemmings, M.A.Sc.
Collaboratrice	:	Andréanne Hamel, ing. M.Sc.
Réviseur senior, modélisateur de l'eau souterraine	:	David Ruttan, ing.
Modélisateur pour l'eau souterraine	:	Mohamed Mostafa, ing. Ph.D.
Rédaction et SIG	:	Tanya Peterson
Édition	:	Catherine Boucher Linette Poulin
Traduction	:	Johanne Fortier

---

### **Référence à citer :**

GENIVAR. 2013. *Projet minier Arnaud. Complément n° 7 à l'étude d'impact sur l'environnement. Rapport de modélisation hydrogéologique. Révision 1* Rapport de GENIVAR à Mine Arnaud inc. 41 p. et annexes.



## ***NOTE AU LECTEUR***

Ce rapport a été traduit de la version originale anglaise



# TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Équipe de réalisation .....	i
Note au lecteur .....	iii
Table des matières .....	v
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
1. INTRODUCTION .....	1
1.1 Mise en contexte .....	1
1.2 Objectifs de modélisation .....	1
1.3 Études antérieures .....	2
2. MODÈLE CONCEPTUEL.....	3
3. CHOIX DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT .....	5
3.1 Simulation en utilisant le logiciel MODFLOW .....	5
3.2 Approche avec un milieu poreux équivalent.....	7
4. CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT .....	8
4.1 Étendue du domaine et construction du maillage .....	8
4.2 Définition des différentes couches du modèle.....	8
4.3 Conditions limites .....	10
4.4 Propriétés hydrauliques.....	14
5. CALIBRATION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT .....	19
5.1 Objectifs de calibration .....	19
5.2 Méthodologie de calibration .....	19
5.3 Résultats de la calibration .....	20
6. RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES .....	27
6.1 Modification de la piézométrie régionale .....	30
6.2 Évaluation de la trajectoire des particules .....	30
7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	37
7.1 Conclusions.....	37
7.2 Recommandations .....	38
8. LIMITATIONS .....	41
9. REFERENCES .....	43



## **LISTE DES FIGURES**

		<b>Page</b>
Figure 1	Étendue du domaine et conditions limites (Model Domain and boundary conditions).....	9
Figure 2	Zones de recharge (Recharge zones).....	13
Figure 3a	Zones de conductivité hydraulique (Hydraulic Conductivity Zones – Layer 1).....	15
Figure 3 b	Zones de conductivité hydraulique (Hydraulic Conductivity Zones – Layers 2-5).....	16
Figure 4	Localisation des zones attribuées aux cours d'eau (Stream Flow Zones).....	21
Figure 5	Courbe de calibration (Calibration Statistics Plot).....	23
Figure 6	Élévations piézométriques simulées en régime permanent (Steady-State Simulated Groundwater Elevations).....	24
Figure 7	Élévations piézométriques simulées lors du dénoyage final (23 ans) (Groundwater Elevations due to Active Mine Operations and Dewatering Process).....	28
Figure 8	Courbes de rabattement simulées par le dénoyage (23 ans) (Drawdown Contour Lines due to Active Mine Operations and Dewatering Process).....	29
Figure 9	Zone de captage évaluée à partir d'une analyse de trajectoire de particules à la fin de l'exploitation (Active Mine Capture Zone).....	33
Figure 10	Délimitation de la zone de captage après 7 ans d'exploitation (7-Year Mine Design Capture Zone).....	34
Figure 11	Délimitation de la zone de captage après 15 ans d'exploitation (15-Year Mine Design Capture Zone).....	35



## **LISTE DES TABLEAUX**

		<b>Page</b>
Tableau 1	Les valeurs des charges constantes .....	11
Tableau 2	Valeurs des zones de recharge.....	14
Tableau 3	Valeurs de conductivité hydraulique calibrées pour chacune des zones.....	17
Tableau 4	Paramètres d'emmagasinement .....	17
Tableau 5	Zones et valeurs des débits d'étiage.....	22
Tableau 6	Statistiques de calibration .....	22
Tableau 7	Bilan hydrique.....	22
Tableau 8	Les débits d'eau de surface mesurés comparativement aux débits simulés .....	26
Tableau 9	Les valeurs de débit de base simulées à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif .....	31



# 1. INTRODUCTION

---

## 1.1 Mise en contexte

Les travaux de modélisation numérique ont été effectués afin d'étudier les impacts sur le régime hydrogéologique environnant de la future mine à ciel ouvert, laquelle est située à Sept-Îles, Québec. La première étape consistait à effectuer la revue des études existantes, soit le précédent modèle développé par Ausenco Vector, lequel fut présenté dans le rapport « Mine Arnaud, Draft Hydrogeologic Investigation Report, juillet 2011 » ainsi que les résultats de la campagne de terrain complétée par GENIVAR en 2012. Les données recueillies ont servi à développer un modèle hydrogéologique conceptuel plus complet que le précédent modèle. Le modèle numérique a par la suite été calibré à partir des élévations d'eau souterraine mesurées et des débits mesurés dans les cours d'eau à proximité. La modélisation en régime permanent permet de représenter les conditions statiques au site.

Une fois le modèle calibré à un niveau satisfaisant, celui-ci a été utilisé afin de prédire les élévations piézométriques sur le site à trois différentes étapes d'exploitation, soit à la fin de l'excavation (23 ans), après 7 ans et 15 ans d'exploitation. De plus, les simulations numériques ont permis d'évaluer l'étendue maximum du cône de rabattement de 1,0 m et de déterminer si celui-ci atteignait les lacs situés au nord-ouest de la fosse, ou encore la baie des Sept Îles. Ces simulations ont finalement permis de vérifier la possibilité d'intrusion d'eau saline dans la fosse à partir de la baie des Sept Îles.

## 1.2 Objectifs de modélisation

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

- Établir les paramètres hydrogéologiques théoriques du site et réaliser un modèle numérique d'écoulement en régime permanent. Calibrer ce modèle à partir des niveaux d'eaux souterraines mesurés à l'endroit de 15 puits et des débits mesurés à l'endroit de 23 stations d'eaux de surface.
- Utiliser le modèle numérique calibré afin de simuler l'excavation et le dénoyage de la fosse à différentes étapes.
- Étudier l'effet du cône de rabattement généré par le dénoyage sur le réseau hydrographique tel que les lacs situés au nord-ouest de la mine.
- Réaliser un modèle de trajectoire des particules afin d'identifier la provenance et le sens du déplacement (lignes de courant) de l'eau pompée de la fosse pendant le processus de dénoyage.

### 1.3 Études antérieures

Plusieurs études hydrogéologiques, hydrologiques et géotechniques ont été menées sur ce site et rapportées dans le rapport Ausenco Vector (Mine Arnaud, Draft Hydrogeologic Investigation Report, July 2011).

Le rapport de modélisation d' Ausenco Vector présente les résultats de modélisation numérique effectuée à partir d'un modèle en régime permanent (quatre zones) utilisant les logiciels MODFLOW-SURFACT et Groundwater Vistas, version 5.43. Leur modèle attribue uniquement une valeur de conductivité hydraulique au substrat rocheux. Les dépôts meubles, incluant la présence d'une couche d'argile au fond de la baie des Sept Îles, n'ont pas été considérés dans ce modèle. De plus, le réseau hydrographique de surface incluant plusieurs ruisseaux et petits lacs n'a pas été inclus dans leur modèle numérique ce qui pourrait avoir une influence sur l'étendue de cone de rabattement obtenu.

En ce qui a trait à la recharge utilisée dans ce modèle, Ausenco Vector a utilisé une valeur de recharge équivalente à 6 % du taux normal de précipitation sur une période de 30 ans (environ 43 mm/an), tout en faisant abstraction de l'effet des chutes de neige, lesquelles consistent à approximativement 36 % du taux de précipitation normal sur une période de 30 ans. L'hypothèse de 6 % n'était pas basée sur des calculs analytiques.

Ce rapport résume les résultats de la présente étude de modélisation et reprend la majorité des hypothèses prises en compte dans les précédents travaux de modélisation de Ausenco Vector. Les résultats adressent les questions spécifiques posées par l'Agence canadienne d'évaluation environnementale et par le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) lors du processus d'évaluation environnementale.

## 2. MODÈLE CONCEPTUEL

---

La première étape dans la construction d'un modèle numérique de l'eau souterraine est de créer un « modèle conceptuel », lequel décrira, en général, les conditions hydrogéologiques et le bilan hydrique du système naturel à simuler et également les autres éléments physiques devant être considérés. Ce modèle conceptuel comprend quelques-unes des composantes suivantes :

- Déterminer l'étendue de la zone d'étude;
- Identifier le contexte géologique et les propriétés hydrogéologiques des unités hydrostratigraphiques;
- Attribution des conditions hydrogéologiques à chacune des unités hydrostratigraphiques (aquifères et aquitards) dans l'horizon de subsurface;
- Comprendre le mouvement régional de l'eau souterraine incluant les élévations de l'eau souterraine;
- Identifier les éléments hydrologiques, telles les bassins versants, les zones d'infiltration des eaux souterraines et les résurgences ainsi que les cours d'eau;
- Comprendre les différentes composantes du bilan hydrique, incluant les conditions de recharge et de résurgence.

La compréhension conceptuelle sert à raffiner la construction d'un modèle numérique de manière à fournir des simulations représentatives adéquates. Les décisions initiales sont liées à l'étendue du domaine du modèle en général et à l'échelle à utiliser pour représenter les systèmes hydrogéologiques de façon bidimensionnelle (horizontales que verticales).

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

- Définir les unités hydrostratigraphiques;
- Définir les systèmes aquifère et les systèmes d'eau de surface; et
- Analyser les éléments du bilan hydrique.

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



### 3. CHOIX DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

---

#### 3.1 Simulation en utilisant le logiciel MODFLOW

Pour simuler l'écoulement d'eau souterraine, un code numérique est requis pour reproduire les patrons d'écoulement.

Le modèle numérique sélectionné pour cette étude est « MODFLOW ». Le logiciel MODFLOW (Harbaugh et al., 1988-2005) est un modèle d'écoulement de l'eau souterraine, lequel a été développé par la United States Geological Survey (USGS). Ce dernier permet de produire des modèles numériques d'écoulement de l'eau souterraine en trois dimensions, en différences finies et ce, autant pour le les régimes permanent et transitoire de l'eau souterraine dans des aquifères captifs et semi-captifs. Dans le cadre de ce rapport, des conditions en régime permanent ont été modélisées.

Le code numérique MODFLOW résout les équations d'écoulement d'eau souterraine, et ce, en trois dimensions. Les paramètres d'entrée comprennent les conditions limites du modèle, les propriétés des formations géologiques et les conditions de recharge et d'écoulement. MODFLOW utilise ces paramètres d'entrée pour résoudre l'équation du bilan de masse, laquelle peut être exprimée comme suit :

$$\text{Somme des flux entrants (frontières)} + \text{Somme des apports internes d'eau} = \text{Somme des flux sortants (frontières)} + \text{Sommes des pertes d'eau internes}$$

L'équation du bilan de masse pour un aquifère non captif avec recharge, écoulement ou fuite (Bear, 1979) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x} [(h - b)(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial y} [(h - b)(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y})] + K' / B' (H_o - h) + N - W = 0$$

Où:

$K_{xx}$  = conductivité hydraulique en direction x-;

$K_{yy}$  = conductivité hydraulique en direction y-;

$h$  = charge hydraulique;

$b$  = élévation inférieure de l'unité ;

$K'$  = conductivité hydraulique verticale de l'unité captive sous-jacente ;

$B'$  = épaisseur de l'unité captive ;

- $H_0$  = charge de l'aquifère qui est sous-jacente de l'unité captive;  
 $N$  = terme général représentant la recharge d'eau souterraine;  
 $W$  = terme général représentant la résurgence d'eau souterraine.

Des équations similaires peuvent être écrites pour chacune des unités hydrostratigraphiques dans une séquence en couche des aquifères et des unités captives. Lorsqu'un aquifère est captif, la hauteur de la zone saturée ( $h-b$ ) est remplacée par la hauteur totale de l'aquifère.

Un modèle numérique en trois dimensions de l'écoulement de l'eau souterraine a été développé, calibré et évalué avec des statistiques de calibration. Le modèle a été utilisé pour simuler les conditions existantes en régime permanent de l'eau souterraine.

L'utilitaire ZoneBudget (Harbaugh, 1990) est un calculateur de bilan hydrique qui était utilisé pour évaluer le bilan hydrique dans la zone d'intérêt (par exemple, les débits observés des ruisseaux et des rivières) en terme d'intrants de l'eau (recharge provenant de la précipitation, contribution de l'eau souterraine) et ce, comparativement aux sorties d'eau (débit à drainer et l'eau de surface, les décharges (des effluents)).

Le modèle calibré en régime permanent a alors été utilisé pour simuler des modèles d'écoulement de l'eau souterraine dans un aquifère profond à différentes étapes d'excavation de la fosse, de même qu'une analyse de trajectoire des particules.

L'analyse de trajectoire des particules a été effectuée à l'aide du logiciel MODPATH (Pollock, 1994), un modèle pour tracer les particules qui utilise les données de sortie du logiciel MODFLOW sur le vecteur de vitesse d'écoulement (de l'eau souterraine) pour délimiter le sens et le temps de déplacement à partir de la source de contaminant vers le récepteur de l'eau souterraine. Le traçage des particules a également été utilisé pour évaluer la provenance de l'eau pompée (capture zone) lors du processus de dénoyage de la fosse et pour déterminer si l'exploitation de la mine fera en sorte de soutirer de l'eau des lacs situés au nord-ouest de la mine ou encore de la baie des Sept Îles.

La version 6.29 Vista, Build 8, 64 bit (Environmental Simulations Inc. 2011) a servi pour le pré- et l'après-traitement pour la construction du modèle, pour la calibration et les analyses prédictives. Le logiciel fut utilisé de manière interactive pour préparer, éditer et gérer l'information requise pour développer le modèle.

### 3.2 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 par un milieu complètement saturé en continu 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 de la fracture et que la connectivité hydraulique parmi ces fractures sont suffisantes, le sol ou la roche fracturée pourrait être simulé comme un « milieu poreux équivalent » et un modèle pourrait être 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.

## **4. CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT**

---

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

- Étendue du domaine et construction du maillage;
- Définition des différentes couches du modèle;
- Mise en place des conditions limites;
- Sélection des propriétés hydrauliques et des intrants.

Les sous-sections suivantes décrivent chacune des étapes pour la construction du modèle numérique d'écoulement.

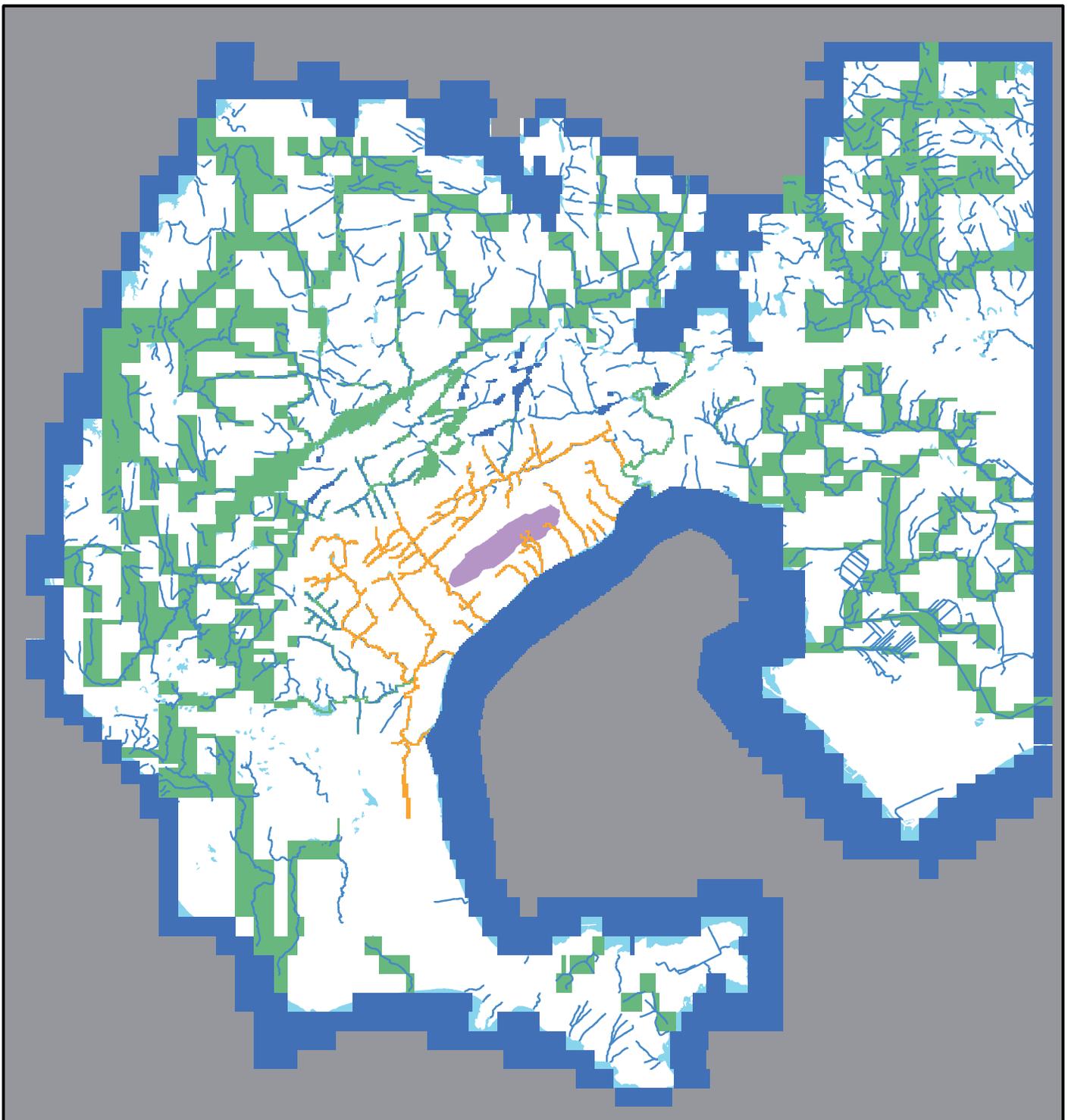
### **4.1 Étendue du domaine et construction du maillage**

L'étendue du domaine inclut une superficie de 78 000 ha, le site de la mine se situant approximativement au centre du domaine, comme illustré à la figure 1. La dimension du domaine était assez grande pour que les limites du modèle représentent les limites naturelles et pour spécifier, si possible, les niveaux d'eau ou les écoulements d'eau souterraine (par exemple, le niveau d'eau à la baie des Sept Îles). Les dimensions du modèle sont approximativement de 28 750 m au nord et au sud et d'environ 27 000 m à l'est et à l'ouest. Le coin inférieur gauche du modèle est situé aux coordonnées UTM 665,017 E et 5,555,260 N (zone UTM 19N, NAD83).

Un modèle à maillage variable a été utilisé permettant un raffinement des mailles à proximité du site. La dimension du maillage incluait donc une taille de cellule de 500 m (direction x- et y-) aux limites du modèle du domaine vers une taille de cellule de 50 m (direction x- et y-) à proximité du site de la mine. La grille générée (différences finies) consiste en un total de 248 rangées par 257 colonnes.

### **4.2 Définition des différentes couches du modèle**

Treize couches hydrostratigraphiques sont présentes dans le modèle, représentant des propriétés du substrat rocheux dans toutes les couches à l'exception des propriétés des dépôts meubles assignées à la couche n° 1, laquelle a été définie à partir des sondages effectués dans le secteur. De plus, une couche supplémentaire d'argile fut assignée à la couche n° 1 à la limite du domaine (discuté dans la sous-section suivante), laquelle représente la baie des Sept Îles et le rivage.



**LEGEND**

- River Boundary
- Drain Boundary
- Constant Head Boundary
- No Flow Cells
- Mine Site
- Waterbodies
- Watercourses



1:000 500 0 1,000 Metres

**MODEL DOMAIN AND BOUNDARY CONDITIONS**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: DECEMBER 2012

SCALE: 1:150000

PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F1



**GENIVAR**

FIGURE

**1**

L'élévation topographique de la surface (élévation supérieure de la couche 1) est basée sur une interpolation du modèle numérique d'élévation (DEM) à partir de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ), avec l'aide du logiciel ArcView (ESRI, 2009). L'élévation supérieure de la couche 2 est basée sur une interpolation des données d'élévation du roc identifiées dans les sondages (forages, tranchées) réalisés dans le secteur (lorsque disponible). La différence entre les élévations supérieures des couches 1 et 2 correspond à l'épaisseur des dépôts meubles (s'ils sont présents) et à 0,1 m ailleurs si le substrat rocheux est exposé à la surface.

Les élévations supérieures des couches 3 à 13 ont été établies afin d'être parallèles au-dessus de la couche 2 avec une hauteur constante de 37,5 m. L'augmentation du nombre de couches en comparaison aux 4 couches du modèle d'Ausenco Vector a été utilisée pour s'assurer que la recharge dans la zone de captage de la mine était équivalente aux débits sortant de la fosse. L'augmentation du nombre de couches a permis d'obtenir une meilleure résolution de la zone de captage et d'améliorer la stabilité numérique.

### **4.3 Conditions limites**

Les conditions aux limites du domaine sont présentées à la figure 1. Les conditions limites coïncident avec les éléments hydrologiques identifiés sur la carte topographique ou les observations de terrain, comme cela est délimité dans le rapport de modélisation Ausenco Vector (juillet 2011). Toutes les cellules à l'extérieur de l'étendue latérale du modèle sont considérées comme inactives.

Des conditions limites de type charge constante ont été attribuées aux limites du domaine actif. Des cellules à charge constante ont été assignées à la rivière Sainte-Marguerite située à l'ouest (du nord vers le sud) avec une valeur de charge constante de 60 mASL à partir de la limite nord du modèle vers approximativement 18 km au sud. Ensuite, la valeur de la charge constante a décliné pour atteindre 0 mASL à la limite sud-ouest jusqu'à la baie des Sept Îles. Les lacs situés au nord du domaine (lac Requin à 240 mASL, lac Curot à 240 mASL et le lac Hingan à 210 mASL) se rapportent à des charges constantes correspondant à leur niveau d'eau observé. Des cellules à charge constante (charge de 240 mASL) ont été assignées entre les lacs Requin et Court afin de relier les deux lacs. Dans le même ordre d'idée, des cellules à charge constante ont été assignées entre les lacs Curot et Hingan avec une charge commençant à 240 mASL au lac Curot et se terminant à 210 mASL au lac Hingan.

Des conditions limites de type charge constante ont également été assignées à la frontière est du domaine, tel que décrit dans le rapport de modélisation Ausenco Vector (juillet 2011). La charge attribuée est de 245 mASL à partir du nord-est et diminue, de façon linéaire, sur 7,5 km à une charge de 150 mASL. À cette étape, la frontière est élargie de manière linéaire vers le sud sur 2 km et elle descend à 30 mASL. Ceci est suivi par un prolongement de 9 km jusqu'à ce la frontière atteigne le rivage de la baie des Sept Îles à 0 mASL.

Finalement, une charge constante de 0 mASL a été attribuée à la frontière sud pour représenter la baie des Sept Îles et le rivage d'est à l'ouest. Le tableau 1 résume les élévations des différentes conditions limites de type charge constante.

Tableau 1 Les valeurs des charges constantes

Description	Élévation constante de la charge mASL
Limite ouest	60 m nord à 0 m sud
Limite nord	245 m est à 60 m ouest
Limite est	245 m nord à 0 m sud
Limite sud	0 m

Les conditions limites de type rivière furent utilisées pour représenter les cours d'eau de surface à l'intérieur du domaine, de même que les plans d'eau de surface, incluant les lacs Hall, Roger, des Feuilles, Jimmy, Lune et du Castor (c.-à.-d. les lacs situés au nord-ouest du site de la mine). Ces types de frontière permettent de simuler le débit entrant et sortant vers le système aquifère (c.-à.-d. les cours d'eau alimentés et non alimentés).

Les conditions limites de type cellules drainantes ont servi à représenter les cours d'eau de surface près de fosse. Ces types de frontières permettent de simuler les sorties d'eau du système d'eau souterraine (c.-à.-d. les cours d'eau alimentés). Les élévations des cellules limites de rivière et des cellules limites de drainage furent estimées en se basant sur la topographie et correspondent à l'élévation de la couche n° 1 avec une épaisseur et une largeur de 1 m ainsi qu'une profondeur de 0,5 m sous la surface du sol. Les conductances des cellules rivière et des cellules drainantes ont été attribuées à partir de plusieurs paramètres incluant la largeur, l'épaisseur du substrat, et la conductivité hydraulique verticale du lit de la rivière et/ou de la base du drainage pour chaque tronçon représenté.

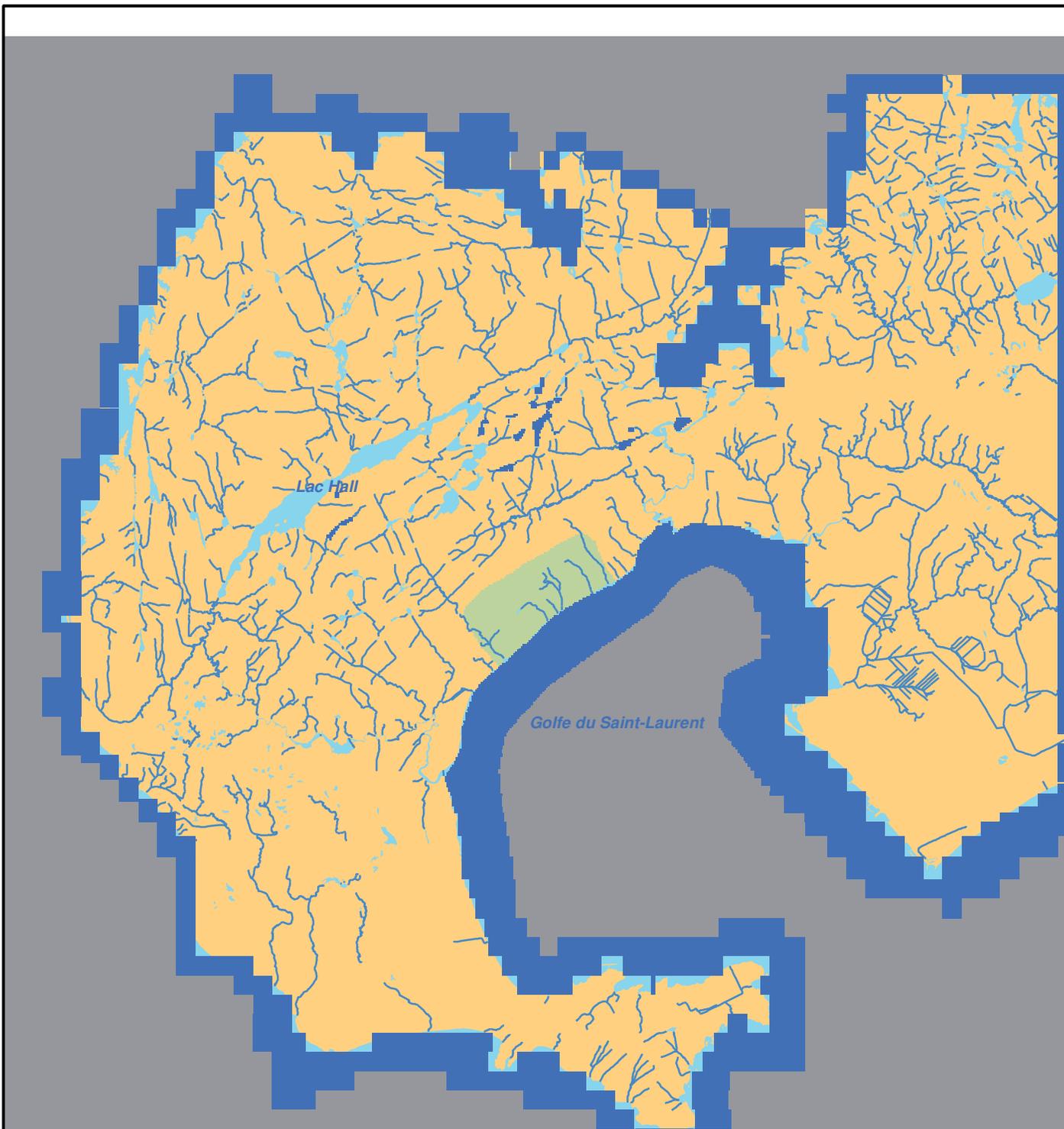
Initialement, l'estimation de la conductivité hydraulique verticale du lit était basée sur la conductivité hydraulique des dépôts meubles et a été modifiée pendant le processus de calibration, comme cela est décrit à la section 'calibration du modèle d'écoulement.

Des conditions limites de type cellules drainantes ont été utilisées au fond de la fosse. L'élévation attribuée à ces cellules était basée sur l'excavation progressive de la mine, avec des étapes vers l'intérieur et en profondeur. La conductance de ces cellules ont été modifiée pendant la calibration du modèle afin de s'assurer que la fosse soit asséchée et ce, tout en prenant compte du bilan de masse complet du modèle.

Les deux principales zones de recharges furent attribuées au domaine actif. Des données provenant de la région de Sept-Îles furent utilisées pour faire l'estimation de la valeur de recharge avec le logiciel HELP model (US EPA, 1994). La première valeur de recharge fut basée sur les calculs d'infiltration, et en assumant qu'il y avait une surface plane et deux couches. La couche supérieure représente les dépôts superficiels (dépôts meubles), d'une épaisseur de 2 m avec une conductivité hydraulique verticale de  $3,0 \times 10^{-4}$  m/j (la conductivité hydraulique horizontale, adaptée du rapport Ausenco Vector, est de  $3,0 \times 10^{-3}$  m/j. Une anisotropie verticale de 1,10 fut utilisée pour l'horizon de dépôts meubles dans le but de faire une modélisation avec les logiciels HELP et MODFLOW. La couche sous-jacente représente un substrat rocheux de 8 m d'épaisseur et avec une conductivité hydraulique de  $1,3 \times 10^{-2}$  m/j. Les données météorologiques mensuelles pour la région furent utilisées et le taux d'infiltration résultant (c.-à.-d. l'alimentation en eau souterraine) était de 178 mm/an. Le substrat rocheux était représenté comme un milieu poreux équivalent avec la même conductivité hydraulique que ceux mesurés lors des travaux sur le terrain.

La deuxième valeur de recharge se servait du même profil que précédemment, mais en assumant une pente moyenne de 5,24 %. Cette pente était estimée à partir d'une pente au sol moyenne mesurée à partir d'une carte topographique et située à proximité de la mine. La recharge résultante avec cette pente était d'environ 122 mm/an; ceci ayant été attribué seulement à proximité de la mine. La première valeur de recharge (178 mm/an) fut assignée au reste des cellules du modèle actif. Elles furent légèrement modifiées pour améliorer le modèle (calibration) à 168 et à 110 mm/an respectivement. La figure 2 montre les zones de recharge attribuées dans le modèle et les valeurs de recharges sont résumées au tableau 2.

Il faudrait noter qu'une troisième zone de recharge (environ 956 mm/an et/ou 0,0026 m/j) fut attribuée à la mine pendant les simulations, lesquelles comprenaient une mine à ciel ouvert. Cette recharge était basée sur l'hypothèse que la mine ne générerait aucun ruissellement et que la quantité de précipitation (1156 mm/an pour une période de 30 ans), moins l'évaporation (environ 200 mm/an) serait une quantité supplémentaire d'eau qui devra être pompée hors de la mine pendant le processus de dénoyage.



**LEGEND**

- 110 mm/yr
- 168 mm/yr
- Constant Head Boundary
- No Flow Cells
- Waterbodies
- Watercourses



1,000 500 0 1,000 Metres

**RECHARGE ZONES**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: DECEMBER 2012

SCALE: 1:150000

PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F2



FIGURE

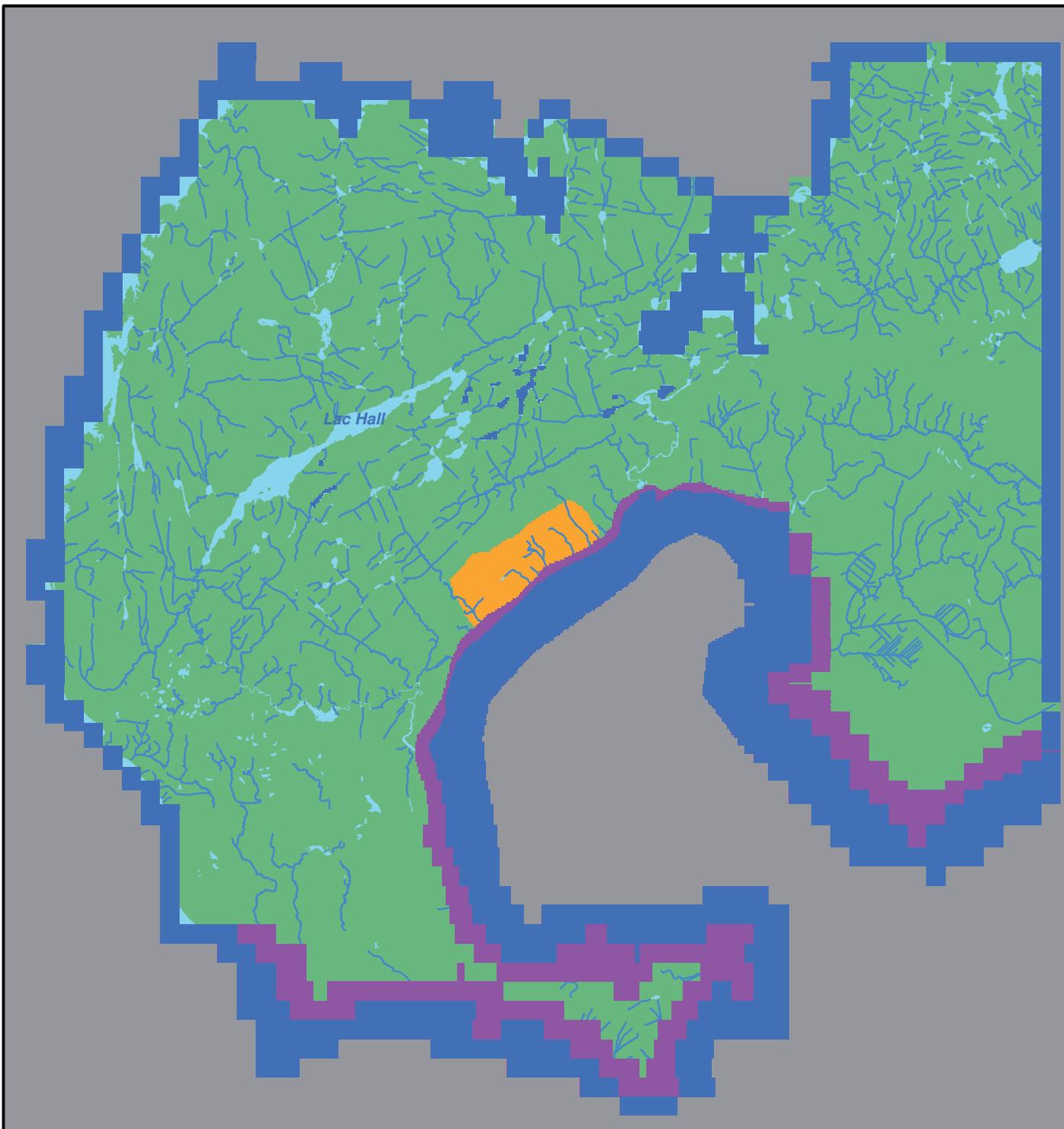
**2**

Tableau 2 Valeurs des zones de recharge

Description	Zone	recharge mm/an
recharge du substrat rocheux	1	168
dépôts meubles au site de la mine	2	110
À la mine pendant les simulations d'excavation seulement	3	956

#### 4.4 Propriétés hydrauliques

Quatre zones de conductivité hydraulique furent attribuées dans ce modèle. Ces zones comprenaient l'horizon de dépôts meubles au site de la mine, le substrat rocheux, la couche d'argile sous-jacente à la baie des Sept Îles et au rivage, et les zones de faille au site minier. Les valeurs initiales de ces zones proviennent du rapport d'investigation hydraulique « *Hydrogeologic Investigation Report* ») d'Ausenco Vector (juillet 2011) et des nouveaux résultats obtenus lors des travaux de terrain menés par GENIVAR en 2012. Une valeur initiale de la conductivité hydraulique du substrat rocheux de  $1,39 \times 10^{-2}$  m/j a été initialement utilisée et ensuite modifiée pendant le processus de calibration afin d'obtenir le meilleur jumelage entre les charges observées et simulées. La valeur de la conductivité hydraulique des dépôts meubles était la même que celle utilisée dans le modèle d'Ausenco Vector. La conductivité hydraulique des failles dans la zone du puits et la couche d'argile sous la baie des Sept Îles et le rivage étaient basées sur l'expérience technique. De nouveaux tests étaient menés, au moment d'écrire ce rapport, et ce, dans le but de quantifier les valeurs de conductivité hydraulique des failles. Les valeurs de conductivité hydraulique de la zone sont montrées à la figure 3a pour la couche n° 1 et à la figure 3b pour les couches n° 2 à n° 5. Les zones de conductivité hydraulique pour les couches n° 6 à n° 13 sont présentées à la figure 3 b, à l'exception de la conductivité hydraulique des zones de faille. Les valeurs de conductivité hydraulique sont aussi résumées au tableau 3. Les paramètres de porosité totale, de porosité effective et d'emménagement sont résumés au tableau 4. En régime permanent, les paramètres d'emménagement des aquifères ne sont pas requis pour modéliser l'écoulement d'eau souterraine. Toutefois, une simulation de trajectoire des particules est requise pour cette étude, laquelle requiert une porosité effective pour simuler la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine. La porosité effective a été estimée en se basant sur les paramètres obtenus dans la littérature et à partir de travaux antérieurs effectués pour des unités géologiques similaires.



**LEGEND**

- $K_{x,y,z} = 2.1 \times 10^{-2}$  m/d
- $K_{x,y} = 3.0 \times 10^{-3}$  m/d,  $K_z = 3.0 \times 10^{-4}$  m/d
- $K_{x,y} = 8.64 \times 10^{-4}$  m/d,  $K_z = 8.64 \times 10^{-4}$  m/d
- Constant Head Boundary
- No Flow Cells
- Waterbodies
- Watercourses



1,000 500 0 1,000 Metres

**HYDRAULIC CONDUCTIVITY ZONES - LAYER 1**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: DECEMBER 2012

SCALE: 1:150000

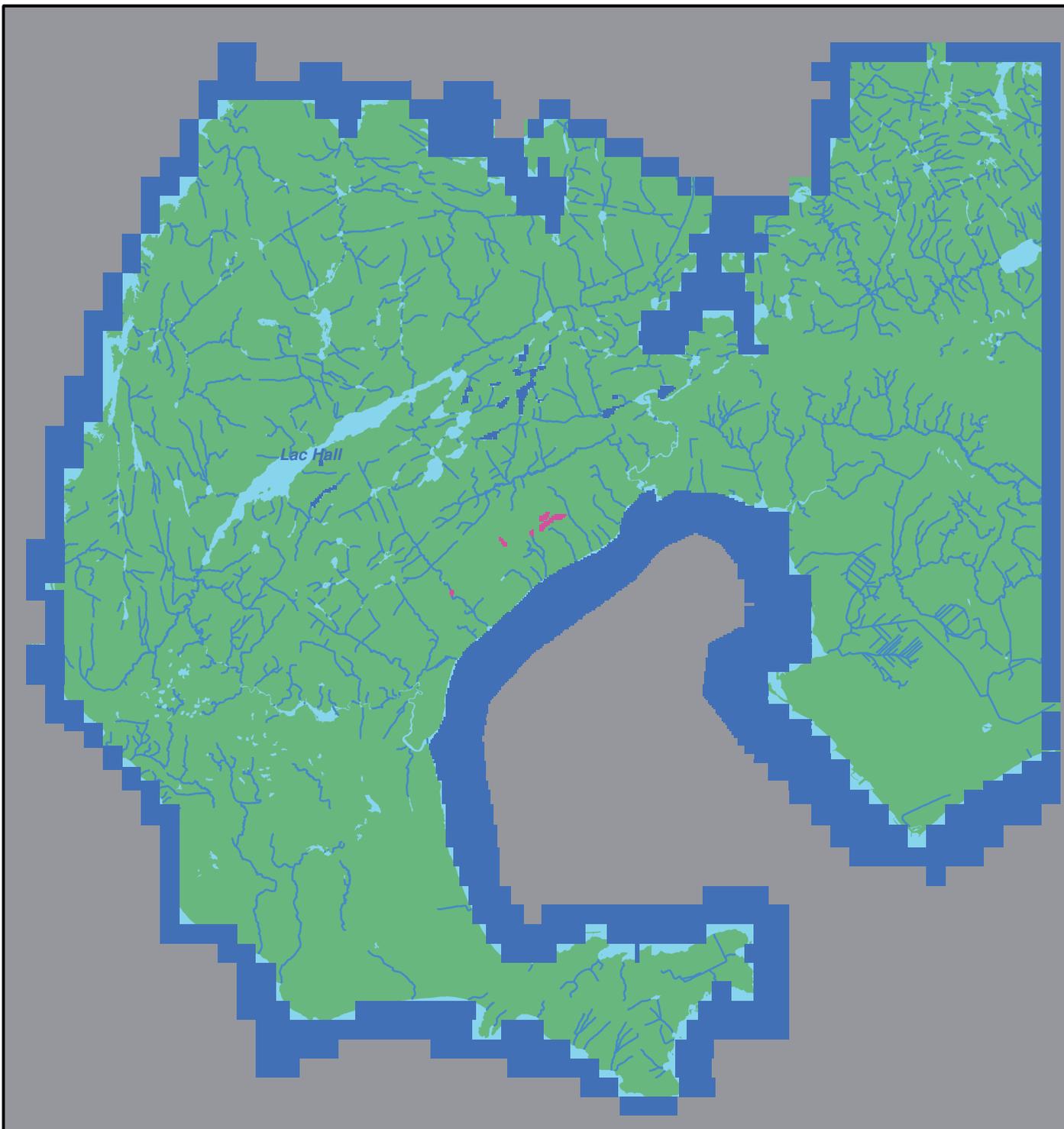
PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F3a



FIGURE

**3a**



**LEGEND**

- $K_{x,y,z} = 2.1 \times 10^{-2}$  m/d
- $K_{x,y,z} = 0.1$  m/d
- Constant Head Boundary
- No Flow Cells
- Waterbodies
- Watercourses



1,000 500 0 1,000 Metres

**HYDRAULIC CONDUCTIVITY  
ZONES - LAYERS 2 - 5**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: DECEMBER 2012

SCALE: 1:150000

PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F3b



FIGURE

**3b**

Tableau 3 Valeurs de conductivité hydraulique calibrées pour chacune des zones

Couche(s)	Description	Zone	Conductivité hydraulique horizontale m/d	Anisotropie verticale
1	dépôts meubles au site minier	1	$3,0 \times 10^{-3}$	1:10
1-13	Substrat rocheux	2	$2,1 \times 10^{-2}$	1:1
2-5	Failles au site minier	3	0.1	1:1
1	Argile sous la baie des Sept Îles et le rivage	4	$8,64 \times 10^{-4}$	1:10

Tableau 4 Paramètres d'emmagasinement

Couche	Description	Zone	Porosité totale --	Porosité effective --	Emmagasinement 1/m
1-13	Domaine du modèle	1	$0.01^{(1)}$	$0.1^{(1)}$	$1.2 \times 10^{-6}^{(1)}$

Source: <sup>(1)</sup> July 2011 Hydrogeologic Investigation Report - Ausenco Vector



## **5. CALIBRATION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT**

---

### **5.1 Objectifs de calibration**

L'objectif de la calibration du modèle d'écoulement est de développer une approximation acceptable des niveaux d'eaux souterraines observés et des débits mesurés d'un cours d'eau. Aux fins de ce modèle, même si une fluctuation naturelle des élévations de l'eau souterraine se produit en raison des conditions climatiques saisonnières, les conditions de l'eau souterraine observées et induites sont considérées comme étant statiques. Par conséquent, la calibration du modèle se fait en établissant une moyenne des élévations de l'eau souterraine et en estimant une moyenne du débit des cours d'eau, lesquels devraient être plus élevés que les valeurs mesurées. En effet, les débits des cours d'eau ont été mesurés en période d'étiage et elles sont représentatives des débits d'étiage. Les débits moyens pour les cours d'eau incluent la contribution d'une précipitation directe et du ruissellement, lesquels ne sont pas pris en compte dans le modèle pour l'eau souterraine.

### **5.2 Méthodologie de calibration**

Un modèle calibré a été réalisé en utilisant une approche itérative où les paramètres d'entrée étaient modifiés manuellement et les statistiques de calibration étaient qualifiées de manière quantitative. Le modèle calibré final représentait le meilleur jumelage de niveaux d'eau souterraine simulés et observés et les valeurs moyennes de débit des cours d'eau. La conductivité hydraulique pour le substrat rocheux, et les valeurs de conductance hydraulique pour la rivière et les limites de drainage furent les paramètres principaux du modèle modifiés pendant le processus de calibration. Des changements mineurs des valeurs de recharges ont également été effectués.

Une comparaison des élévations simulées de l'eau souterraine a été effectuée avec les élévations mesurées disponibles pour l'eau souterraine. L'évaluation des statistiques de calibration des élévations de l'eau souterraine prend en considération plusieurs composantes, incluant : les valeurs résiduelles maximum et minimum, la moyenne résiduelle, la moyenne résiduelle absolue, la racine de l'erreur quadratique moyenne, et la racine de l'erreur quadratique moyenne (à l'échelle ou normalisé RMS (NRMS)). Les résiduels sont calculés comme la différence entre les élévations simulées et observées de l'eau souterraine. Les valeurs cibles acceptées par l'industrie pour le NRSM sont inférieures ou égales à 10 %, si l'on ne considère pas les facteurs d'incertitude comme les différences d'élévation et la localisation des puits d'observation, les différences dans les mesures de niveau d'eau prises durant la saison et l'année et la nécessité d'effectuer l'interpolation des données.

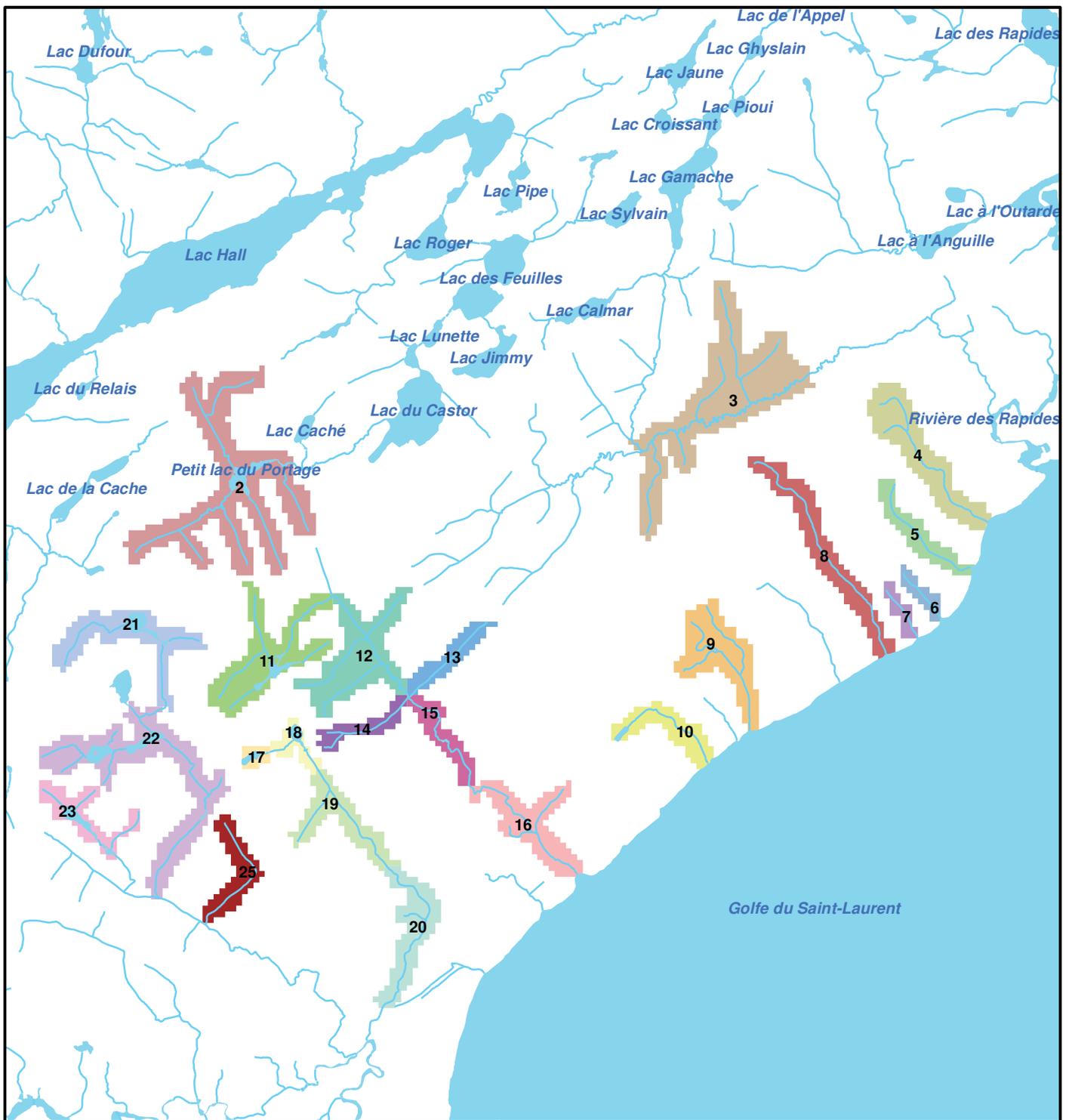
Une comparaison des débits de base simulés avec les débits mesurés à l'endroit de 23 stations a été réalisée pour les débits disponibles entre le 19 et le 22 juin 2012. Le débit de base correspond à la contribution des eaux souterraines au cours d'eau. La figure 4 montre l'emplacement de ces 23 zones et le tableau 5 résume les 23 zones et les débits mesurés et utilisés pour faire la comparaison. Les valeurs de débit des cours d'eau mesurées à partir de juin 2012 sont moins élevées et elles sont considérées comme étant représentatives des débits d'étiage pour les cours d'eau, et ce, en raison du temps extrêmement sec au début de 2012. Toutefois, des observations annuelles donneraient une évaluation plus complète des débits annuels moyens de cours d'eau situés dans la zone et permettraient d'établir une moyenne de débit de base pour chacun des cours d'eau.

La calibration des résultats du modèle a également été effectuée à l'aide des données de sortie du bilan hydrique volumétrique fourni par MODFLOW à la fin de chacune des simulations. Le bilan hydrique volumétrique fournit les flux simulés de l'eau souterraine entrant et sortant du domaine, et ce, en utilisant les composantes spécifiques et respectives des flux d'eaux souterraines comme la recharge et les débits sortants. La valeur cible de calibration d'une différence acceptable de l'équilibre hydrique pour le modèle est de moins de 1 %. L'erreur de 0,001 % du bilan hydrique indique une bonne calibration.

### **5.3 Résultats de la calibration**

Les élévations simulées et observées de l'eau souterraine sont comparées pour évaluer la calibration du modèle. La courbe de calibration est illustrée à figure 5, et les statistiques sont présentées au tableau 6. Les élévations piézométriques simulées en régime permanent sont montrées à la figure 6.

Les statistiques de calibration présentées au tableau 6 montrent que le modèle, lequel se trouve à l'intérieur de la plage de NRMS acceptée par l'industrie, est bien calibré. Les niveaux de l'eau souterraine sont très sensibles à la conductivité hydraulique des zones utilisées dans ce modèle, de même qu'à la conductance des rivières et du drainage. Des essais hydrogéologiques plus complets sur les failles et une meilleure représentation des lacs dans le modèle (présentement représentés en tant que conditions limites de type rivière en charge constante) permettraient d'améliorer davantage le modèle.



**LEGEND**

- |    |             |              |
|----|-------------|--------------|
| 2  | 14          | Watercourses |
| 3  | 15          |              |
| 4  | 16          |              |
| 5  | 17          |              |
| 6  | 18          |              |
| 7  | 19          |              |
| 8  | 20          |              |
| 9  | 21          |              |
| 10 | 22          |              |
| 11 | 23          |              |
| 12 | 25          |              |
| 13 | Waterbodies |              |



500 250 0 500 Metres

**STREAM FLOW ZONES**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: DECEMBER 2012

SCALE: 1:50000

PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F4



**GENIVAR**

FIGURE

**4**

Tableau 5 Zones et valeurs des débits d'étiage

Zone #	Zone modèle #	Débit au(x) site(s)	Valeur du débit, L/s	Valeur du débit, m <sup>3</sup> /d
1	2	Site 25	0,4	34,6
2	3	Site 52 – Site 51	4,4	380,26
3	4	Site 72	2,0	172,8
4	5	Site 73	2,0	172,8
5	6	Site 74	0,1	8,6
6	7	Site 75	1,0	86,4
7	8	Site 76	0,5	43,2
8	9	Site 78	4,0	345,6
9	10	Site 79.5	3,0	259,2
10	11	Site 41	0,2	17,3
11	12	Site 42 - Site 41	2,1	181,4
12	13	Site 45	1,8	155,5
13	14	Site 43	0,2	17,38
14	15	Site 46 - (Site 42 + Site 43 + Site 45)	2,1	181,4
15	16	Site 44 - Site 46	5,7	492,58
16	17	Site 61	0,1	8,6
17	18	Site 62 - Site 61	0,2	17,38
18	19	Site 64 - Site 62	0,7	60,5
19	20	Site 63 - Site 64	4,1	354,2
20	21	Site 31	0,5	43,2
21	22	Site 35 - (Site 31 + Site 32)	1,1	95,0
22	23	Site 34	0,7	60,5
23	25	Site 36	0,4	34,6

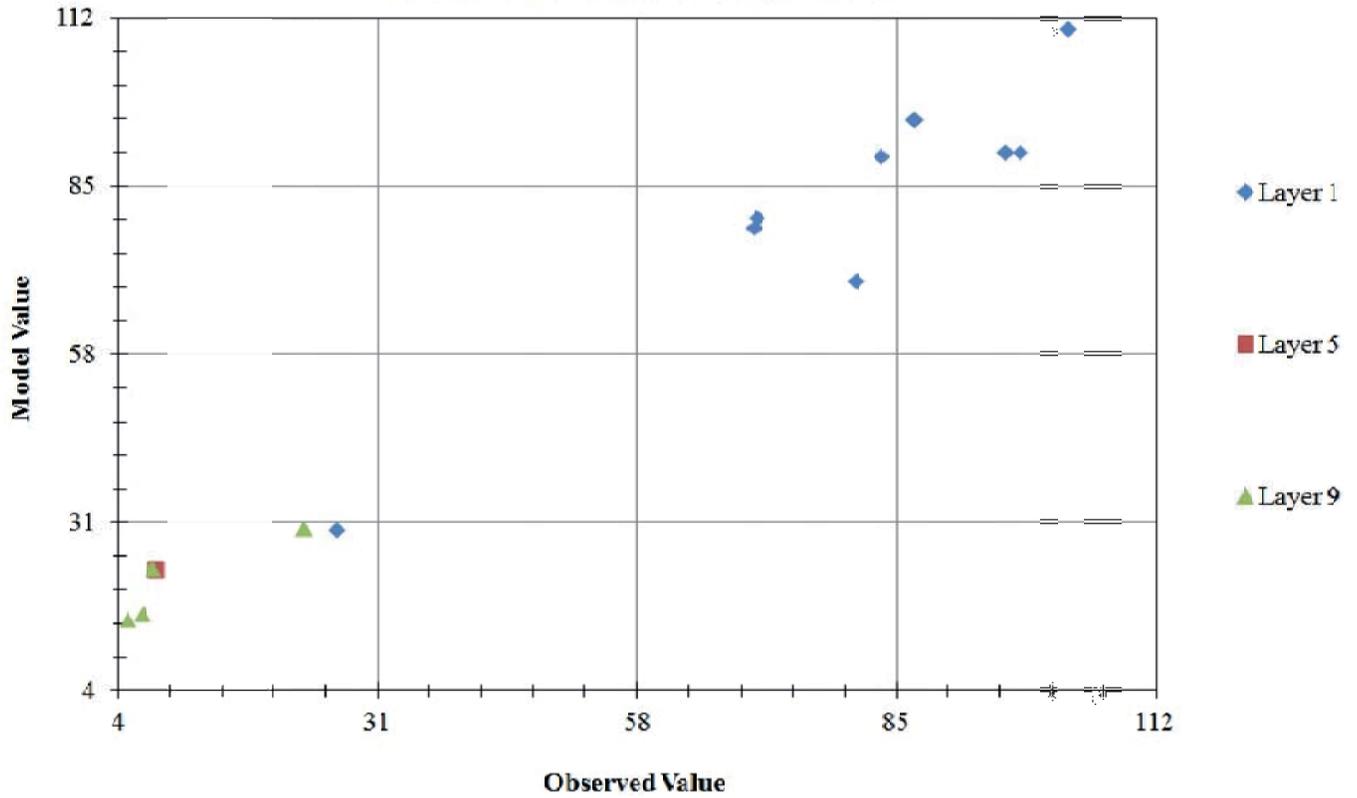
Tableau 6 Statistiques de calibration

Mesure statistique	Unité	Résultat du modèle calibré
Résiduel maximum	m	11,03
Résiduel minimum	m	-16,31
Écart type des résiduels	m	7,74
Moyenne absolue des résidus	m	9,12
Racine de l'erreur quadratique moyenne	m	9,71
Racine de l'erreur quadratique moyenne à l'échelle (Scaled RMS)	%	9,9

Tableau 7 Bilan hydrique

	Débit entrant m <sup>3</sup> /j		Débit sortant m <sup>3</sup> /j
Charge constante	8,061	Charge constante	80,070
Rivières	3,843	Rivières	109,412
Recharge	190,218	Drainages	7,413
DÉBIT ENTRANT TOTAL	208,630	DÉBIT SORTANT TOTAL	208,628
		DÉBIT SORTANT – DÉBIT ENTRANT	2
			0.001 %

**Observed vs. Computed Target Values**



**CALIBRATION STATISTICS PLOT**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud



DATE: DECEMBER 2012

SCALE: NOT TO SCALE

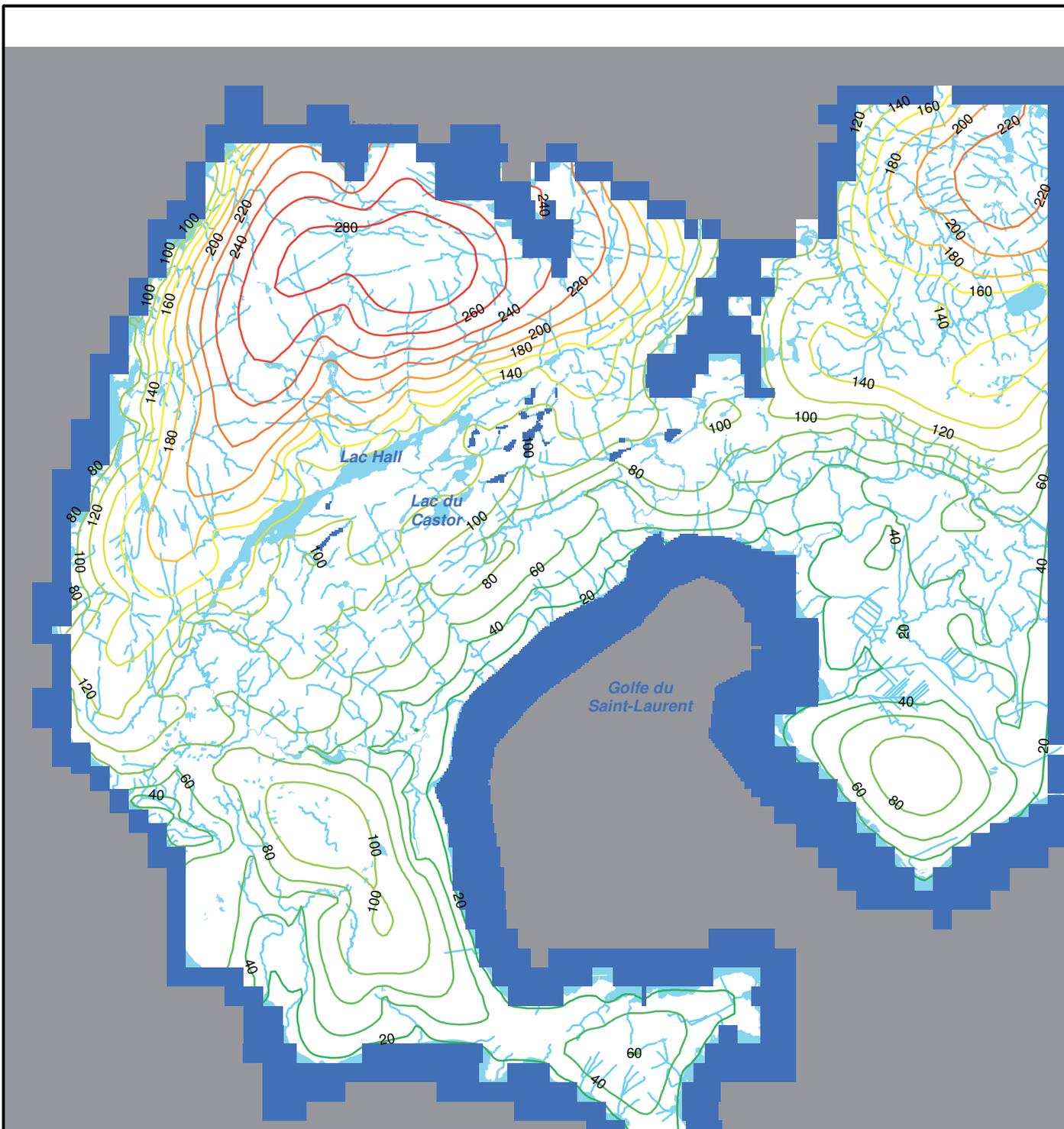
PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F5



FIGURE

**5**



**LEGEND**

- |  |                        |  |          |
|--|------------------------|--|----------|
|  | Constant Head Boundary |  | 120 mASL |
|  | No Flow Cells          |  | 140 mASL |
|  | Waterbodies            |  | 160 mASL |
|  | Watercourses           |  | 180 mASL |
|  | 20 mASL                |  | 200 mASL |
|  | 40 mASL                |  | 220 mASL |
|  | 60 mASL                |  | 240 mASL |
|  | 80 mASL                |  | 260 mASL |
|  | 100 mASL               |  | 280 mASL |



1,000 500 0 1,000 Metres

**STEADY-STATE SIMULATED  
GROUNDWATER ELEVATIONS**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: DECEMBER 2012

SCALE: 1:150000

PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F6



**GENIVAR**

FIGURE

**6**

Le tableau 7 présente le bilan hydrique pour le modèle calibré d'écoulement de l'eau souterraine en régime permanent.

L'écart indiqué au tableau 7 indique que le bilan de masse est équilibré dans le modèle calibré.

Le logiciel ZoneBudget a été utilisé pour établir débits de base aux 23 points d'eau de surface instrumentés, tel que présenté au tableau 8.

Les valeurs de débit présentées au tableau 8 indiquent que le modèle calibré a modérément surévalué les débits d'eau de surface estimés. Il faut noter que les débits d'eau de surface ont été mesurés après une longue période de temps sec et étaient représentatifs des débits de base. Cette hypothèse a été corroborée avec les données publiées par Environnement Canada pour la station météorologique de Sept-Îles. Le modèle devrait surévaluer les valeurs de débit de surface mesurées en juin 2012, puisque la recharge utilisée dans le modèle représente des conditions normales moyennes pour une période de 30 ans, lesquelles conditions produiraient des débits notamment plus élevés que les débits plus bas d'été.

Tableau 8 Les débits d'eau de surface mesurés comparativement aux débits simulés

Zone #	Zone modèle #	Valeurs des débits mesurés m <sup>3</sup> /d	Valeurs des débits simulés m <sup>3</sup> /d
1	2	34,6	33,9
2	3	380,26	1077,8
3	4	172,8	364,7
4	5	17,8	374,9
5	6	8,6	196,8
6	7	86,4	54,5
7	8	43,2	271,7
8	9	345,6	428,1
9	10	259,2	318,2
10	11	17,3	692,8
11	12	181,4	821,3
12	13	155,5	92,1
13	14	17,38	109,7
14	15	181,4	437,3
15	16	492,58	505,6
16	17	8,6	47,0
17	18	17,38	47,2
18	19	60,5	195,7
19	20	354,2	276,3
20	21	43,2	426,4
21	22	95,0	942,3
22	23	60,5	83,8
23	25	34,6	187,5

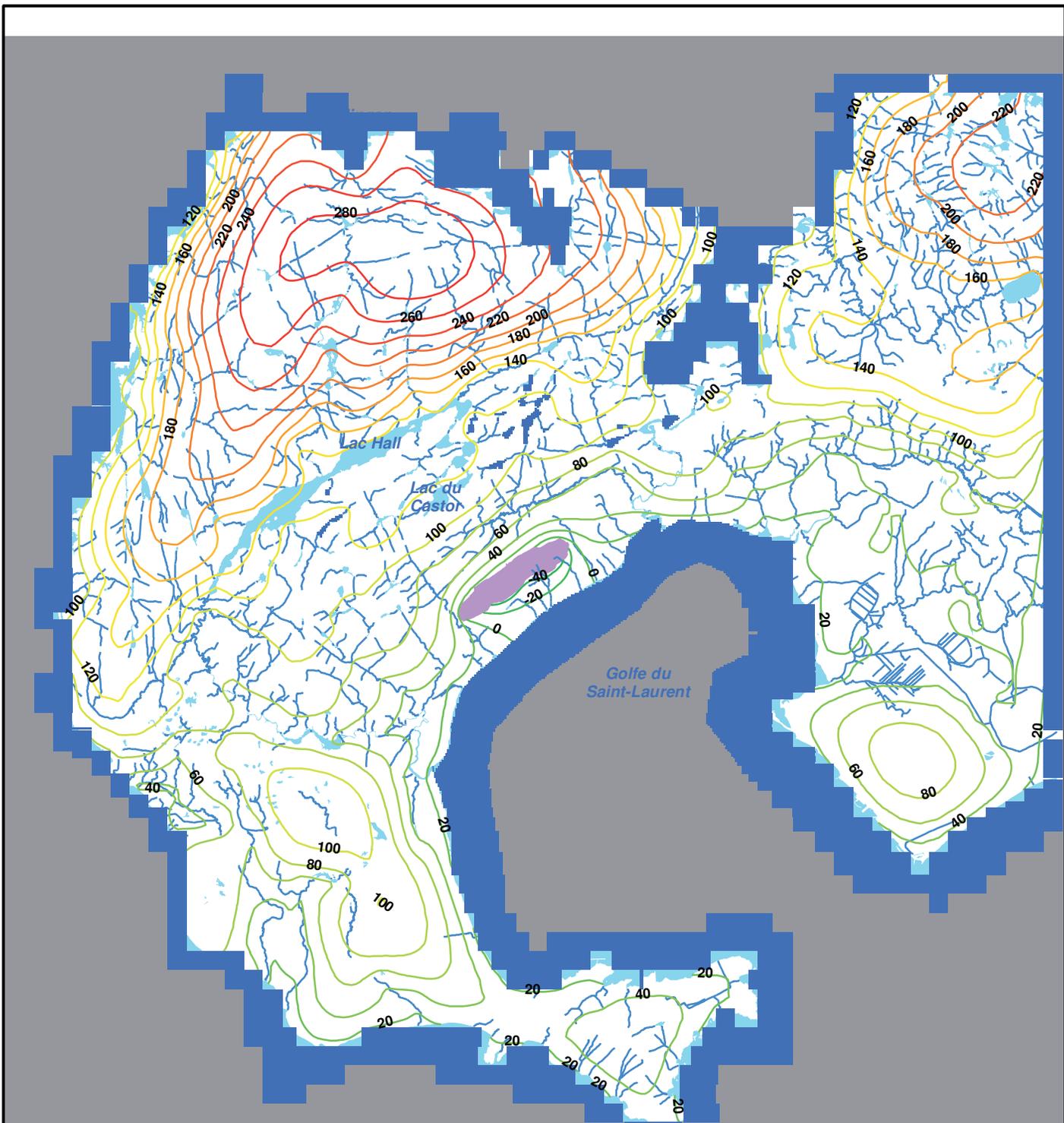
## 6. RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

---

Les simulations numériques en régime permanent ont été complétées pour trois périodes différentes, soit à l'excavation complète de la mine (23 ans), après 7 ans d'exploitation et après 15 ans d'exploitation. À la fin de l'exploitation (23 ans), le niveau d'eau est maintenu à une élévation de -150mASL, correspondant à l'assèchement complet de la fosse. Le taux de pompage anticipé lors de chacune des périodes a également été évalué lors des simulations. La géométrie finale de la fosse après 7 ans et 15 ans d'exploitation a été utilisée lors des simulations afin de déterminer les débits de pompage et l'étendue des impacts causés par le dénoyage. Le volume pompé comprend l'apport provenant de l'écoulement souterrain et la recharge provenant des précipitations. L'analyse de trajectoire des particules (avec le logiciel MODPATH, lequel utilise les résultats des charges MODFLOW) a servi également à délimiter les zones de captage, soit la provenance de l'eau pompée lors du dénoyage, et ce, afin de déterminer l'efficacité du modèle (la recharge au-dessus de la zone de captage devrait être équivalente au débit de dénoyage de la mine), de même que pour estimer le temps de passage de l'eau souterraine pour atteindre la fosse.

### 6.1 Modification de la piézométrie régionale

Les élévations piézométriques pour l'aquifère de roc profond dans des conditions complètes d'excavation lors du dénoyage sont montrées à la figure 7. Les rabattements simulés lors du dénoyage sont présentés à la figure 8. En condition d'excavation complète, la surface piézométrique régionale ne changera pas significativement sauf à proximité de la fosse. Le rabattement augmente de façon significative près de la fosse, et ce, en raison de l'assèchement puisque l'élévation de l'eau souterraine est à son plus bas au fond de la mine. Les élévations de l'eau souterraine augmentent graduellement en s'éloignant de la fosse et atteignent des conditions statiques lorsque les effets de l'excavation et du dénoyage diminuent. La figure 8 montre que la courbe de rabattement de 1 m s'étendra au sud de la baie des Sept Îles. On s'attend à ce que les zones à l'intérieur de la courbe de niveau de 1 m de rabattement aient des élévations d'eau souterraine plus basses et il se peut que l'on ne puisse expliquer de possibles réductions de débits de base d'eau de surface avec des fluctuations saisonnières normales. La courbe de rabattement de 1 m atteint presque le lac du Castor situé au nord-ouest de site minier. Considérant les faibles liens hydrauliques entre les eaux de surface et l'aquifère profond ainsi que les résultats de modélisation numérique, on ne prévoit pas que le lac sera affecté par les activités minières. Les résultats de la simulation numérique en régime permanent indiquent que la courbe de rabattement de 1 m s'étend à environ 1,6 km au nord-est et à approximativement 1,4 km au sud-ouest de la fosse. Il est à noter que ces résultats peuvent varier s'il y a une modification de la représentation des failles et si d'autres données deviennent disponibles.



**LEGEND**

- |                        |          |
|------------------------|----------|
| Constant Head Boundary | 80 mASL  |
| No Flow Cells          | 100 mASL |
| Mine Site              | 120 mASL |
| Waterbodies            | 140 mASL |
| Watercourses           | 160 mASL |
| -40 mASL               | 180 mASL |
| -20 mASL               | 200 mASL |
| 0 mASL                 | 220 mASL |
| 20 mASL                | 240 mASL |
| 40 mASL                | 260 mASL |
| 60 mASL                | 280 mASL |



1,000 500 0 1,000 Metres

**GROUNDWATER ELEVATIONS DUE TO ACTIVE MINE OPERATIONS AND DEWATERING PROCESS**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: DECEMBER 2012

SCALE: 1:150000

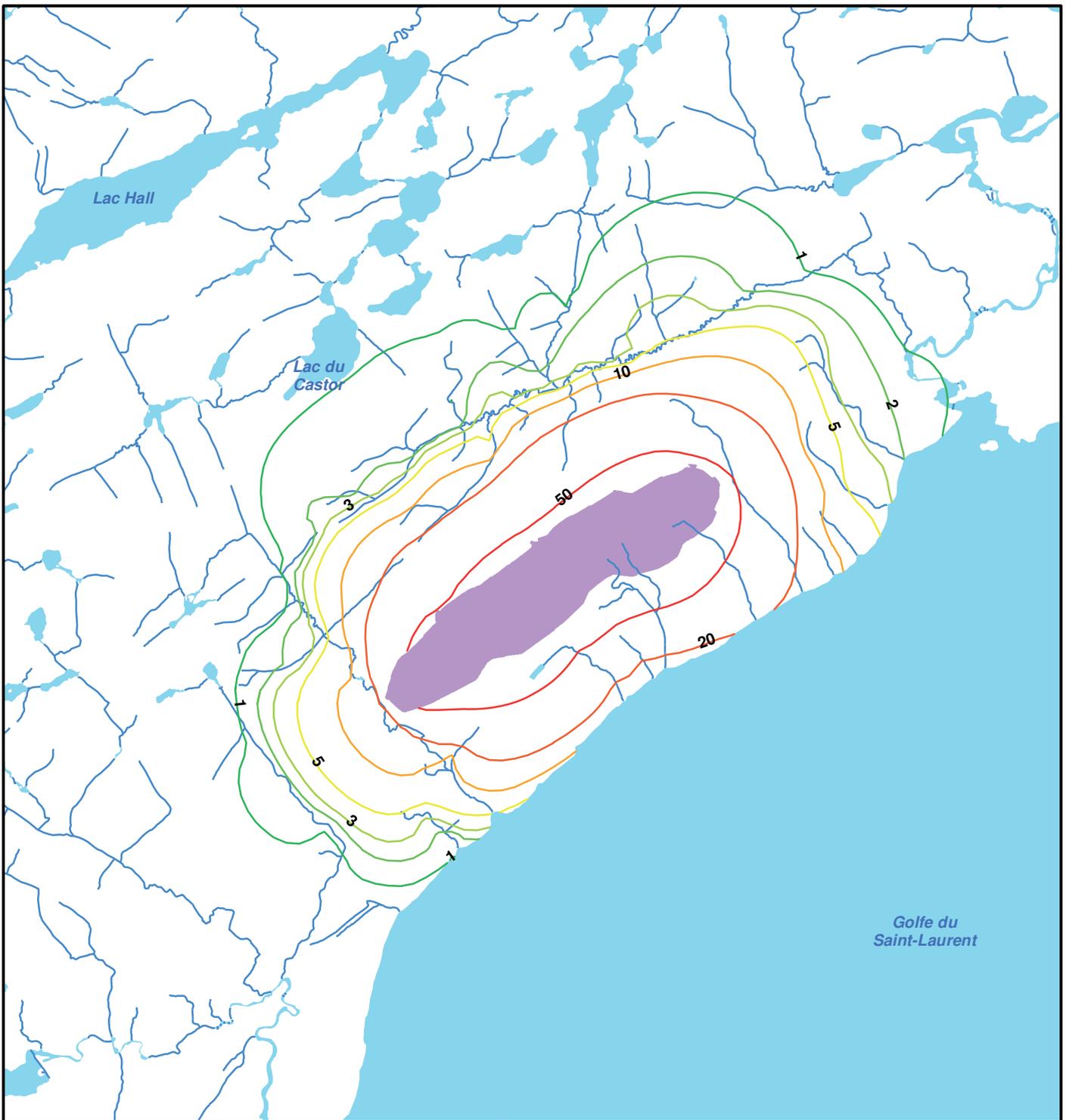
PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F7



FIGURE

**7**



**LEGEND**

- 1 m
- 2 m
- 3 m
- 5 m
- 10 m
- 20 m
- 50 m
- Watercourses
- Waterbodies
- Mine Site



500 250 0 500 Metres

**DRAWDOWN CONTOUR LINES DUE TO ACTIVE MINE OPERATIONS AND DEWATERING PROCESS**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: DECEMBER 2012

SCALE: 1:50000

PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F8



FIGURE

**8**

Deux périodes d'exploitation additionnelles ont été simulées soit après 7 ans d'exploitation et après 15 ans. Les débits de dénoyage ont été évalués lors de ces périodes en considérant l'assèchement complet de la fosse à une élévation de 0 mASL et de -40 m ASL respectivement. L'analyse de trajectoire des particules a été effectuée pour ces deux simulations afin de déterminer la provenance de l'eau pompée dans la fosse. Un code de couleur a été ajouté pour montrer le tracé des lignes de courant ainsi que l'évolution des zones de captage au cours des années. Ceci permet d'obtenir une estimation du temps de passage de l'eau souterraine vers la fosse. Le temps de passage est calculé à l'aide d'information hydrogéologique, incluant la conductivité hydraulique et la porosité effective. Les différentes campagnes de terrain effectuées ont permis d'obtenir les valeurs de conductivité hydraulique pour les unités hydrostratigraphiques dans le secteur du site minier. La porosité effective est évaluée à partir de la nature des matériaux rencontrés dans le secteur et des valeurs théoriques extraites de la littérature. Une porosité effective de 0,01 a été utilisée.

Selon les simulations numériques réalisées, les débits de base de certains cours d'eau pourraient être affectés par le développement de la mine, comme cela est montré au tableau 9. Selon les résultats obtenus, le développement de la fosse pourrait affecter les cours d'eau situés au sud (zones du modèle 4, 5, 6, 7, 8, 9 et 10). Les cours d'eau situés dans la zone 3 pourraient également être affectés, mais à un degré moindre (une diminution du débit prévu de 39 %). Dans la partie en aval du ruisseau Clet (zones de modèle 13, 14 15 et 16), une diminution du débit entre 70 % et 100 % pourrait être observée. Par contre, dans le cas du ruisseau Clet, cette réduction devrait être compensée par la décharge de l'effluent de la mine. 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, donc la réduction des débits moyens sera moindre en considérant que le débit de base représente une fraction du débit total des ruisseaux.

## **6.1 Évaluation de la trajectoire des particules**

Les résultats de la modélisation en régime permanent obtenus lors de l'excavation complète de la mine ont été utilisés pour mener une analyse de trajectoire des particules, et ce, dans le but de déterminer la provenance de l'eau pompée.

Les résultats d'analyse de trajectoire des particules sont montrés à la figure 9 (exploitation finale). Tel que présenté, la zone de captage (capture zone) s'étend jusqu'à la majorité des lacs situés au nord-ouest de la mine, plus spécifiquement les lacs Roger, Des Feuilles, Lunette, Jimmy, Du Castor, et Calmar. On y remarque également que certaines des particules proviendraient de la baie des Sept Îles.

Tableau 9 Les valeurs de débit de base simulées à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif

Zone modèle #*	Valeurs de débit simulées à		Réduction du débit de base prévu
	partir du modèle calibré	S.S. partir d'un modèle prédictif	
	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d	
2	33,9	33,6	1 %
3	1077,8	659,2	39 %
4	364,7	245,8	33 %
5	374,9	148,8	60 %
6	196,8	83,5	58 %
7	54,5	34,3	37 %
8	271,7	22,5	92 %
9	428,1	0,7	100 %
10	318,2	0	100 %
11	692,8	675,2	3 %
12	821,3	648,7	21 %
13	92,1	0	100 %
14	109,7	33,3	70 %
15	437,3	0	100 %
16	505,6	22	96 %
17	47	44,7	5 %
18	47,2	36,3	23 %
19	195,7	137,8	30 %
20	276,3	219,6	21 %
21	426,4	424,2	1 %
22	942,3	937,4	1 %
23	83,8	83,7	0 %
25	187,5	181,3	3 %

\*Voir figure 4 pour la localisation des zones

La zone de captage (capture zone) est plus étendue que le cône de rabattement de 1 m puisque toutes les eaux vont éventuellement s'écouler dans la fosse au fil du temps. Cependant, cela ne signifie pas que les lacs situés au nord de la fosse seront affectés. Le cône de rabattement de 1 m représente la zone qui pourrait être affectée par la fosse. Le bilan de masse du logiciel Zone budget montre que la quantité d'eau pompée à l'intérieur de la fosse est d'environ 11 425 m<sup>3</sup>/j à la toute fin de l'exploitation et que la recharge évaluée dans la zone de captage est approximativement de 11 506 m<sup>3</sup>/j. La différence entre les deux est d'environ 0,7 %, ce qui est considéré comme une bonne corrélation. Le pourcentage de différence montre que le modèle représente adéquatement les conditions sur le terrain.

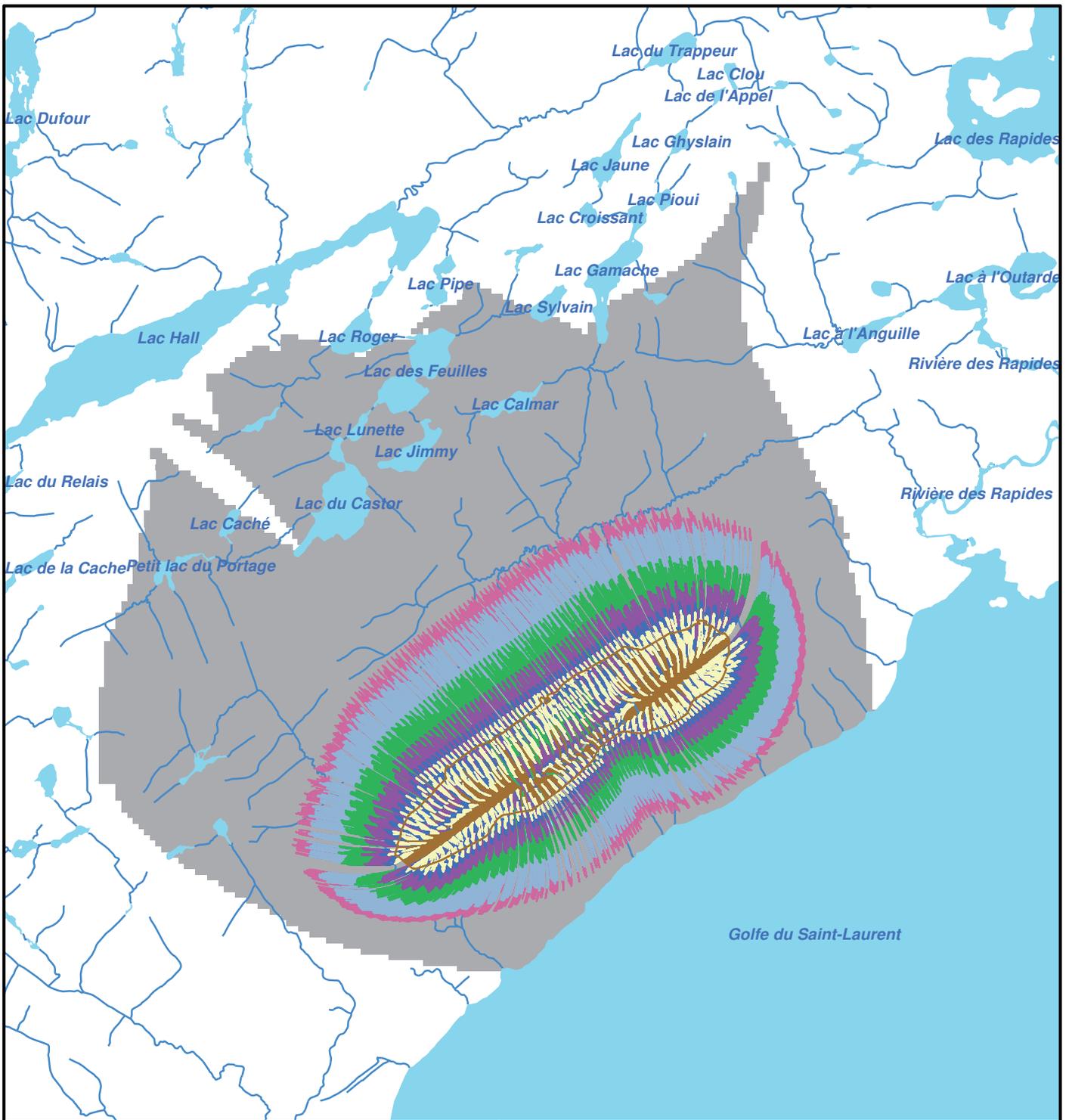
Dans le modèle, la recharge au-dessus de la fosse elle-même compte pour 50,6 % de l'eau pompée. L'apport provenant des eaux souterraines correspond donc à 49,4 % de l'eau pompée. L'analyse de trajectoire des particules a montré que lors du relâchement de 28 800 particules dans l'aquifère autour de la fosse,

approximativement 5,7 % d'entre elles proviennent de la baie des Sept Îles. En supposant une corrélation raisonnable entre les particules relâchées et le total des volumes des points d'origine, moins de 3 % de la quantité totale d'eau pompée dans la fosse proviendrait de la baie des Sept Îles (en condition finale d'exploitation à l'atteinte du régime permanent).

Les simulations numériques effectuées pour les périodes de 7 ans et de 15 ans d'exploitation ont permis de suivre l'évolution des débits de pompage et de la provenance de l'eau pompée en fonction de l'approfondissement de la fosse. La figure 10 présente les résultats d'analyse de trajectoire des particules après 7 ans d'exploitation. Tel que montré à la figure 10, la majorité de l'eau provient du nord de la fosse, comme il été obtenu à l'exploitation finale, mais à un moindre degré. La quantité d'eau pompée est évaluée à environ 5 357 m<sup>3</sup>/jour. Le bilan total de l'eau captée comparativement à l'eau rejetée de cette zone de captage est de 5 %. Ceci est considéré comme une bonne corrélation.

La figure 11 présente les résultats de l'analyse de trajectoire des particules pour une exploitation d'une durée de 15 ans. Une fois encore, la majorité de l'eau provient du nord de la mine, et à un moindre degré que la fosse complète, mais plus élevé que la fosse exploitée pour une durée de 7 ans tel que prévu. La quantité d'eau pompée est évaluée à 9 839 m<sup>3</sup>/jour. Le bilan de l'eau captée comparativement à l'eau rejetée de la zone de captage est de 2 %. Ceci est encore considéré comme une bonne corrélation

Dans l'ensemble, le modèle reproduit des résultats constants et représentatifs pour les trois périodes d'exploitation modélisées. Toutefois, il faut souligner que les résultats pourraient changer en raffinant le modèle, plus particulièrement avec une plus grande compréhension de la nature des failles dans la zone, et ce, par l'entremise de travaux supplémentaires sur le terrain.



**LEGEND**

- 1 Year Time of Travel
- 2 Year Time of Travel
- 5 Year Time of Travel
- 10 Year Time of Travel
- 20 Year Time of Travel
- 25 Year Time of Travel
- Waterbodies
- Watercourses
- Mine Site
- Capture Zone of Steady State Travel



500 250 0 500 Metres

**ACTIVE MINE CAPTURE ZONE**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: MARCH 2013

SCALE: 1:50000

PROJECT: 121-17926-00

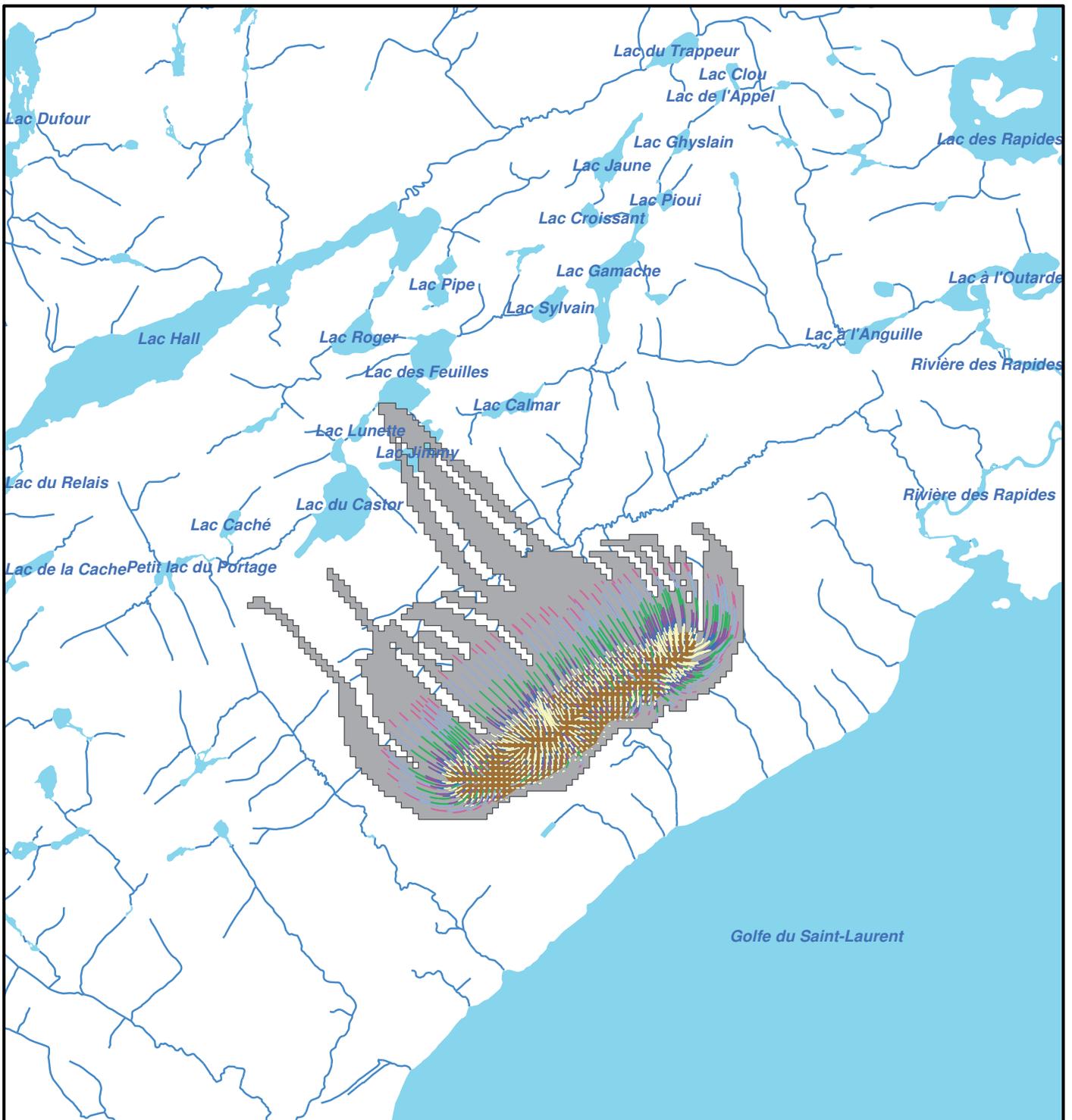
FILE. NO.:121-17926-00F9



**GENIVAR**

FIGURE

**9**



**LEGEND**

- 1 Year Time of Travel
- 2 Year Time of Travel
- 5 Year Time of Travel
- 10 Year Time of Travel
- 20 Year Time of Travel
- 25 Year Time of Travel
- 7 Year Mine Site
- 7 Year Mine Design Capture Zone for Steady State Travel
- Waterbodies
- Watercourses



500 250 0 500 Metres

**7-YEAR MINE DESIGN  
CAPTURE ZONE**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: MARCH 2013

SCALE: 1:50000

PROJECT: 121-17926-00

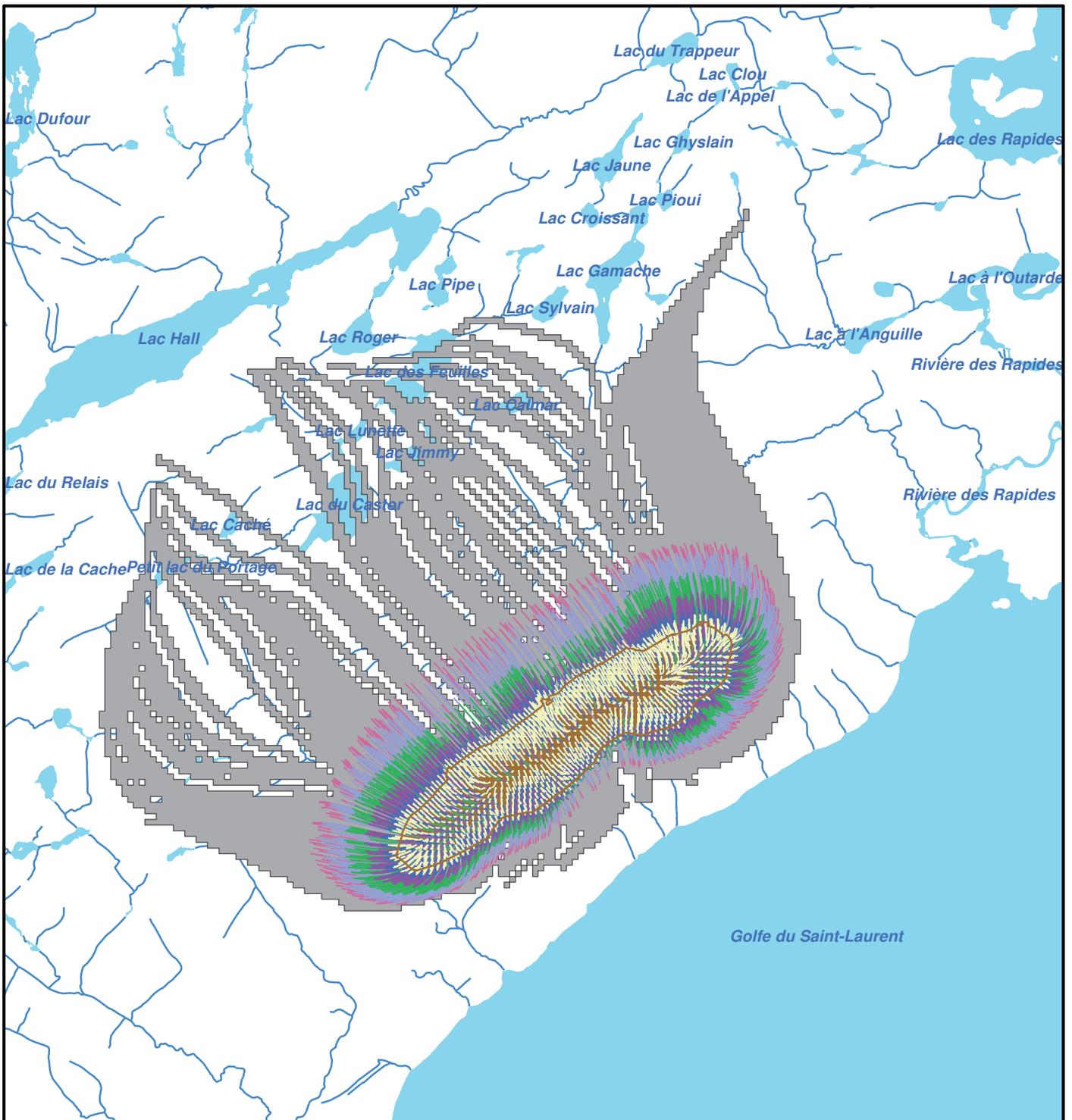
FILE. NO.:121-17926-00F10



**GENIVAR**

FIGURE

**10**



**LEGEND**

- 1 Year Time of Travel
- 2 Year Time of Travel
- 5 Year Time of Travel
- 10 Year Time of Travel
- 20 Year Time of Travel
- 25 Year Time of Travel
- 15 Year Mine Site
- 15 Year Mine Design Capture Zone for Steady State Travel
- Waterbodies
- Watercourses



**15-YEAR MINE DESIGN  
CAPTURE ZONE**

NUMERICAL GROUNDWATER MODELLING REPORT  
For: Mine Arnaud

DATE: MARCH 2013

SCALE: 1:50000

PROJECT: 121-17926-00

FILE. NO.:121-17926-00F11



**GENIVAR**

FIGURE

**11**



## 7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

---

### 7.1 Conclusions

Les principaux objectifs de la modélisation numérique de l'écoulement d'eau souterraine étaient premièrement d'étudier les effets du dénoyage sur les plans d'eau comme les lacs situés au nord-ouest du site minier et, deuxièmement, d'identifier l'origine de l'eau qui sera pompée à l'extérieur de la fosse lors du processus de dénoyage de celle-ci. Les simulations numériques en régime permanent ont été complétées pour trois périodes différentes, soit à l'excavation complète de la mine (23 ans), après 7 ans d'exploitation et après 15 ans d'exploitation.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Le modèle en régime permanent calibré obtenu représente de façon satisfaisante les conditions existantes au site minier et celui-ci répond aux normes de l'industrie (valeur de calibration cible inférieure à 10 %). Les débits d'étiage pour les stations d'eau de surface sont modérément surestimés par le modèle. Ceci est normal considérant que la recharge est basée sur des conditions normales moyennes sur une période de 30 ans et que les débits utilisés pour la calibration ont été mesurés lors d'une période anormalement sèche.

#### **Prédictions à 23 ans d'exploitation (exploitation finale)**

- L'excavation complète de la mine a été simulée en considérant une élévation d'eau à -150 mASL au fond de la fosse puisque celle-ci sera asséchée par les activités de dénoyage.
- Le modèle prévoit que 11 425 m<sup>3</sup> d'eau seront rejetés hors de la fosse sur une base quotidienne. 50,6 % de l'eau rejetée est liée à la recharge au-dessus du puits et 49,4 % aux apports d'eau souterraine.
- Le cône de rabattement prévu de 1 m n'atteindra pas les lacs situés au nord-ouest du site minier. L'eau de surface près de la fosse projetée pourrait être touchée par l'assèchement de la mine, tel qu'indiqué au tableau 9. La plupart des cours d'eau touchés sont situés au sud de la fosse et dans la partie aval du ruisseau Clet. Néanmoins, le débit d'étiage de tous les cours d'eau situés à l'intérieur du cône de rabattement de 1 m diminuera
- Une partie de l'eau souterraine dans la fosse proviendrait de la baie de Sept-Îles, tel qu'indiqué par l'analyse de trajectoire des particules, lequel indique qu'environ 5,7 % des particules relâchées proviennent de la baie des Sept Îles. Étant donné que 49,4 % de l'eau rejetée de la fosse est de l'eau souterraine, moins de 3 % du total d'eau rejetée pourrait provenir de la baie des Sept Îles.

### **Prédictions après 7 ans d'exploitation**

- Une simulation pour la période d'exploitation de la mine sur une période de 7 ans a été effectuée en utilisant les élévations projetées au fond de la fosse à la septième année. L'élévation maximum simulée du fond de la fosse est 0 mASL.
- À l'année 7, la majorité de l'eau proviendra du nord de la fosse, aucun apport d'eau en provenance de la baie des Sept Îles n'est prévu. Le modèle prévoit qu'environ 5 357 m<sup>3</sup> d'eau seront rejetés hors de la fosse sur une base quotidienne.

### **Prédictions après 15 ans d'exploitation**

- L'année 15 d'exploitation a été simulée en considérant une élévation maximum prévue au fond de la fosse de -40 mASL.
- À l'année 15, la majorité de l'eau souterraine provient du nord, aucun apport d'eau en provenance de la baie des Sept Îles n'est prévu. Le modèle prévoit que 9 839 m<sup>3</sup> de l'eau seront rejetés hors de la fosse sur une base quotidienne.

En résumé, la fosse proposée (à son expansion maximale) réduira les élévations d'eau souterraine de manière perceptible dans une zone délimitée par le cône de dépression de 1 m, lequel mesure 1,6 km au nord-ouest et 1,4 km au sud-est de la fosse proposée. La modélisation indique que les débits d'étiage de l'eau de surface dans cette zone seront réduits tel que décrit au tableau 9.

## **7.2 Recommandations**

Des investigations additionnelles devraient être effectuées sur les failles afin de les représenter adéquatement dans le modèle calibré. Dans le présent modèle, elles ont été représentées en considérant une conductivité hydraulique plus élevée, mais celle-ci ne correspond peut-être pas à la réelle valeur. D'ailleurs, au moment d'écrire ce rapport, des travaux étaient en cours afin de récolter ces informations. Ces failles peuvent influencer l'apport d'eau souterraine dans la fosse et la quantité d'eau provenant de la baie des Sept Îles. Toutefois, il faut noter qu'aucune intrusion d'eau salée n'est anticipée tant et aussi longtemps que la fosse n'aura pas atteint le niveau de la mer, donc ceci laisse le temps pour améliorer la justesse du modèle afin d'obtenir des résultats plus représentatifs.

Afin de raffiner le modèle, des données supplémentaires pourraient être recueillies pour les lacs situés au nord-ouest et à l'aval du site minier (par exemple, enregistrement de la profondeur, caractérisation du matériau au fond de la fosse) puisque le cône de rabattement pourrait atteindre cette zone. Les lacs situés au nord-ouest devraient représenter les conditions limites dans de nouvelles modélisations numériques avec des caractéristiques mesurées adéquates, et ce, afin de mieux évaluer l'influence de l'exploitation sur les lacs.



## 8. LIMITATIONS

---

Le logiciel MODFLOW a servi à simuler l'écoulement de l'eau souterraine en régime permanent pour les conditions existantes du site et aussi à simuler le débit de dénoyage de la fosse à différentes étapes d'excavation. Le modèle en condition statique fournit une représentation réaliste des conditions moyennes de l'eau souterraine et permet de simuler les modifications des conditions d'écoulement de ces eaux souterraines résultant de l'exploitation de la mine. Il sera possible de mettre à jour ce modèle et ses prévisions lorsque de nouvelles informations seront disponibles, et ce, afin de tester et d'évaluer à nouveau les prévisions du modèle.

Les services fournis par GENIVAR ont été exécutés avec le niveau de soins et les compétences exercés ordinairement par les membres qui travaillent dans le domaine du génie de l'environnement et des services d'experts-conseils. Ce rapport présente les résultats de la compilation des données et les simulations numériques d'un cadre géologique complexe. En raison de la nature des investigations subsurfaces, qui explorent un volume relativement élevé de matériau avec un petit nombre de trous de forage, il peut y avoir des lacunes dans l'information obtenue par et fournie à GENIVAR. Les modèles construits à partir de ces données sont limités par la qualité et l'exhaustivité des informations disponibles au moment où le travail a été effectué. Les modèles numériques représentent une simplification des conditions géologiques actuelles. L'applicabilité de la simplification de ses hypothèses peuvent ou non s'appliquer à un ensemble d'applications. Ce rapport ne constitue pas une investigation exhaustive de toutes les conditions environnementales possibles ou des circonstances qui peuvent être présentes dans la zone d'étude. Les informations fournies dans ce rapport ne sont pas à l'épreuve du passage du temps.

Les conditions environnementales et la quantité de données disponibles peuvent varier. Les discussions portant sur les conditions sont basées sur l'information disponible au moment où ces conclusions ont été formulées.



## 9. REFERENCES

---

- ANDERSON, M. P. AND WOESSNER, W. W. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. San Diego: Academic Press, 1992.
- AUSENCO VECTOR, ENVIRONMENT & SUSTAINABILITY. Mine Arnaud: Draft Hydrogeologic Investigation Report, July 2011
- BEAR, J. HYDRAULICS OF GROUNDWATER. Toronto: McGraw-Hill Book Company, 1979.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcVIEW. Version 9.3. 2009.
- HARBAUGH, A.W., BANTA, E.R., HILL, M.C., AND MCDONALD, M.G. MODFLOW-2000, The USGS Modular Groundwater Model – User Guide to Modularization Concepts and the Groundwater Flow Process, USGS Open-File Report 00-92., 1988-2005.
- HARBAUGH, A.W. ZONEBUDGET. Version 2.1. April 18, 1990.
- POLLOCK, D.W. MODPATH. 1994. <http://www.water.usgs.gov/software/modpath>
- The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, U.S. Environmental Protection Agency, September 1994

