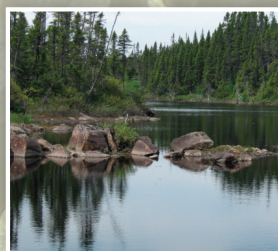




Mine **Arnaud**

## Projet minier Arnaud



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

### RAPPORT DE MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE RÉVISION 2





PROJET MINIER ARNAUD  
COMPLÉMENT N° 7 À  
L'ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT  
RAPPORT DE MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE  
RÉVISION 2

Présenté à

Mine Arnaud inc.

Par

GENIVAR inc.

SEPTEMBRE 2013

121-17926-00



## ÉQUIPE DE RÉALISATION

---

### **GENIVAR inc.**

Chargé de discipline	:	Simon Latulippe, ing.
Chargée de projet modélisation	:	Isabelle Hemmings, M.A. Sc.
Collaborateurs	:	Andréanne Hamel, ing. M. Sc. Daniel Lemaire, ing. M. Sc.
Réviseur senior, modélisation	:	David Ruttan, ing.
Travaux de modélisation	:	Mohamed Mostafa, ing. Ph.D.
SIG	:	Tanya Peterson
Cartographie	:	Maude Boulanger
Édition	:	Linette Poulin

---

### **Référence à citer :**

GENIVAR. 2013. *Projet minier Arnaud. Complément n° 7 à l'étude d'impact sur l'environnement. Rapport de modélisation hydrogéologique. Révision 2* Rapport de GENIVAR à Mine Arnaud inc. 76 p. et annexes.



# TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Équipe de réalisation .....	i
Table des matières .....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vii
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte .....	1
1.2 Objectifs de modélisation .....	1
1.3 Études antérieures .....	2
2. MÉTHODOLOGIE .....	3
3. MODÈLE CONCEPTUEL.....	5
3.1 Topographie .....	5
3.2 Hydrologie .....	6
3.3 Unités hydrogéologiques.....	9
3.3.1 Unité 1a : till/ silt sableux.....	10
3.3.2 Unité 1 b : dépôts organiques épais.....	10
3.3.3 Unité 2 : Silt argileux .....	10
3.3.4 Unité 3 : Roc fracturé .....	11
3.3.5 Unité 4 : Roc sain .....	11
3.3.6 Unité 5 : Argile sous la baie des Sept Îles.....	11
3.4 Éléments structuraux.....	12
3.5 Charges hydrauliques .....	12
3.6 Zones de recharge .....	14
4. CHOIX DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT .....	15
4.1 Simulation en utilisant le logiciel MODFLOW .....	15
4.2 Approche avec un milieu poreux équivalent.....	17
5. CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT .....	19
5.1 Étendue du domaine et construction du maillage .....	19
5.2 Définition des différentes couches du modèle.....	19

## **TABLE DES MATIÈRES (suite)**

	<b>Page</b>
5.3 Conditions limites .....	20
5.3.1 Type charge constante .....	20
5.3.2 Type cellules drainantes .....	25
5.3.3 Conditions limites lors des simulations de dénoyage.....	26
5.4 Propriétés hydrauliques .....	29
5.5 Zones de recharge .....	30
5.5.1 Recharge lors des simulations de dénoyage .....	39
6. CALIBRATION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT.....	41
6.1 Objectifs de calibration.....	41
6.2 Méthodologie de calibration .....	41
6.3 Résultats de la calibration .....	42
6.3.1 Charges hydrauliques .....	42
6.3.2 Débits d'eau de surface .....	43
6.3.3 Bilan hydrique .....	45
6.4 Conditions finales du modèle calibré .....	46
6.5 Sensibilité des paramètres.....	49
7. RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES .....	53
7.1 Modification de la piézométrie régionale.....	53
7.2 Débits de dénoyage .....	54
7.3 Évaluation de la trajectoire des particules.....	59
7.3.1 Zones de captage .....	59
7.3.2 Présence d'eau salée .....	60
7.2 Impacts sur les eaux de surface .....	68
8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	71
8.1 Conclusions.....	71
8.2 Recommandations .....	72
9. LIMITATIONS.....	73
10. RÉFÉRENCES.....	75



## **LISTE DES FIGURES**

**Page**

Figure 1	Localisation des sondages et des installations .....	7
Figure 2	Étendue du domaine et conditions limites.....	21
Figure 3	Épaisseur des dépôts meubles (couche 1) .....	23
Figure 4	Localisation des zones attribuées aux cours d'eau.....	27
Figure 5a	Zones de conductivité hydraulique (zones - couche 1) .....	31
Figure 5b	Zones de conductivité hydraulique (zones – couche 2) .....	33
Figure 5c	Zones de conductivité hydraulique (zones – couches 3-5) .....	35
Figure 5d	Zones de conductivité hydraulique (zones – couches 6-13) .....	37
Figure 6	Élévations piézométriques simulées en régime permanent .....	44
Figure 7	Zones de recharge calibrée.....	47
Figure 8	Élévations piézométriques simulées lors du dénoyage final (23 ans).....	55
Figure 9	Courbes de rabattement simulées par le dénoyage (23 ans) .....	57
Figure 10	Zone de captage évaluée à partir d'une analyse de trajectoire de particules à la fin de l'exploitation (Active Mine Capture Zone).....	61
Figure 11	Délimitation de la zone de captage après 7 ans d'exploitation .....	63
Figure 12	Délimitation de la zone de captage après 15 ans d'exploitation .....	65



## **LISTE DES TABLEAUX**

	<i>Page</i>
Tableau 1	Débits mesurés entre le 19 et le 22 juin 2012..... 6
Tableau 2	Conductivité hydraulique, modèle conceptuel..... 9
Tableau 3	Conductivité hydraulique des zones de failles, modèle conceptuel ..... 12
Tableau 4	Élévations piézométriques mesurées, modèle conceptuel ..... 13
Tableau 5	Les valeurs des charges constantes ..... 25
Tableau 6	Zones et valeurs des débits mesurés..... 26
Tableau 7	Attribution des conductivités hydrauliques aux zones de modèle ..... 29
Tableau 8	Paramètres d’emmagasinement ..... 30
Tableau 9	Valeurs initiales de la recharge ..... 30
Tableau 10	Statistiques de calibration (charges hydrauliques)..... 42
Tableau 11	Calibration des charges hydrauliques ..... 43
Tableau 12	Débits d’eau de surface mesurés comparativement aux débits simulés ..... 45
Tableau 13	Bilan hydrique..... 45
Tableau 14	Résultats de calibration pour la recharge..... 46
Tableau 15	Conductivités hydrauliques obtenues suite à la calibration..... 49
Tableau 16	Liste des zones de conductivités hydrauliques ..... 50
Tableau 17	Sommaire des débits de dénoyage anticipés à chacune des périodes..... 54
Tableau 18	Proportion des volumes d’eau pompée provenant de la baie (eau salée) ..... 68
Tableau 19	Valeurs des débits de base simulées à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif ..... 69
Tableau 20	Impact anticipé sur les débits des eaux de surface..... 70



# 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 des campagnes de terrain complétées par GENIVAR en 2012 et en 2013. 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.

Ce rapport consiste en une révision du rapport déjà soumis en mars 2013. En effet, puisque plusieurs données de terrain additionnelles ont été acquises au cours de l'hiver et du printemps 2013, il était nécessaire de réajuster le modèle conceptuel à l'aide des nouvelles données acquises. Ces nouvelles données ont permis de préciser l'épaisseur d'argile dans la baie, de mieux caractériser les systèmes de faille et de préciser les conductivités hydrauliques du roc. Le modèle conceptuel a donc été bonifié, ce qui a eu pour effet de modifier les résultats des simulations numériques. Ce rapport présente donc les résultats les plus à jour.

## 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'eau souterraine mesurés à l'endroit de 21 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;
- Effectuer une étude de sensibilité liée à la variation des conductivités hydrauliques des unités géologiques;
- 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 cône 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. MÉTHODOLOGIE

---

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

- Élaboration du modèle conceptuel initial basé sur les données disponibles;
- Construction du modèle hydrogéologique numérique afin d'obtenir une représentation le plus fidèle possible au modèle conceptuel élaboré;
- Détermination de l'étendue de la zone d'étude;
- Identification du contexte géologique et des propriétés hydrogéologiques des unités hydrostratigraphiques;
- Attribution des conditions hydrogéologiques à chacune des unités hydrostratigraphiques (aquifères et aquitards) dans l'horizon de subsurface;
- Analyse mouvement régional de l'eau souterraine incluant les élévations de l'eau souterraine;
- Identification des éléments hydrologiques, tels que les bassins versants, les zones d'infiltration des eaux souterraines et les résurgences ainsi que les cours d'eau;
- Calibration des paramètres hydrauliques du modèle numérique afin d'être fidèle du réseau d'écoulement d'eau souterraine dans le secteur d'étude;
- Évaluation de l'aire d'influence du dénoyage de la fosse.

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

- Données digitalisées d'élévation topographique (BDTQ, 1:20 000, feuillets 22J01-200-0201, 22J02-200-0202, 22J07-200-0102 et 22J08-200-0101, MRNF, 2007);
- Données digitalisées d'élévation topographique (LIDAR, résolution 10 cm, Géolocation, 2012);
- Données digitalisées des dépôts quaternaires (SIEF, 1:20 000);
- Cartes géologiques (SIGEOM);
- Système d'information hydrogéologique (SIH);
- Environnement Canada (données météorologiques des 30 dernières années);
- 181 forages d'exploration dans le secteur de la fosse (SOQUEM, 2010);
- 82 forages et tranchées d'exploration, étude géotechnique (Lab. Journeaux inc., 2011);

- Étude hydrogéologique (Ausenco-Vector, 2011) :
  - 2 puits de pompage (PW1 et PW2 et 4 puits d'observation OW1, OW2, OW3 et OW4);
  - 98 essais Lugeon dans 9 puits (CH1 à CH9);
  - 2 essais de pompage;
  - Modélisation numérique du secteur d'étude.
- Étude d'impact sur l'environnement (Roche, 2012);
- Étude hydrogéologique (GENIVAR, 2012);
  - 14 puits d'observation (PO1 (Roc [R] et Sols de surface [S]), PO2 [R et S], PO3R, PO4R, PO5 [R et S], PO6R, PO7R, PO8R, PO9 [R et S], PO10R) et un forage stratigraphique dans le secteur de la fosse (F2), GENIVAR(2012);
  - Essais de perméabilité (slug test) et piézométrie de tous ces 14 puits.
- 27 stations de mesure de débit de cours d'eau, étude hydrologique (GENIVAR, 2012);
- Structure (zone de faille) du projet mine Arnaud (AXOR, 2012);
- Étude hydrogéologique complémentaire (GENIVAR, 2013) :
  - 5 puits, dont deux dans le secteur de la fosse (1166-13-190 et 1166-13-191), deux le long du ruisseau Clet (1166-13-194 et 1166-13-195) et un le long du ruisseau R10 (1166-13-198), GENIVAR (2013);
  - 18 essais Lugeon et piézométrie de tous ces 5 puits.
- Levés de sismique réfraction à la jonction du littoral de la baie des Sept Îles et de la zone intertidale (GPR, 2013).



### **3. MODÈLE CONCEPTUEL**

---

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

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

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

#### **3.1 Topographie**

Le site du projet est situé dans la région physiographique Laurentienne qui recouvre une vaste portion du territoire au nord du fleuve St-Laurent. Le site est localisé plus précisément à la limite de la plaine côtière de la baie des Sept Îles et du plateau laurentien (figure 1).

La plaine côtière ceinture une baie d'une superficie d'environ 45 km<sup>2</sup>. Elle constitue une mince bande de quelques centaines de mètres de large seulement autour de la baie. Le relief de la plaine est relativement plat, avec des élévations se situant près du niveau de la mer.

L'élévation du terrain augmente ensuite graduellement en direction du plateau laurentien. Le relief sur le plateau est plus accidenté. Il est composé de montagnes et collines aux sommets arrondis, avec des élévations qui se situent autour d'une centaine de mètres dans la région du projet.

La topographie de surface utilisée dans le modèle est une combinaison de données digitalisées d'élévation topographique (BDTQ, LIDAR) et des données de chacun des puits et forages arpentés du secteur. Lorsque deux séries de données se superposent, les élévations arpentées et celles du LIDAR ont été favorisées à celles de la BDTQ puisque celles-ci possèdent une plus grande précision (10 cm).

## 3.2 Hydrologie

Le site du projet est situé sur la côte nord, plus précisément dans la partie du golfe du Saint-Laurent. Le site est limité à l'ouest par le bassin de la rivière Sainte-Marguerite et à l'est par le bassin de la rivière Moisie. Ces dernières se jettent directement dans le golfe du Saint-Laurent. La figure 1 présente les principaux cours d'eau et lacs qui s'écoulent en direction sud vers le golfe Saint-Laurent. Le plus grand lac identifié dans la région du projet, le lac Hall, se trouve au nord du site à environ à 1 km de distance des limites prévues du parc à résidus.

Le réseau hydrographique sur le plateau laurentien, en amont du site du projet, présente une configuration intimement liée à l'expression en surface des larges structures géologiques qui ont façonné le paysage.

Le tableau 1 présente les débits mesurés dans le secteur de la mine en juin 2012.

Tableau 1 Débits mesurés entre le 19 et le 22 juin 2012.

	Site	Cours d'eau	Débit (m <sup>3</sup> /s)
Sous-bassin 2	25	Décharge du Petit lac du Portage	0,0004
	31	Décharge du lac PE5	0,0005
	32	Décharge du lac PE4	0 (à sec)
Sous-bassin 3	34	Décharge du lac PE8	0,0007
	35	Décharge du lac PE7	0,0016
	36	Affluent du ruisseau R11	0,0006
	37	Ruisseau R11	0,0020
	41	Ruisseau Clet	0,0002
Sous-bassin 4	42	Ruisseau Clet	0,0023
	43	Affluent ouest du ruisseau Clet	0,0002
	44	Ruisseau Clet	0,0119
	45	Affluent est du ruisseau Clet	0,0018
	46	Ruisseau Clet	0,0062
Sous-bassin 5	51	Décharge du lac Gamache	0,0190
	52	Ruisseau Gamache	0,0234
Sous-bassin 6	61	Décharge du lac PE3	0,0001
	62	Décharge du lac PE2	0,0003
	63	Ruisseau R10	0,0051
	64	Ruisseau R10	0,0010
Sous-bassin 7	72	Ruisseau R2	0,0020
	73	Ruisseau R3	0,0020
	74	Ruisseau R4	0,0001
	75	Ruisseau R5	0,0010
	76	Ruisseau R6	0,0005
	78	Ruisseau R8	0,0040
	79.5	Ruisseau R9.5	0,0030
--	81	Ruisseau R12	0,0020

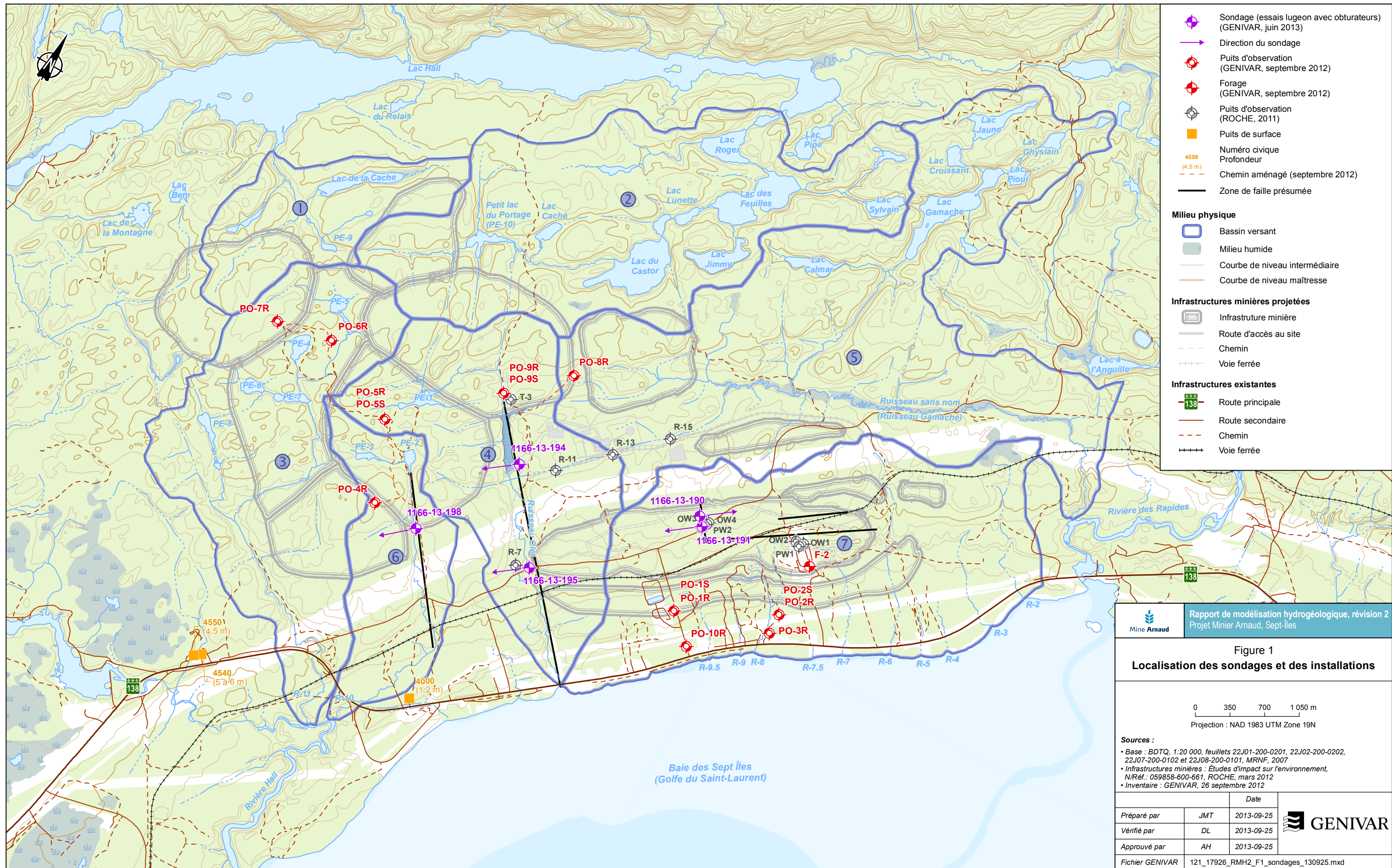


Figure 1  
**Localisation des sondages et des installations**

Sources :

- Base : BDTQ, 1:20 000, feuillets 22J01-200-0201, 22J02-200-0202, 22J07-200-0102 et 22J08-200-0101, MRNF, 2007
- Infrastructures minières : Études d'impact sur l'environnement, N/Ref. : 059858-600-661, ROCHE, mars 2012
- Inventaire : GENIVAR, 26 septembre 2012

		Date
Préparé par	JMT	2013-09-25
Vérifié par	DL	2013-09-25
Approuvé par	AH	2013-09-25
Fichier GENIVAR	121_17926_RMh2_F1_sondages_130925.mxd	





### 3.3 Unités hydrogéologiques

Le site à l'étude se situe dans la région géologique du Bouclier canadien, plus précisément dans la province du Grenville. Le Grenville est constitué principalement de roches métamorphiques contenant de grands massifs de roches intrusives. Les formations rocheuses ont ensuite été recouvertes au Quaternaire par des dépôts glaciaires (till), des dépôts marins ainsi que des dépôts marins littoraux (sable et gravier).

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

Le tableau 2 présente les unités hydrostratigraphiques qui ont été utilisées pour représenter le système hydrogéologique de la région du projet minier Arnaud.

Tableau 2 Conductivité hydraulique, modèle conceptuel

Unité	Épaisseur	Conductivité hydraulique (initiale)			Référence
		moyenne (m/s)	minimum (m/s)	maximum (m/s)	
Till/silt sableux	0 à 15 m	2,34E-07	1,85E-07	2,89E-07	GENIVAR (2013a)
Dépôts organiques épais (et silt sableux)	10 à 70 m	1,15E-07	1,15E-08	1,15E-05	Freeze and Cherry (1979)
Silt argileux	0 à 40 m	4,92E-08	4,51E-08	5,32E-08	GENIVAR (2013a) Ausenco Vector (2011)
Roc fracturé	30 m	6,50E-07	1,31E-07	8,95E-06	GENIVAR (2013a et b) Ausenco Vector (2011)
Roc sain	550 m	1,97E-08	3,11E-09	3,58E-07	GENIVAR (2013a et b)
Argile sous la baie des Sept Iles	6,6 m	1E-08	1E-10	1E-07	Freeze and Cherry (1979) GPR (2013)

### 3.3.1 Unité 1a : till/ silt sableux

Cette unité se situe généralement au-dessus du socle rocheux, principalement dans le secteur situé au nord de la fosse et à l'endroit des aires d'accumulation de résidus. Le dépôt de till/silt sableux est considéré comme un aquifère à nappe libre. Les résultats des essais de perméabilité pour les puits aménagés dans cette unité ont permis de mesurer des conductivités hydrauliques variant de  $1,85 \times 10^{-7}$  m/s à  $2,89 \times 10^{-7}$  m/s, pour une valeur moyenne  $2,34 \times 10^{-7}$  m/s (GENIVAR, 2013a).

Dans le secteur des aires d'accumulation de résidus, l'unité de till/silt sableux est généralement mince, variant de 0,4 à 5,0 m. Toutefois, certains forages ont intercepté des dépôts jusqu'à 13 m d'épaisseur (Journeaux et ass., 2011) à l'endroit du ruisseau Clet. Selon la carte des dépôts quaternaires, l'unité de till/sable silteux couvre une grande superficie du secteur modélisé. Les propriétés hydrauliques mesurées ont été attribuées à toute l'unité.

### 3.3.2 Unité 1 b : dépôts organiques épais

En se basant sur les données du SIH (2013), les dépôts meubles dans le secteur ouest en bordure de la rivière Sainte-Marguerite et dans la ville de Sept-Îles sont plus épais. Ils sont composés, selon la carte des dépôts quaternaires, de dépôts organiques variant entre 10 et 70 m d'épaisseur. Des conductivités hydrauliques provenant de la littérature ont été attribuées pour les dépôts meubles des secteurs situés à l'est et à l'ouest du site à l'étude. Comme ces secteurs sont éloignés du site à l'étude, aucune activité de terrain n'y a été réalisée. Les informations récoltées proviennent uniquement des données du SIH ainsi que des cartes quaternaires. Le degré de précision dans ces secteurs est donc plus faible.

### 3.3.3 Unité 2 : Silt argileux

Les dépôts de silt argileux sont considérés comme un aquifère à nappe libre. Selon la carte des dépôts quaternaires, celui-ci se trouve dans la portion sud de la fosse et s'étend jusqu'à la ville de Sept-Îles. Les résultats des essais de perméabilité effectués dans les puits interceptant l'unité de silt argileux ont permis de mesurer des conductivités hydrauliques variant de  $4,51 \times 10^{-8}$  m/s à  $5,32 \times 10^{-8}$  m/s avec une valeur moyenne  $4,92 \times 10^{-8}$  m/s (GENIVAR, 2013a).

Dans la portion sud de la fosse, les dépôts meubles peuvent atteindre 40 m. Il existe un dénivelé important entre les aires d'accumulation de résidus et la fosse. L'épaisseur des dépôts meubles augmente donc du nord vers le sud, mais est moins

importante à proximité de la baie due à une remontée du niveau du roc. Une dépression est donc présente en bordure sud de la fosse, laquelle est orientée sud-ouest – nord-est. Plusieurs forages ont confirmé la présence de ce dépôt dont l'épaisseur peut atteindre plus de 40 m. Ceux-ci sont constitués principalement de silt argileux à traces de sable. Sous ces dépôts marins, un horizon sableux (till) à perméabilité plus élevée d'une épaisseur d'environ 10 m a été intercepté (puits PO1R). Par contre, cet horizon est absent dans tous les autres forages effectués et ne sera pas considéré dans le modèle.

#### 3.3.4 Unité 3 : Roc fracturé

Le roc fracturé est considéré comme un aquifère à nappe libre (affleurant), semi-captif (sous-jacent au till et au silt argileux) ou captif (sous-jacent à l'argile). La compilation des résultats des essais Lugeon (Ausenco Vector [2011]; GENIVAR [2013b]) et des essais de perméabilité dans les puits au roc peu profond (GENIVAR [2013a]) montrent que les zones de fractures les plus perméables se situent dans la portion supérieure du roc, < 30 m, et pourraient correspondre à des horizons de roc plus altérés. La conductivité hydraulique de la portion supérieure du roc varie de  $1,31 \times 10^{-7}$  m/s à  $8,95 \times 10^{-6}$  m/s, pour une valeur moyenne de  $6,50 \times 10^{-7}$  m/s. En assumant que le réseau de fracture est bien connecté dans la partie supérieure du roc, il est raisonnable d'assumer qu'à l'échelle régionale, cet horizon se comporte comme un milieu poreux équivalent où l'écoulement de l'eau souterraine est régit par le réseau de fractures.

#### 3.3.5 Unité 4 : Roc sain

Le roc sain est considéré comme une aquitard semi-captif (sous-jacent au till et au silt argileux) ou captif (sous-jacent à l'argile). La compilation des résultats des essais Lugeon (Ausenco Vector [2011]; GENIVAR [2013a et b]) montre que la conductivité hydraulique du roc varie beaucoup avec des valeurs entre  $3,11 \times 10^{-9}$  m/s et  $3,58 \times 10^{-7}$  m/s, pour une valeur moyenne de  $1,97 \times 10^{-8}$  m/s. La variabilité de la conductivité hydraulique est attribuable à la présence de fractures en profondeur dans certains secteurs. La modélisation des zones de faille est présentée à la section 3.4. La calibration du modèle, présentée à la section 6, permettra de valider quelle est la conductivité hydraulique la plus appropriée pour modéliser cette unité à l'échelle régionale.

#### 3.3.6 Unité 5 : Argile sous la baie des Sept Îles

Les dépôts argileux sous la baie des Sept Îles sont considérés comme un aquiclude. Deux levés de sismique réfraction ont été réalisés à la jonction du littoral de la baie des Sept Îles et de la zone intertidale afin de préciser l'épaisseur de l'unité d'argile

(GPR, 2013). Les résultats ont donné une épaisseur moyenne d'argile de 6,6 m. Le modèle conceptuel assume que cet horizon est présent sur toute la zone intertidale en bordure du fleuve Saint-Laurent. Les valeurs de conductivité hydraulique de l'argile proviennent de valeurs typiques retrouvées dans la littérature (Freeze et Cherry, 1979).

### 3.4 Éléments structuraux

Les formations rocheuses ont subi plusieurs épisodes de déformation et de fracturation qui ont contribué à produire un vaste réseau de failles et de fractures d'orientation principale nord-est – sud-ouest, avec un réseau secondaire orthogonal. Ce réseau de failles a influencé le relief de la région et la configuration du réseau hydrographique.

Deux systèmes de fractures en direction NO – SE et NE - SO ont été identifiés sur le site à partir des informations géologiques disponibles. La figure 1 présente les présumées zones de failles identifiées à partir de l'étude hydrogéologique d'Ausenco Vector (2011), l'étude des structures d'AXOR (2012) et l'étude hydrogéologique complémentaire de GENIVAR (2013b).

Le tableau 3 présente les résultats des essais Lugeon qui ont été réalisés dans chacune des cinq zones de failles.

Tableau 3 Conductivité hydraulique des zones de failles, modèle conceptuel

Unité	Numéro de failles	Conductivité hydraulique (initiale)			Références
		moyenne (m/s)	minimum (m/s)	maximum (m/s)	
Failles	1 et 2	3,24E-07	1,05E-07	1,00E-06	Ausenco Vector (2011)
	3	9,54E-07	1,08E-07	2,89E-06	
	4	3,36E-07	1,13E-07	1,38E-06	GENIVAR (2013b)
	5	2,92E-06	6,83E-07	1,27E-05	

### 3.5 Charges hydrauliques

Dans le contexte de l'étude de GENIVAR (2013a), 21 puits d'observation ont fait l'objet de mesures des niveaux d'eau. La liste des puits et leurs élévations piézométriques qui serviront de cibles à atteindre pour la calibration du modèle sont présentées au tableau 4.

Les niveaux d'eau mesurés dans le secteur des aires d'accumulation de résidus sont près de la surface (entre 0,07 et 2,81 m de profondeur) ou au-dessus de la surface du sol (respectivement 0,04 m et 0,45 m pour les puits PO9R et PO7R). Les niveaux d'eau mesurés dans le secteur sud de la fosse variaient de 0,2 m à 4,61 m par rapport à la surface du sol. Les puits aménagés à plus faible profondeur (4 à 5 m) ont présenté des niveaux près de la surface.



Tableau 4 Élévations piézométriques mesurées, modèle conceptuel

Puits	Unités hydrostratigraphiques	Élévations piézométriques
1166-13-190	Zone de faille	81,00
1166-13-191	Zone de faille	79,00
1166-13-195	Zone de faille	57,04
OW1	Till/silt sableux	34,00
OW2	Roc	39,00
PO-1R	Roc	23,18
PO-1S	Silt argileux	26,47
PO-2R	Roc	7,50
PO-2S	Silt argileux	7,76
PO-3R	Roc	6,53
PO-4R	Roc	97,91
PO-5R	Roc	86,78
PO-5S	Till/silt sableux	86,88
PO-6R	Roc	96,41
PO-7R	Roc	102,90
PO-8R	Roc	83,44
PO-9R	Roc	70,54
PO-9S	Till/silt sableux	70,17
PO-10R	Silt argileux	5,19
PW1	Roc	32,61
PW2	Roc	81,14

L'écoulement s'effectuerait vers la baie des Sept Îles, en accord avec la topographie locale. Dans le secteur nord des aires d'accumulation de résidus, l'écoulement est présumé se diriger vers le lac Hall. Par contre, aucun puits n'a été aménagé dans ce secteur. Le lac Hall est à une élévation d'environ 80 m par rapport au niveau de la baie des Sept Îles.

Environ deux relevés par jour ont été mesurés entre le 25 et le 27 juin afin de vérifier l'influence des marées sur la variation du niveau de l'eau souterraine dans les dépôts meubles et dans le roc. Cinq puits interceptant l'unité rocheuse (PO2R, PO3R, PO10R, OW1, OW2) et deux puits interceptant les dépôts meubles (PO1R, PO2S) ont été suivis au moyen de capteurs de pression de type *Levellogger* de Solinst. Les niveaux d'eau mesurés dans le secteur sud de la fosse variaient de -0,32 m à 5,00 m par rapport à la surface du sol. Très peu de variation est observée pour un même puits. Les puits aménagés à plus faible profondeur (4-5 m) ont présenté des niveaux près de la surface. Seul le puits 1166-13-190 présente des conditions artésiennes. Les puits crépinés dans les principales unités stratigraphiques du secteur, unités de silt argileux et de roc ne semblent pas être influencés par la marée.

### 3.6 Zones de recharge

Lors d'une précipitation, la proportion de l'eau qui s'évapore, ruisselle et s'infiltré dépend d'un certain nombre de facteurs dont l'épaisseur, la conductivité hydraulique et la topographie des dépôts de surface ainsi que des conditions météorologiques.

Intuitivement, un taux de recharge à l'aquifère rocheux plus important sera observé aux endroits où l'épaisseur de dépôts meubles est faible, surtout si la conductivité hydraulique de ces dépôts est élevée. De plus, une topographie plane peut favoriser l'infiltration vers l'aquifère en minimisant le ruissellement. Dans les secteurs de milieux humides, déjà saturés en eau, la recharge sera beaucoup plus faible puisque l'eau s'accumulera sur place et/ou s'écoulera en surface.

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

Les données mensuelles de précipitations des 30 dernières années de la station météorologique de Sept-Îles serviront à évaluer la recharge du modèle. Durant cette période, la valeur moyenne de précipitation a été de 1 156 mm/an.

Les cours d'eau, les rivières et les lacs peuvent aussi être potentiellement des aires de recharge. Toutefois, peu de données sont disponibles pour définir les taux de recharge (infiltration de l'eau de surface en profondeur).

## 4. CHOIX DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

---

### 4.1 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 :

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

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

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

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 utilisent 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.

## 4.2 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.



## **5. 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.

### **5.1 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.

### **5.2 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.

Tel que décrit aux sections 2.3 et 2.4, le modèle hydrogéologique est subdivisé en cinq unités hydrostratigraphiques. Toutes les unités sont unitaires en Z (épaisseur de l'unité = une cellule en Z), à l'exception de l'unité de roc sain où le maillage a été raffiné en 11 sous-couches (3 à 13) pour permettre une plus grande précision (résolution). L'augmentation du nombre de sous-couches a permis d'obtenir une meilleure résolution de la zone de captage et d'améliorer la stabilité numérique du modèle.

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 des données topographiques, 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 et ceux interpolés lorsqu'aucune donnée n'était 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. La figure 3 présente l'épaisseur des dépôts meubles et tous les points de forages utilisés pour procéder à l'interpolation.

La couche 2, correspondant à l'unité de roc fracturé, a été modélisée en soustrayant 30 m à l'élévation de la couche inférieure de la couche 1.

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.

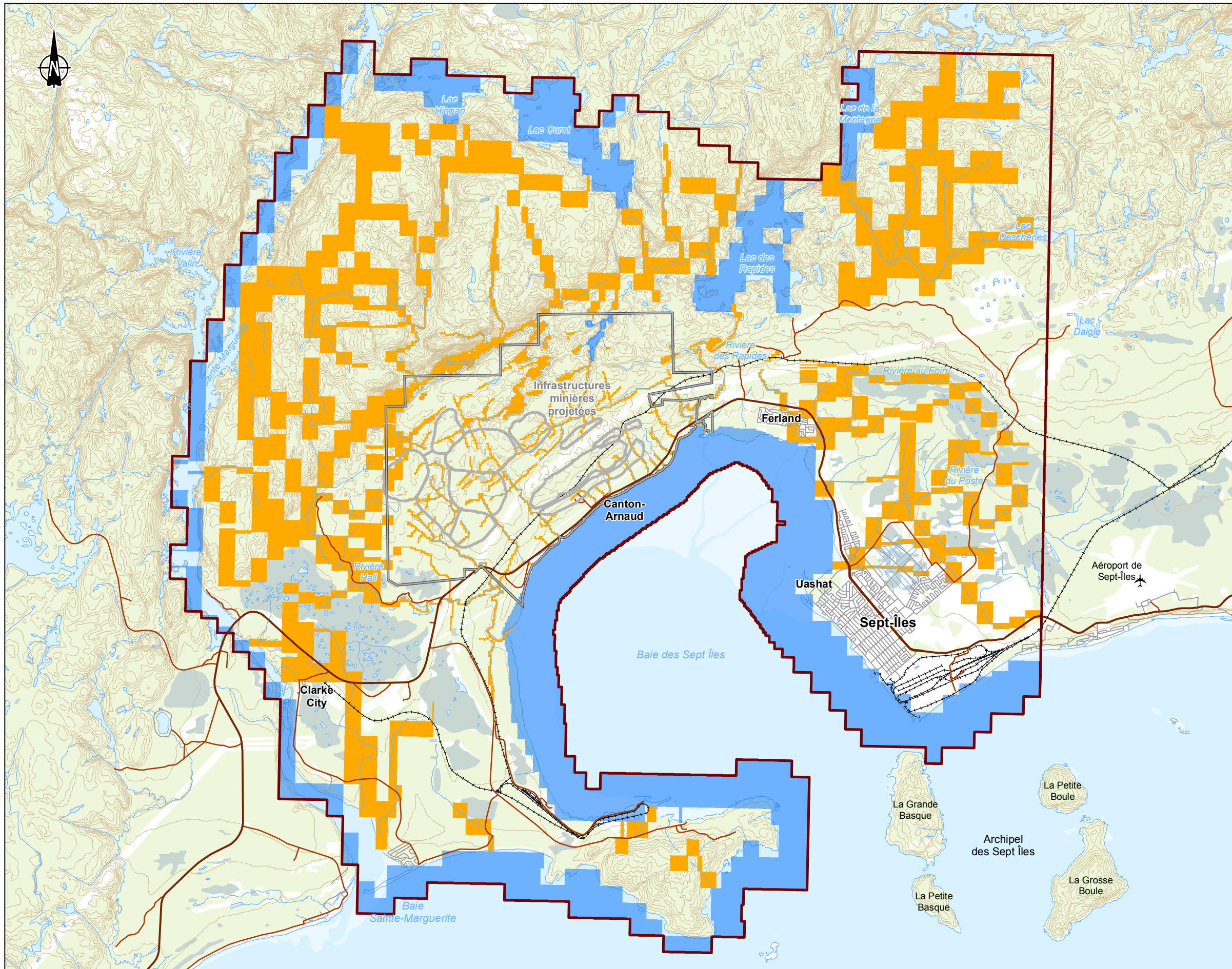
### **5.3 Conditions limites**

Les conditions aux limites du domaine sont présentées à la figure 2. 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.

#### **5.3.1 Type charge constante**

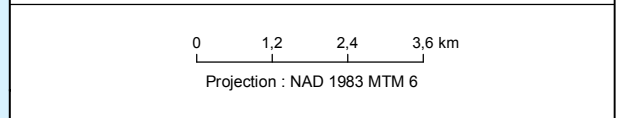
Des conditions limites de type charge constante ont été attribuées aux limites du domaine actif. Des cellules à charge constante ont été assignées à la rivière Sainte-Marguerite située à l'ouest (du nord vers le sud) avec une valeur de charge constante de 60 mASL à partir de la limite nord du modèle vers approximativement





- Modélisation hydrogéologique**
- Limite de la modélisation
  - Limite à charge constante
  - Limite de type drain
- Milieu humain**
- Infrastructure minière projetée (Mine Arnaud)
  - Claim (Mine Arnaud)
  - Route principale
  - Route secondaire
  - Rue
  - Chemin de fer
- Milieu physique**
- Cours d'eau
  - Dépôts fluviaux
  - Courbe de niveau
  - Milieu humide

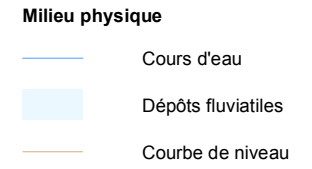
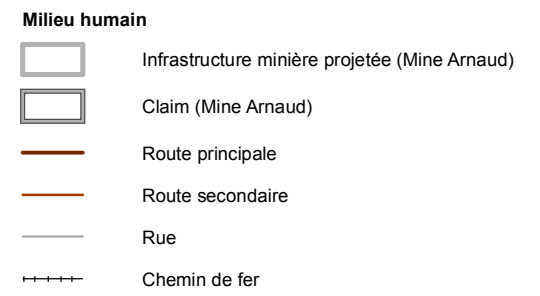
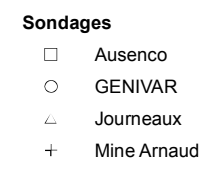
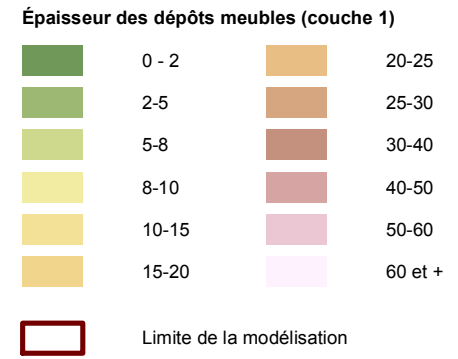
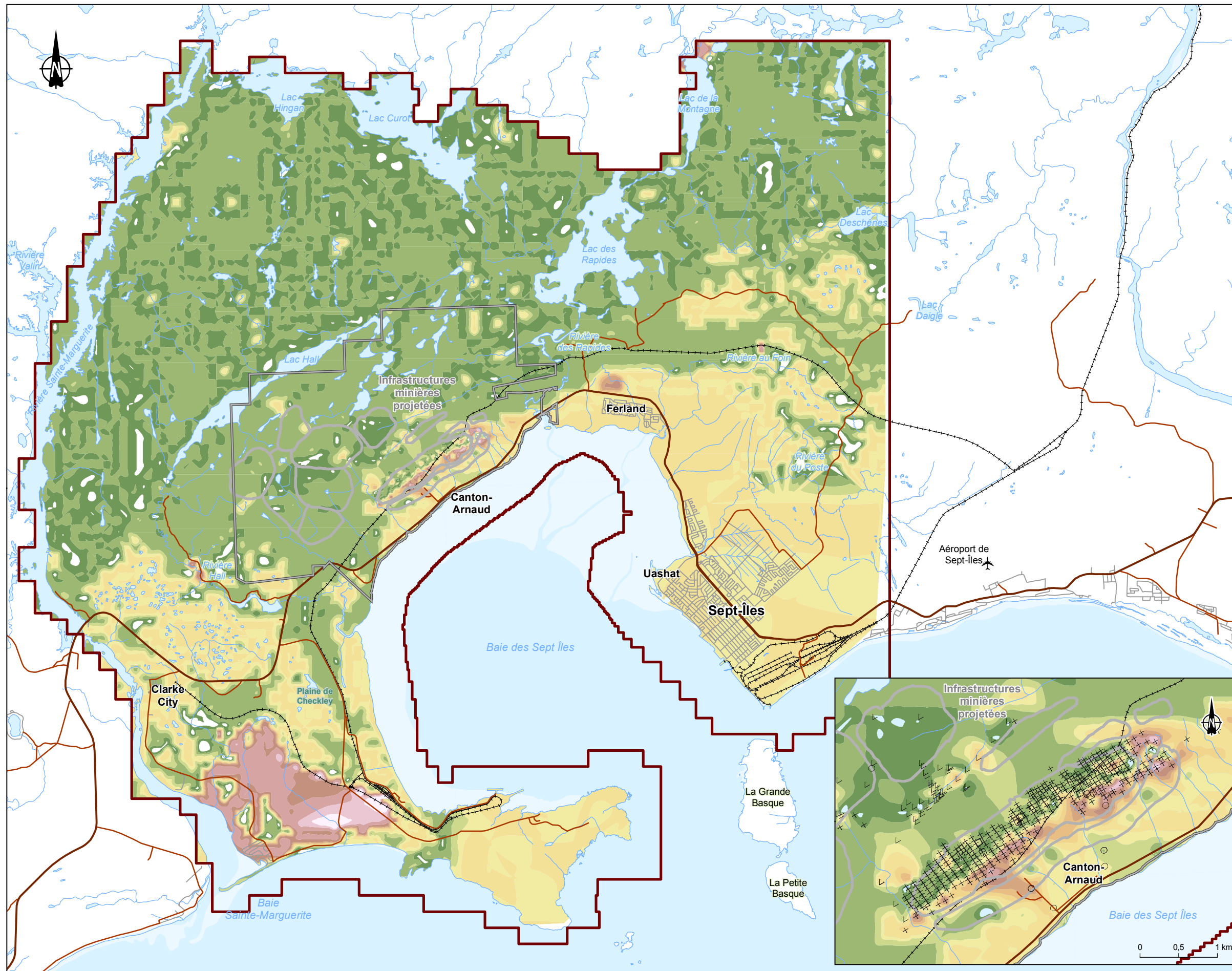
**Figure 2**  
**Étendue du domaine et conditions limites**



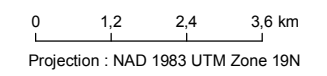
**Sources :**  
 • Base : BNDT, 1:50 000, feuillets 22J01, 22J02, 22J07 et 22J08, RNCAN, 2007  
 • Infrastructures minières : EIE, N/Réf.: 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date	GENIVAR
Préparé par	JMT	2013-09-20	
Vérifié par	DL	2013-09-20	
Approuvé par	AH	2013-09-20	
Fichier GENIVAR		121_17926_RMh2_F2_domaine_130920.mxd	



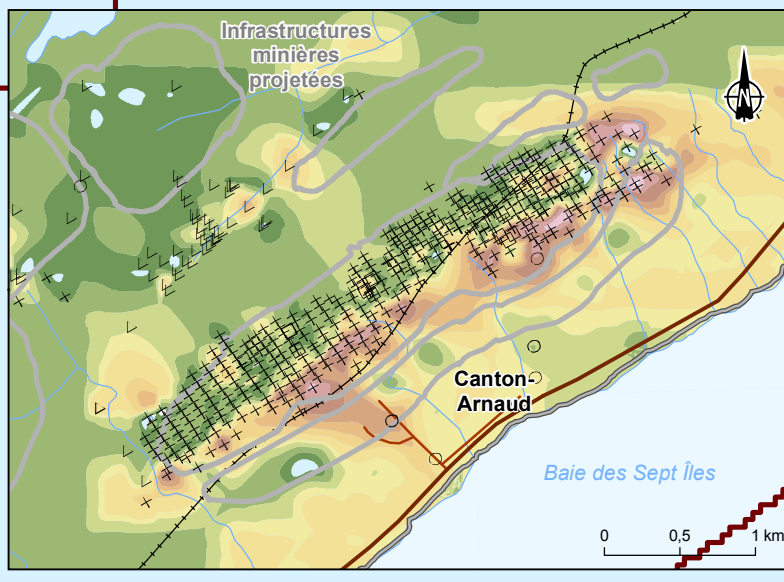


**Figure 3**  
**Épaisseur des dépôts meubles (couche 1)**



**Sources :**  
 • Base : BNDT, 1:50 000, feuillets 22J01, 22J02, 22J07 et 22J08, RNCAN, 2007  
 • Infrastructures minières : EIE, N/Réf.: 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date
Préparé par	JMT	2013-09-20
Vérifié par	DL	2013-09-20
Approuvé par	AH	2013-09-20
Fichier GENIVAR	121_17926_RMh2_F3_depots_130920.mxd	





18 km au sud. Ensuite, la valeur de la charge constante décline pour atteindre 0 mASL à la limite sud-ouest jusqu'à la baie des Sept Îles. Les lacs situés au nord du domaine (lac de la Montagne à 95 mASL, lac Curot à 235 mASL et le lac Hingan à 206 mASL, lac Gamache, lac Pioui et lac Ghyslain 81 mASL, lac Croissant 81 mASL ) se rapportent à des charges constantes correspondant à leur niveau d'eau observé. 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 235 mASL au lac Curot et se terminant à 206 mASL au lac Hingan.

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 5 résume les élévations des différentes conditions limites de type charge constante.

Tableau 5 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 sud	0 m

### 5.3.2 Type cellules drainantes

Les conditions limites de type cellules drainantes 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), ainsi que les cours d'eau de surface près de la 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).

À partir des différentes stations de mesures de débits, 23 zones ont été créées afin de servir de cibles à atteindre pour la calibration des débits simulés. La figure 4 présente la localisation de chacune de ces zones, alors que le tableau 6 présente la valeur des débits mesurés qui est associée à chacune de ces zones.

Tableau 6 Zones et valeurs des débits mesurés

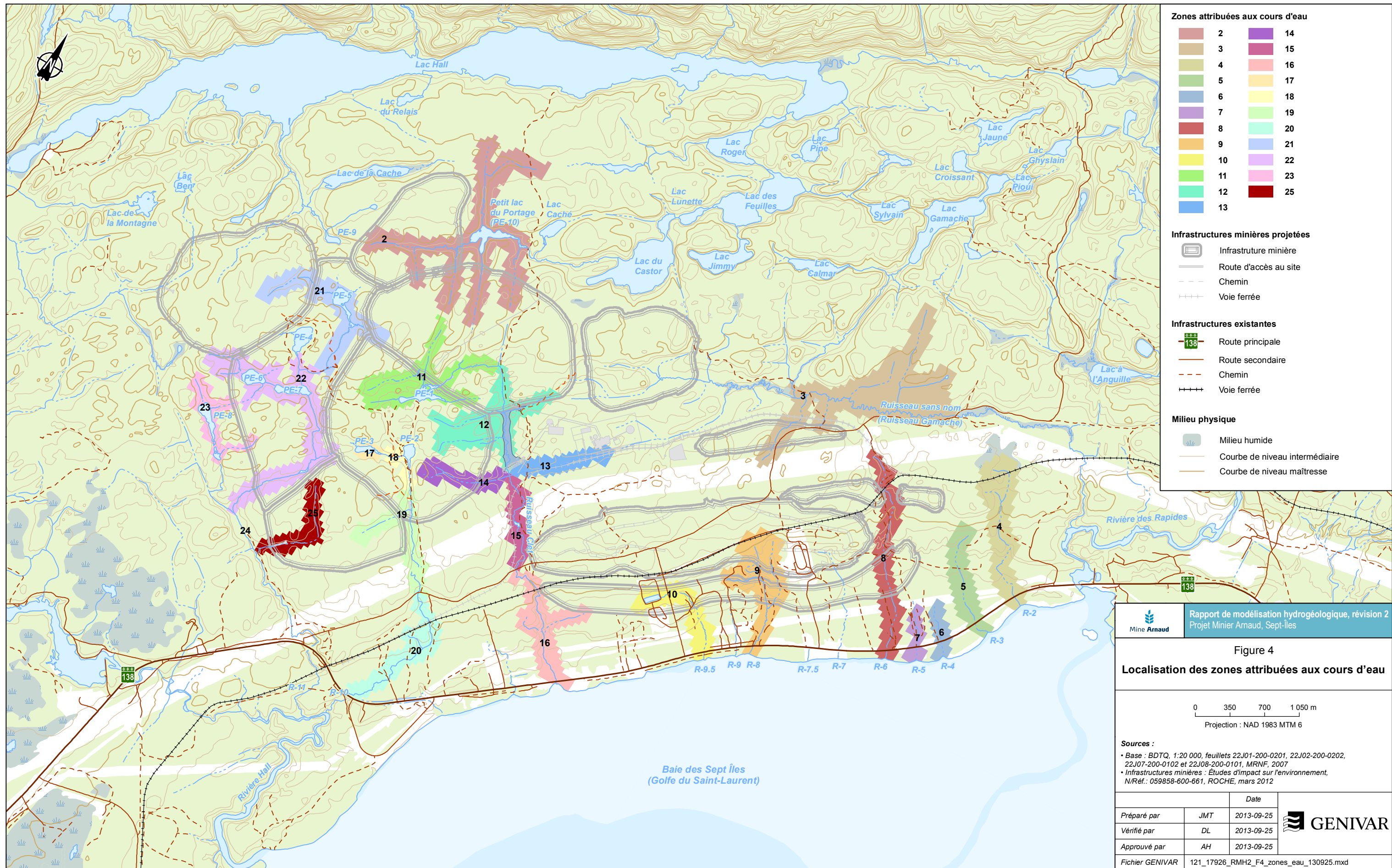
Zone	Zone modèle # (voir figure)	Débit au(x) site(s)	Valeur du débit, L/s	Valeur du débit, m <sup>3</sup> /d
1	2	Site 25	0,4	34,6
2	3	Site 52 – Site 51	4,4	380,26
3	4	Site 72	2,0	172,8
4	5	Site 73	2,0	172,8
5	6	Site 74	0,1	8,6
6	7	Site 75	1,0	86,4
7	8	Site 76	0,5	43,2
8	9	Site 78	4,0	345,6
9	10	Site 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

Les élévations 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.

### 5.3.3 Conditions limites lors des simulations de dénoyage

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. Les différentes interpolations du modèle numérique d'élévation (DEM) des données de design de la fosse (topographie et superficie) après 7, 15 et 23 ans d'exploitation ont été utilisées pour l'attribution d'élévation aux cellules dans le secteur de la fosse.

Les conductances des cellules drainantes ont été attribuées (calculé) 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.



**Zones attribuées aux cours d'eau**

2	14
3	15
4	16
5	17
6	18
7	19
8	20
9	21
10	22
11	23
12	24
13	25

**Infrastructures minières projetées**

- Infrastructure minière
- Route d'accès au site
- Chemin
- Voie ferrée

**Infrastructures existantes**

- Route principale
- Route secondaire
- Chemin
- Voie ferrée

**Milieu physique**

- Milieu humide
- Courbe de niveau intermédiaire
- Courbe de niveau maîtresse

Figure 4  
Localisation des zones attribuées aux cours d'eau

0 350 700 1 050 m  
Projection : NAD 1983 MTM 6

**Sources :**  
 • Base : BDTQ, 1:20 000, feuillets 22J01-200-0201, 22J02-200-0202, 22J07-200-0102 et 22J08-200-0101, MRNF, 2007  
 • Infrastructures minières : Études d'impact sur l'environnement, N/Réf.: 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date	
Préparé par	JMT	2013-09-25	
Vérifié par	DL	2013-09-25	
Approuvé par	AH	2013-09-25	
Fichier GENIVAR	121_17926_RM2_F4_zones_eau_130925.mxd		





## 5.4 Propriétés hydrauliques

Neuf zones de conductivité hydraulique furent attribuées dans ce modèle. Ces zones comprenaient l'unité de till/silt sableux, le silt argileux, le roc fracturé, le roc sain, la couche d'argile sous-jacente à la baie des Sept Îles et au rivage, et les quatre zones de failles au site minier. Les valeurs de conductivité hydraulique de la zone sont montrées à la figure 5a pour la couche n° 1, à la figure 5b pour la couche n° 2, à la figure 5c pour les couches n° 3 à n° 5. Les zones de conductivité hydraulique pour les couches n° 6 à n° 13 sont présentées à la figure 5d. Les valeurs de conductivité hydraulique de chacune des zones sont aussi résumées au tableau 7.

Tableau 7 Attribution des conductivités hydrauliques aux zones de modèle

Unité	Zone du modèle	Couches	Conductivité hydraulique (x,y) (initiale) m/s	Référence
Till/silt sableux	1a	1	2,34E-07	
Dépôt organique épais et autres dépôts	1 b	1	2,34E-07	GENIVAR (2013a et b), Ausenco-Vector (2011) Freeze et Cherry (1979)
Silt argileux	2	1	4,92E-08	
Roc fracturé (30 m d'épaisseur)	4	2	6,50E-07	
Roc sain	9	3-13	1,97E-08	
Argile sous la baie des Sept Îles	3	1	1,00E-08	Freeze et Cherry (1979)
Failles	5	2-5	3,24E-07	Ausenco Vector (2011) GENIVAR (2013b)
	6	2-5	9,54E-07	
	7	2-5	3,36E-07	
	8	2-5	2,92E-06	

La conductivité hydraulique des zones de failles a été attribuée à chacune des cellules de roc des couches 2 à 5. Les paramètres de porosité totale, de porosité effective et d'emmagasinement sont résumés au tableau 8. En régime permanent, les paramètres d'emmagasinement 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.

Tableau 8 Paramètres d'emmagasinement

Couche	Description	Zone	Porosité totale --	Porosité effective --	Emmagasinement 1/m
1-13	Domaine du modèle	1	0,01 <sup>(1)</sup>	0,1 <sup>(1)</sup>	1,2x10 <sup>-6</sup> <sup>(1)</sup>

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

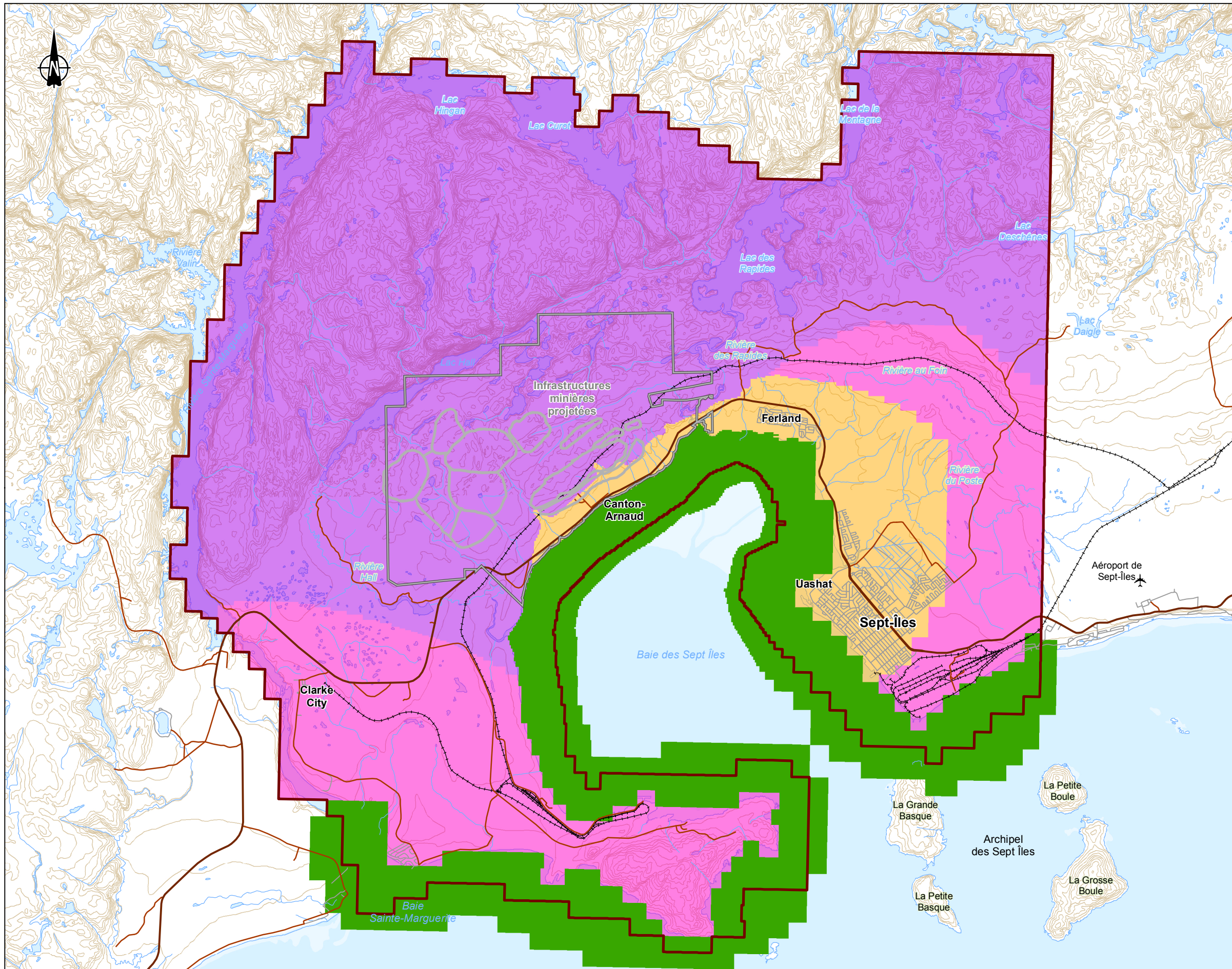
## 5.5 Zones de recharge

Les données de recharge mesurées lors de la calibration de la première modélisation (GENIVAR, 2013c) ont été utilisées comme valeur initiale pour la construction du modèle. Les valeurs de recharge ont été attribuées selon les nouvelles zones de conductivité de la couche 1.

Tableau 9 Valeurs initiales de la recharge

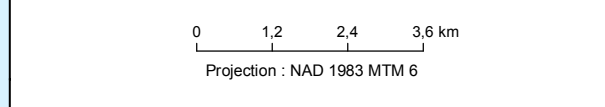
Description	Zone	Recharge initiale
		mm/an
Till / silt sableux	1a	168
Dépôt organique épais et autres dépôts	1 b	168
Silt argileux et secteur de la fosse	1c	110

Lors de la première modélisation, une première estimation de la recharge avait été obtenue à l'aide du logiciel HELP model (US EPA, 1994). Pour ce faire, deux principales zones de recharges avaient été attribuées au domaine actif. La première valeur de recharge était basée sur les calculs d'infiltration, et en assumant qu'il y avait une surface plane et deux couches. La couche supérieure représentait les dépôts superficiels (dépôts meubles), d'une épaisseur de 2 m avec une conductivité hydraulique verticale de  $3,0 \times 10^{-4}$  m/j. Une anisotropie verticale de 1,10 avait été utilisée pour l'horizon de dépôts meubles dans le but de faire une modélisation avec les logiciels HELP et MODFLOW. La couche sous-jacente était constituée d'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. 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 première valeur de recharge obtenue de 178 mm/an avait été attribuée sur l'ensemble du domaine actif, à l'exception des cellules dans le secteur de la mine. Une fois calibrée, la modélisation de mars 2013 avait montré qu'une valeur de 168 mm/an permettait d'obtenir de meilleurs résultats. Pour la deuxième modélisation, la valeur de recharge de 168 mm/an a été attribuée aux zones 1a et 1b.



- Modélisation hydrogéologique**
- Limite de la modélisation
  - Till / silt sableux
  - Dépôt organique épais et autres dépôts
  - Silt argileux
  - Argile sous la baie de Sept-Îles
- Milieu humain**
- Infrastructure minière projetée (Mine Arnaud)
  - Claim (Mine Arnaud)
  - Route principale
  - Route secondaire
  - Rue
  - Chemin de fer
- Milieu physique**
- Cours d'eau
  - Dépôts fluviaux
  - Courbe de niveau

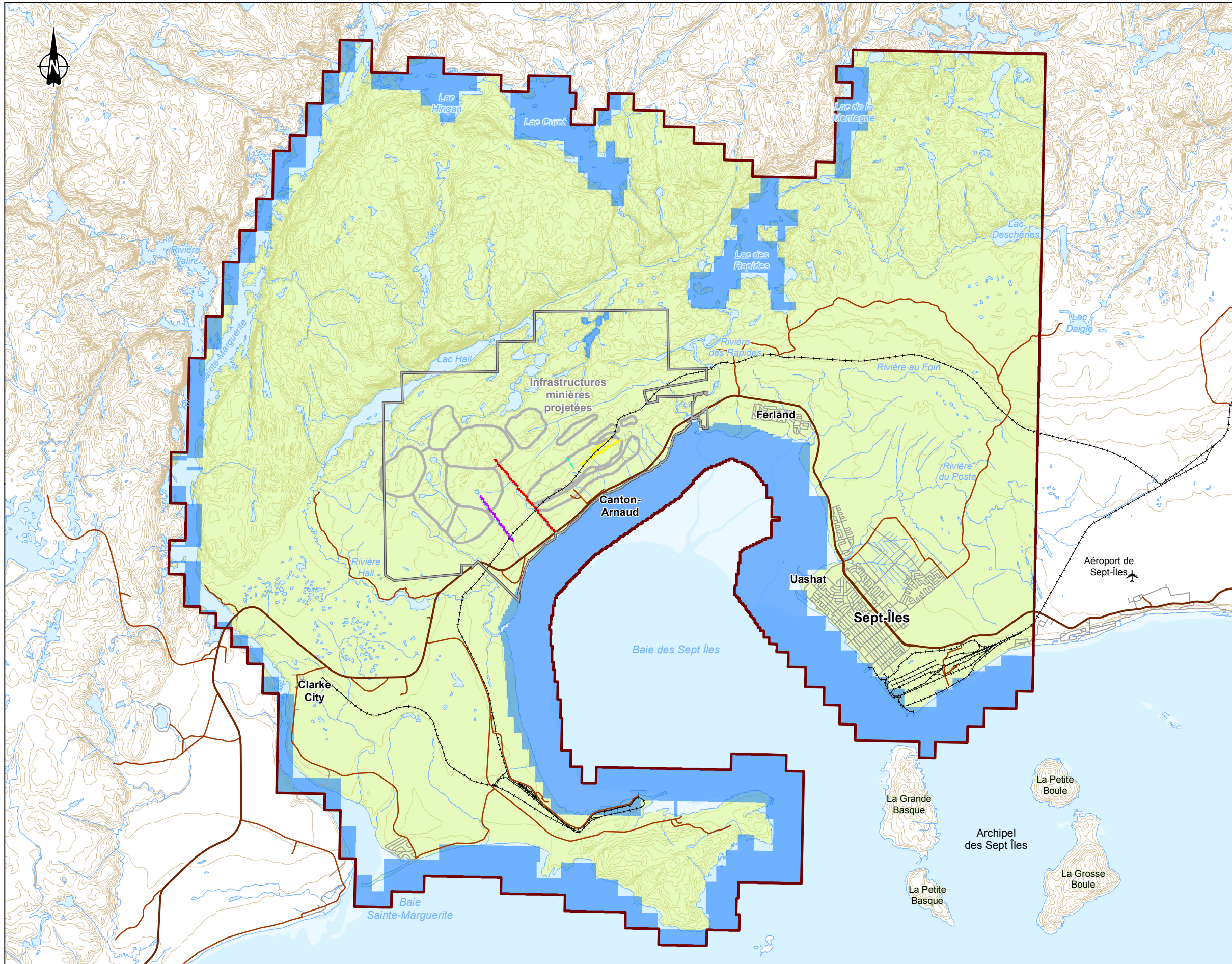
**Figure 5a**  
**Zones de conductivité hydraulique**  
**(zones – couche 1)**



**Sources :**  
 • Base : BNDT, 1:50 000, feuillets 22J01, 22J02, 22J07 et 22J08, RNCAN, 2007  
 • Infrastructures minières : EIE, N/Réf.: 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date	
Préparé par	JMT	2013-09-20	
Vérifié par	DL	2013-09-20	
Approuvé par	AH	2013-09-20	
Fichier GENIVAR		121_17926_RMH2_F5a_cond_hyd1_130920.mxd	



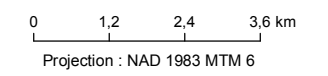


- Modélisation hydrogéologique**
- Limite de la modélisation
  - Limite à charge constante
  - Roc fracturé (30 m d'épaisseur)
  - Faille 1
  - Faille 2
  - Faille 3
  - Faille 4

- Milieu humain**
- Infrastructure minière projetée (Mine Arnaud)
  - Claim (Mine Arnaud)
  - Route principale
  - Route secondaire
  - Rue
  - Chemin de fer

- Milieu physique**
- Cours d'eau
  - Dépôts fluviaux
  - Courbe de niveau

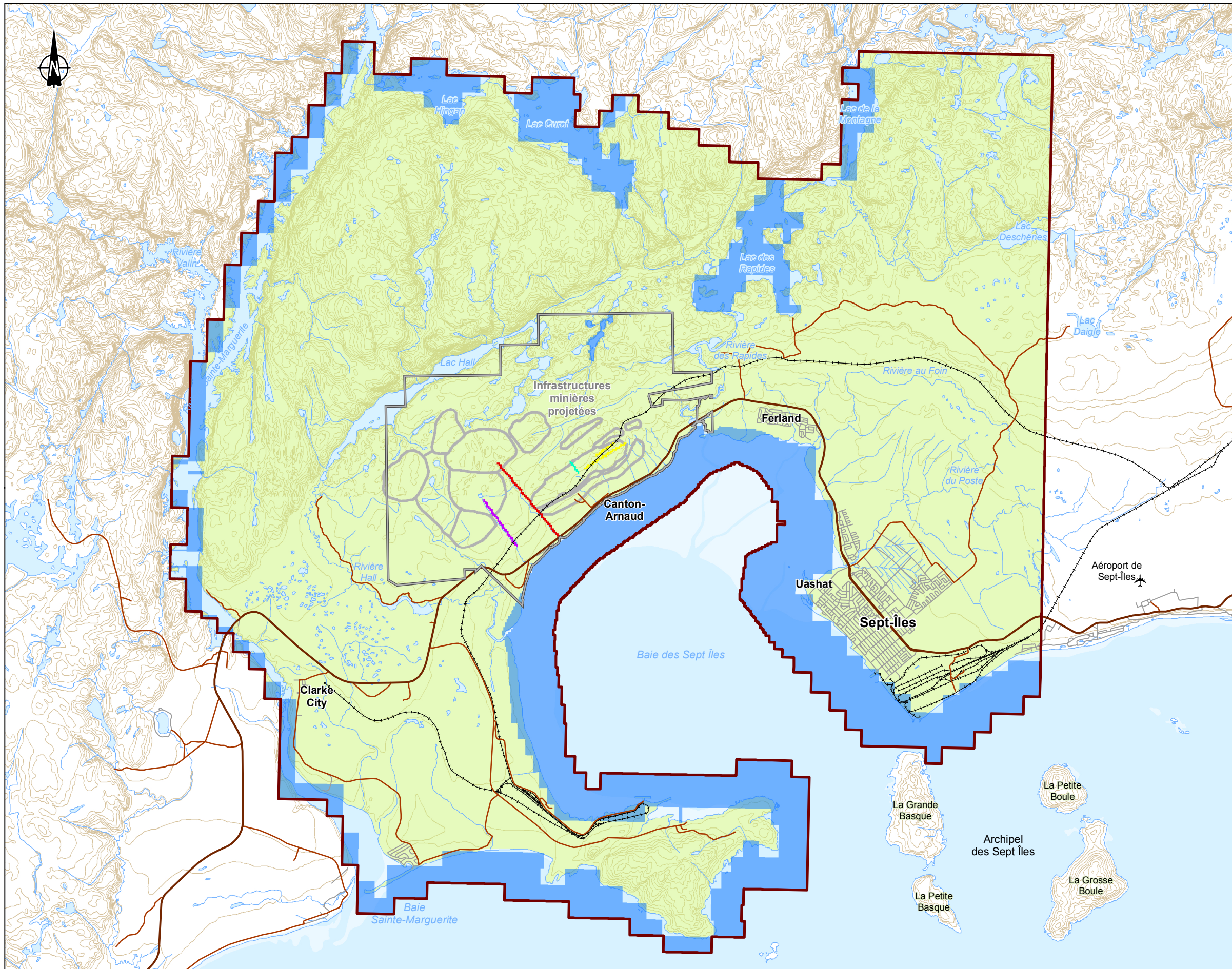
**Figure 5b**  
**Zones de conductivité hydraulique**  
**(zones – couche 2)**



**Sources :**  
 • Base : BNDT, 1:50 000, feuillets 22J01, 22J02, 22J07 et 22J08, RNCAN, 2007  
 • Infrastructures minières : EIE, N/Réf.: 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

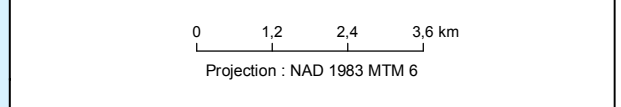
		Date	GENIVAR
Préparé par	JMT	2013-09-20	
Vérifié par	DL	2013-09-20	
Approuvé par	AH	2013-09-20	
Fichier GENIVAR		121_17926_RMH2_F5b_cond_hyd2_130920.mxd	





- Modélisation hydrogéologique**
- Limite de la modélisation
  - Limite à charge constante
  - Roc sain
  - Faille 1
  - Faille 2
  - Faille 3
  - Faille 4
- Milieu humain**
- Infrastructure minière projetée (Mine Arnaud)
  - Claim (Mine Arnaud)
  - Route principale
  - Route secondaire
  - Rue
  - Chemin de fer
- Milieu physique**
- Cours d'eau
  - Dépôts fluviaux
  - Courbe de niveau

**Figure 5c**  
**Zones de conductivité hydraulique**  
**(zones – couches 3-5)**



**Sources :**

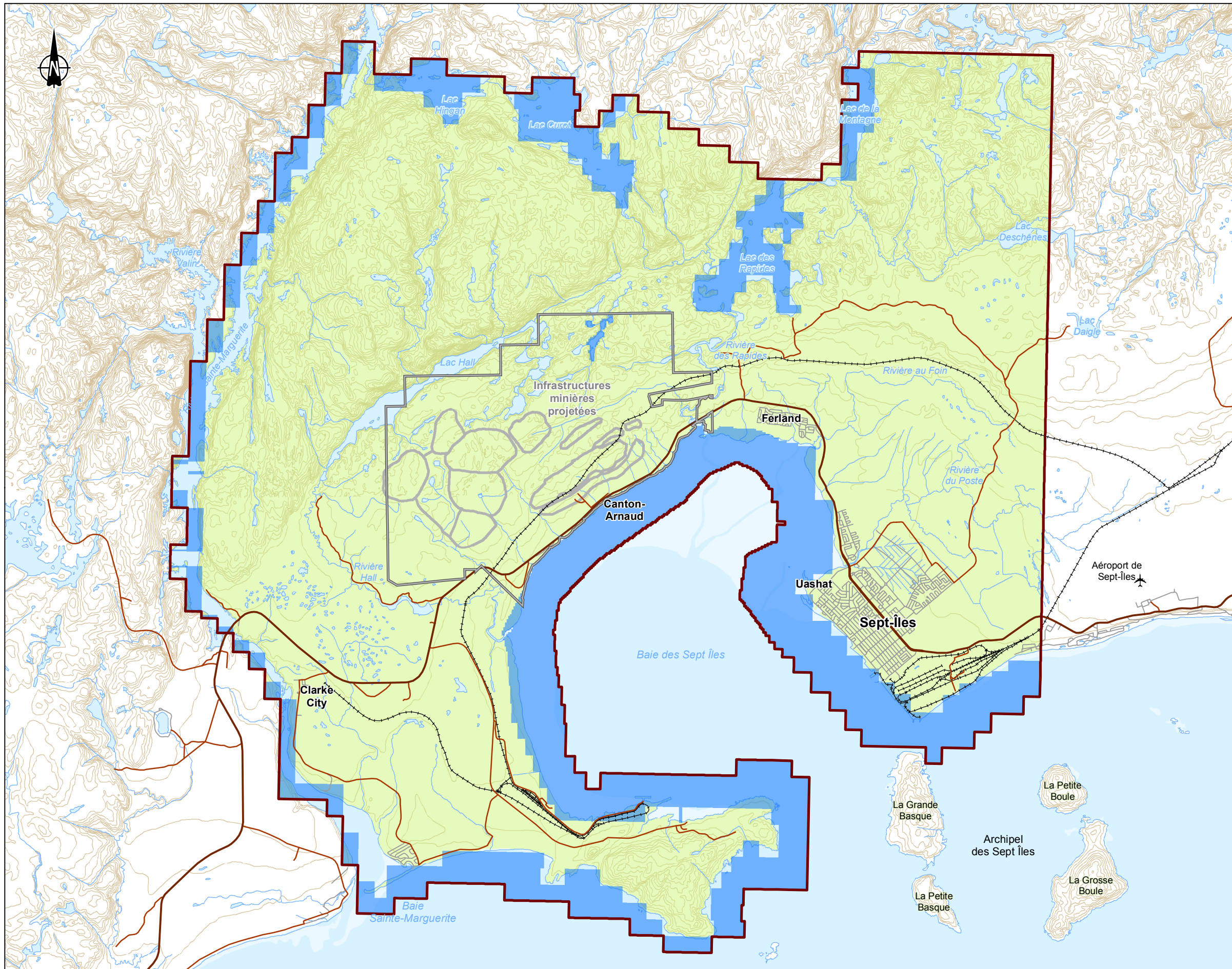
- Base : BNDT, 1:50 000, feuillets 22J01, 22J02, 22J07 et 22J08, RNCAN, 2007
- Infrastructures minières : EIE, N/Réf.: 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date
Préparé par	JMT	2013-09-20
Vérifié par	DL	2013-09-20
Approuvé par	AH	2013-09-20



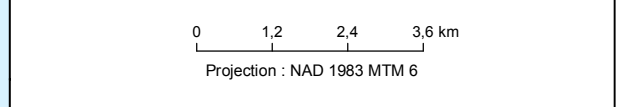






- Modélisation hydrogéologique**
- Limite de la modélisation
  - Limite à charge constante
  - Roc sain
- Milieu humain**
- Infrastructure minière projetée (Mine Arnaud)
  - Claim (Mine Arnaud)
  - Route principale
  - Route secondaire
  - Rue
  - Chemin de fer
- Milieu physique**
- Cours d'eau
  - Dépôts fluviaux
  - Courbe de niveau

**Figure 5d**  
**Zones de conductivité hydraulique**  
**(zones – couches 6-13)**



**Sources :**  
 • Base : BNDT, 1:50 000, feuillets 22J01, 22J02, 22J07 et 22J08, RNCAN, 2007  
 • Infrastructures minières : EIE, N/Réf.: 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date	<b>GENIVAR</b>
Préparé par	JMT	2013-09-20	
Vérifié par	DL	2013-09-20	
Approuvé par	AH	2013-09-20	
Fichier GENIVAR		121_17926_RMH2_F5d_cond_hyd6_13_130920.mxd	



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. Une fois calibrée, la modélisation de mars 2013 avait montré qu'une valeur de 110 mm/an permettait d'obtenir de meilleurs résultats. Pour la deuxième modélisation, la valeur de recharge de 110 mm/an a été attribuée à la zone 2.

#### 5.5.1 Recharge lors des simulations de dénoyage

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 (1 156 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.



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

---

### **6.1 Objectifs de calibration**

L'objectif de la calibration du modèle d'écoulement est de développer une approximation acceptable des niveaux d'eaux souterraine observés et des débits mesurés d'un cours d'eau. Aux fins de ce modèle, même si une fluctuation naturelle des élévations de l'eau souterraine se produit en raison des conditions climatiques saisonnières, les conditions de l'eau souterraine observées et induites sont considérées comme étant statiques. Par conséquent, la calibration du modèle se fait en établissant une moyenne des élévations de l'eau souterraine et en estimant une moyenne du débit de base des cours d'eau.

Puisque les données des débits de cours d'eau disponibles correspondent à une courte période de mesure (entre le 19 et le 22 juin 2012), ils pourraient être non représentatifs des débits de base moyen à long terme. Pour cette raison, la calibration des élévations piézométriques a été priorisée. Les objectifs de calibration visent donc, en premier lieu, une calibration acceptable des élévations d'eau souterraine et, en deuxième lieu, la meilleure représentation possible des débits mesurés.

### **6.2 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 recharge furent les paramètres principaux du modèle modifiés pendant le processus de calibration.

Une comparaison des élévations simulées de l'eau souterraine a été effectuée avec les élévations mesurées disponibles pour l'eau souterraine. 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 moyens mesurés à l'endroit de 23 stations a été réalisée pour les débits disponibles entre le 19 et le 22 juin 2012. Les valeurs de débit des cours d'eau mesurées à partir de juin 2012 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 %.

### 6.3 Résultats de la calibration

#### 6.3.1 Charges hydrauliques

Les élévations piézométriques simulées et observées de l'eau souterraine sont comparées pour évaluer la calibration du modèle. Les statistiques de calibration obtenues pour ce paramètre sont présentées au tableau 10.

Tableau 10 Statistiques de calibration (charges hydrauliques)

Mesure statistique	Unité	Résultat du modèle calibré
Résiduel maximum	m	24,1
Résiduel minimum	m	-10,7
Écart type des résiduels	m	10,3
Moyenne absolue des résidus	m	7,4
Racine de l'erreur quadratique moyenne	m	10,3
Racine de l'erreur quadratique moyenne à l'échelle (Scaled RMS)	%	10,5

Les statistiques de calibration présentées au tableau 10 montrent que le modèle, lequel se trouve à l'intérieur de la plage de NRMS acceptée par l'industrie, est bien calibré.

Le graphique à la page suivante présente les résultats de la calibration des charges hydrauliques. La plupart des points montrent une calibration satisfaisante.

Trois points se situent à l'extérieur des objectifs de calibration, il s'agit des puits 1166-13-190, 1166-13-191 et PW2. Ces trois puits se situent dans le même secteur et présentent, dans certains cas, des conditions artésiennes. Les charges élevées indiquent des conditions captives et il est possible que le système de fractures intercepté dans ce secteur présente une faible connectivité avec le reste du système. Les résultats pour chacun des puits sont présentés au tableau 11. Les charges hydrauliques simulées en régime permanent pour le secteur de la fosse sont montrées à la figure 6.

Tableau 11 Calibration des charges hydrauliques

Puits	Couche	Charges hydrauliques (m)		
		Observée	Simulée	Différence
1166-13-190	3	81,00	61,49	19,51
1166-13-191	4	79,00	55,71	23,29
1166-13-195	3	57,04	56,69	0,35
OW1	2	34,00	31,54	2,46
OW2	6	39,00	36,42	2,58
PO-1R	2	23,18	26,02	-2,84
PO-1S	1	26,47	26,04	0,44
PO-2R	2	7,50	14,07	-6,58
PO-2S	1	7,76	13,82	-6,07
PO-3R	2	6,53	9,86	-3,33
PO-4R	2	97,91	88,03	9,88
PO-5R	2	86,78	97,51	-10,72
PO-5S	2	86,88	97,48	-10,60
PO-6R	2	96,41	97,06	-0,65
PO-7R	2	102,90	103,39	-0,49
PO-8R	2	83,44	84,68	-1,24
PO-9R	1	70,54	80,94	-10,40
PO-9S	1	70,17	80,58	-10,41
PO-10R	1	5,19	13,14	-7,95
PW1	2	32,61	31,51	1,10
PW2	3	81,14	57,06	24,08

### 6.3.2 Débits d'eau de surface

Le logiciel ZoneBudget a été utilisé pour établir les débits de base aux 23 points d'eau de surface instrumentés, tel que présenté au tableau 12. Les valeurs présentées indiquent que le modèle calibré n'a pas toujours reproduit de façon satisfaisante les débits d'eau mesurés. Afin d'obtenir une meilleure calibration, il serait nécessaire d'obtenir des valeurs de débits sur une plus longue période afin d'avoir des valeurs plus représentatives et également d'évaluer les débits de base réels. Par contre, considérant les informations disponibles, la calibration obtenue est tout de même satisfaisante.

Figure 6 Élévations piézométriques simulées en régime permanent

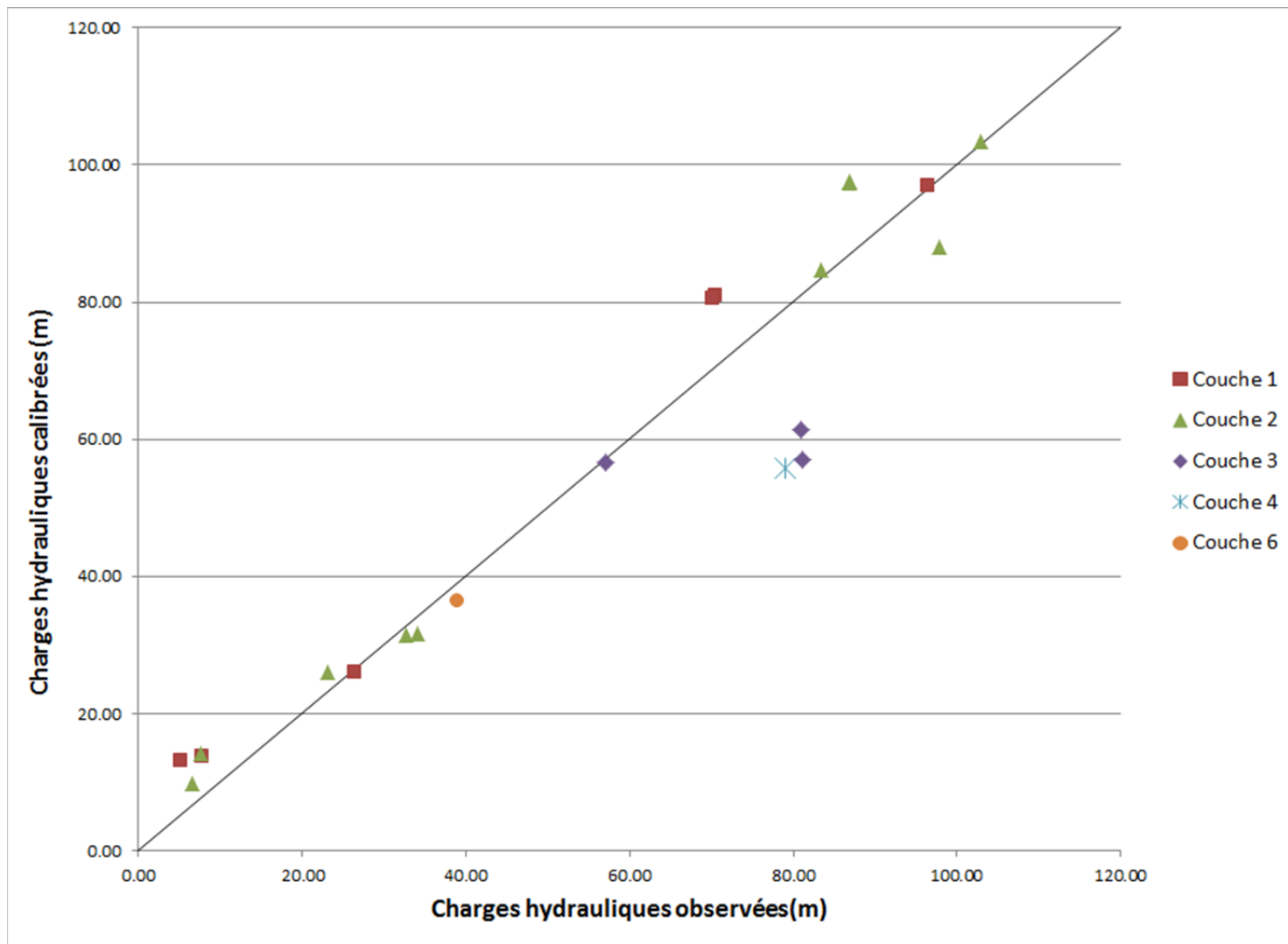




Tableau 12 Débits d'eau de surface mesurés comparativement aux débits simulés

ZONE	Zone modèle (#)	Valeurs des débits mesurés (m <sup>3</sup> /j)	Valeurs des débits simulés (m <sup>3</sup> /j)	Différence (m <sup>3</sup> /j)
1	2	34,6	59,3	24,7
2	3	380,26	370,7	-9,5
3	4	172,8	159,5	-13,3
4	5	172,8	233,7	60,9
5	6	8,6	15,5	6,9
6	7	86,4	11,7	-74,7
7	8	43,2	117,1	73,9
8	9	345,6	106,1	-239,5
9	10	259,2	153,7	-105,5
10	11	17,3	81,9	64,6
11	12	181,4	430,5	249,1
12	13	155,5	117,7	-37,8
13	14	17,38	39,6	22,2
14	15	181,4	102,7	-78,7
15	16	492,58	114,4	-378,2
16	17	8,6	20,8	12,2
17	18	17,38	13,4	-4,0
18	19	60,5	19,6	-40,9
19	20	354,2	180,5	-173,7
20	21	43,2	138,5	95,3
21	22	95	148,7	53,7
22	23	60,5	130,8	70,3
23	25	34,6	21,6	-13,0

### 6.3.3 Bilan hydrique

Le tableau 13 présente le bilan hydrique pour le modèle calibré d'écoulement de l'eau souterraine en régime permanent. L'écart indiqué au tableau 13 indique que le bilan de masse est équilibré dans le modèle calibré. L'erreur de 0,05 % du bilan hydrique indique une calibration acceptable.

Tableau 13 Bilan hydrique

Flux entrant (m <sup>3</sup> /j)		Flux sortant (m <sup>3</sup> /j)	
Charge constante	2 737	Charge constante	52 393
Recharge	116 379	Drainages	66 788
<b>FLUX ENTRANT TOTAL</b>	<b>119 116</b>	<b>FLUX SORTANT TOTAL</b>	<b>119 180</b>
		Flux sortant – Flux entrant	64
			0,05 %

## 6.4 Conditions finales du modèle calibré

Les tableaux 14 et 15 présentent les résultats finaux du modèle calibré. Des valeurs nulles de recharge ont dû être assignées à tout un secteur situé à l'ouest afin d'atteindre un niveau de calibration des bilans d'eau adéquat. La difficulté de calibration dans les secteurs éloignés du site est liée au manque de données disponibles. Les efforts de calibration ont été concentrés dans le secteur des installations, secteur où les données étaient disponibles en plus grand nombre. L'incertitude quant aux résultats obtenus augmente donc en s'éloignant du site. La grande étendue de la zone modélisée combinée au manque de données dans certains secteurs contribuent à augmenter les problèmes de calibration. Les résultats obtenus constituent donc la meilleure approximation possible avec les données disponibles. La figure 7 illustre la localisation des zones de recharge après calibration.

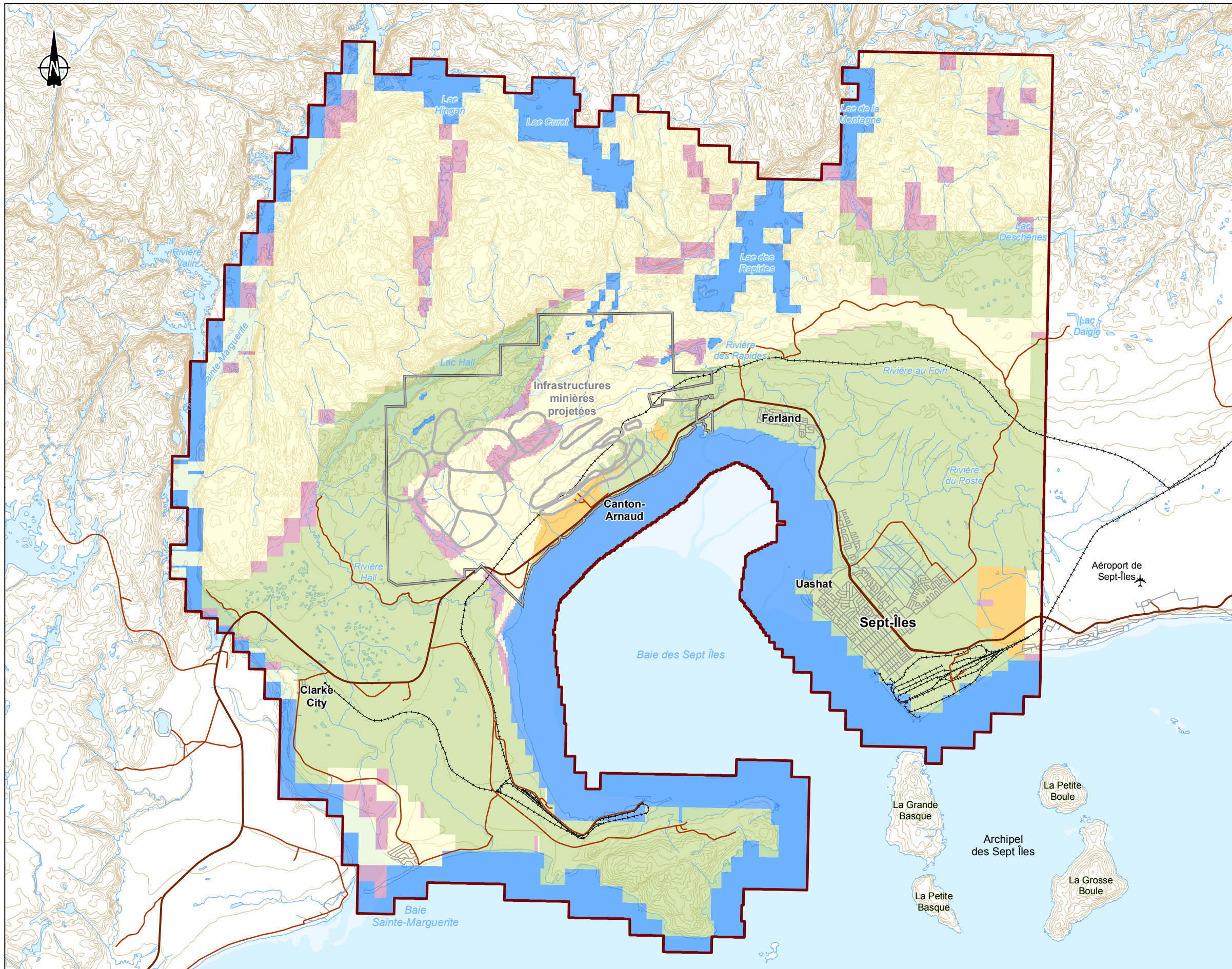
Tableau 14 Résultats de calibration pour la recharge

Description	Recharge calibrée (mm/an)
Recharge : unité de till/silt (dépôts minces)	128 <sup>(1)</sup>
Recharge : unité de dépôts organiques épais et autres secteurs ciblés	0
Recharge : Dépôts de silt argileux au site minier et dans le secteur est de la mine	4 <sup>(2)</sup>
Au site minier durant l'exploitation (fosse)	956

<sup>(1)</sup> 0,00035 m/j

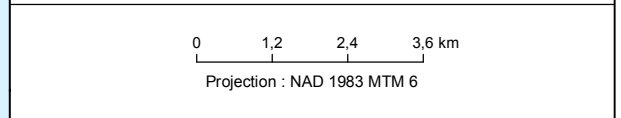
<sup>(2)</sup>  $1 \times 10^{-5}$  m/j

Les conductivités hydrauliques calibrées sont présentées au tableau 15. Celles-ci se trouvent généralement dans la plage de conductivités hydrauliques mesurées pour chacune des unités hydrostratigraphiques. Seule la zone 2 présente une conductivité hydraulique calibrée supérieure à la plage mesurée. De plus, afin d'améliorer la calibration du modèle, l'unité du roc sain a été subdivisée en deux unités, soit une zone de transition plus perméable sous le roc fracturé et le roc sain en profondeur (moins perméable).



- Modélisation hydrogéologique**
- Limite de la modélisation
  - Limite à charge constante
  - Zone 1: 0.00035 m/d
  - Zone 2: 1e-005 m/d
  - Zone 3: 0 m/d
  - Zone 5: 0 m/d
- Milieu humain**
- Infrastructure minière projetée (Mine Arnaud)
  - Claim (Mine Arnaud)
  - Route principale
  - Route secondaire
  - Rue
  - Chemin de fer
- Milieu physique**
- Cours d'eau
  - Dépôts fluviaux
  - Courbe de niveau

**Figure 7**  
**Zones de recharge calibrées**



**Sources :**  
 • Base : BNDT, 1:50 000, feuillets 22J01, 22J02, 22J07 et 22J08, RNCAN, 2007  
 • Infrastructures minières : EIE, N/Réf.: 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date
Préparé par	JMT	2013-09-23
Vérifié par	DL	2013-09-23
Approuvé par	AH	2013-09-23
Fichier GENIVAR	121_17926_RMH2_F7_recharge_130923.mxd	





Tableau 15 Conductivités hydrauliques obtenues suite à la calibration

Couches	Description	Zone du modèle	Conductivité hydraulique initiale (m/s)	Conductivité hydraulique calibrée (m/s)	Anisotropie verticale
1	Till/Silt sableux et dépôts organiques	1a et 1 b	2,34E-07	2,34E-07	1:1
1	Silt argileux	2	4,92E-08	1,16E-07	1:10
2	Roc fracturé	4	6,50E-07	5,2E-06	1:1
3-6	Roc sain (transition)	9	1,97E-08	2,7E-07	1:1
7-13	Roc sain profond	11		5,7E-08	
2-5	Zones de failles	5	3,24E-07	2,92E-06	1:1
		6	9,54E-07	9,50E-07	1:1
		7	3,36E-07	3,36E-07	1:1
		8	2,92E-06	2,92E-06	1:1
1	Argile dans la baie des Sept Îles	3	1E-08	1E-08	1:10

## 6.5 Sensibilité des paramètres

Afin de vérifier la sensibilité des paramètres sur les résultats de calibration et de simulation, une analyse de sensibilité a été effectuée selon la méthode de Hill and Tiedeman (Effective Groundwater Model Calibration 2007). Cette méthode utilise une approche statistique recommandée par l'USGS. Il a été noté lors des travaux de calibration que les paramètres influençant le plus les résultats étaient les conductivités hydrauliques des différentes unités hydrostratigraphiques. L'étude de sensibilité a donc été effectuée sur ces paramètres.

Pour chacune des zones (voir tableau 16), les conductivités hydrauliques ont été modifiées de la façon suivante :

- +/- 0.5 ordre de magnitude.
- +/- 1 ordre magnitude.

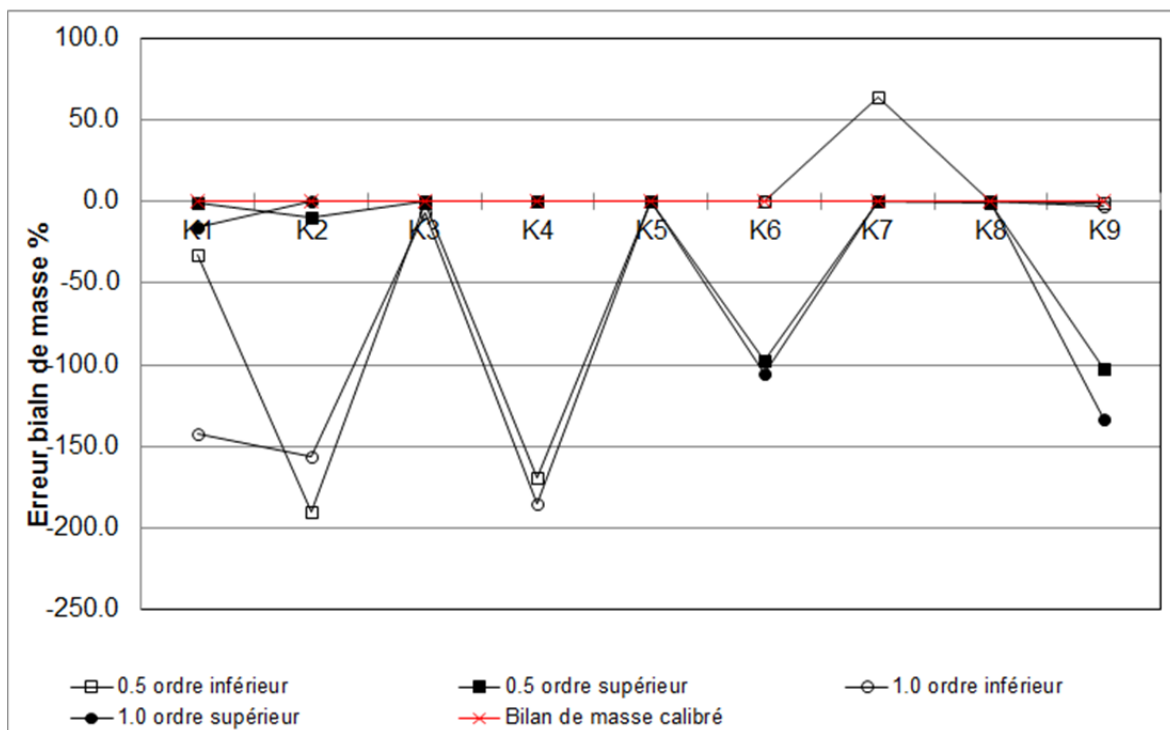
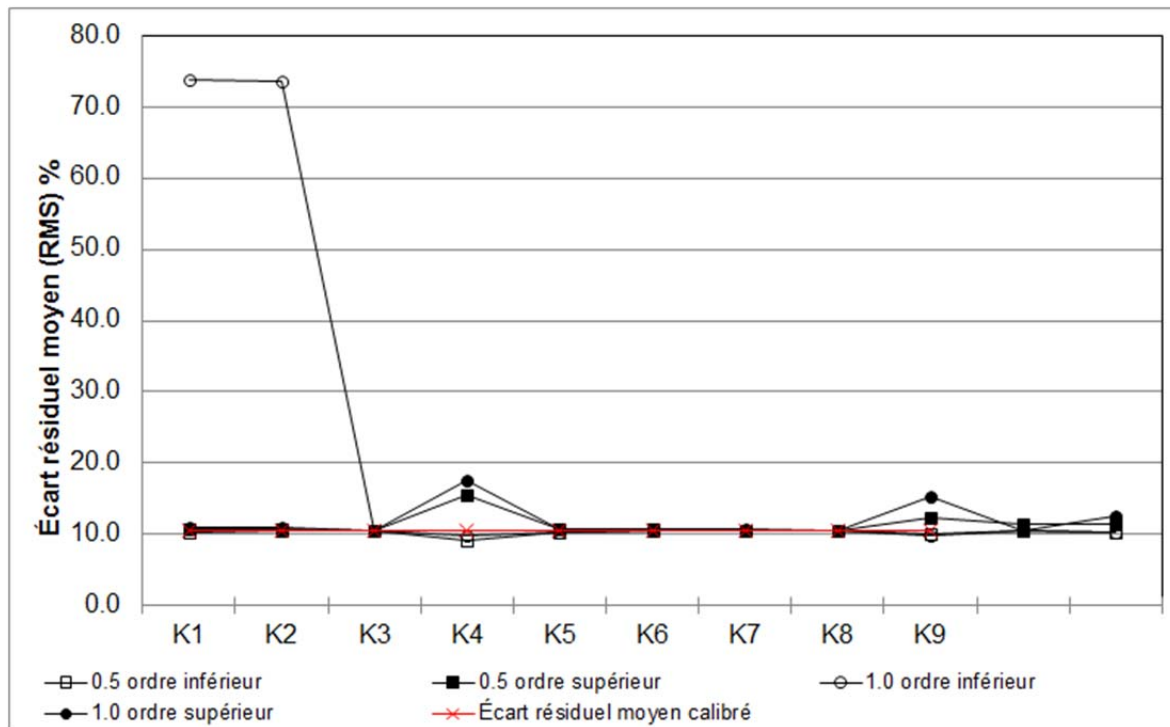
Le bilan de masse ainsi que les écarts résiduels moyens ont été réévalués à la fin de chacune des simulations pour vérifier l'influence sur les résultats.

Tableau 16 Liste des zones de conductivités hydrauliques

Description	Zone du modèle	Conductivité hydraulique initiale (m/j)
Till/Silt sableux et dépôts organiques	1	0,0202
Sil argileux	2	0,01
Roc altéré/fracturé	4	0,45
Roc sain/transition	9	0,023
Roc sain	11	0,005
Zones de failles	5	0,028
	6	0,0821
	7	0,02904
	8	0,25224
Argile dans la baie des Sept Îles	3	$8,64 \times 10^{-4}$

Le modèle semble plus sensible aux changements de conductivités hydrauliques dans la zone 1 (till/silt sableux), la zone 2 (silt argileux), la zone 4 (Roc altéré/fracturé), la zone 9 (transition entre le roc altéré et le roc sain) et la zone 11 (roc sain). Dans certains cas, les changements d'un ordre de magnitude provoquent des erreurs de bilans de masse ou une diminution significative de la qualité de reproduction des résultats. Les changements des conductivités hydrauliques des zones de failles n'affectent pas significativement la calibration du modèle, par contre cela influence les valeurs de débits simulés dans les cours d'eau.

Les sommaires des résultats obtenus sont présentés sous forme de graphiques (voir page suivante).







## 7. 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 minimale de -150 mASL, 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. Les débits de dénoyage ont été évalués après 7 ans et 15 ans d'exploitation en considérant l'assèchement complet de la fosse à une élévation de 0 mASL et de -40 m ASL respectivement. 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.

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.

### 7.1 Modification de la piézométrie régionale

Les élévations piézométriques pour l'aquifère de roc dans des conditions complètes d'excavation lors du dénoyage sont montrées à la figure 8. Les rabattements simulés lors du dénoyage sont présentés à la figure 9. En condition d'excavation complète, la surface piézométrique régionale ne changera pas significativement sauf à proximité de la fosse. Le rabattement augmente de façon significative près de la fosse, et ce, en raison de l'assèchement puisque l'élévation de l'eau souterraine est à son plus bas au fond de la fosse. Les élévations de l'eau souterraine augmentent graduellement en s'éloignant de la fosse et atteignent des conditions statiques lorsque les effets de l'excavation et du dénoyage diminuent. La figure 9 montre que la courbe de rabattement de 1 m s'étendra jusqu'à la baie des Sept Îles ainsi qu'au sud du ruisseau Gamache.

Les zones à l'intérieur de la courbe de niveau de 1 m de rabattement pourraient avoir des élévations d'eau souterraine plus basses. Par contre, puisque les fluctuations saisonnières normales des aquifères sont généralement au-dessus de 1 m, aucun impact n'est attendu dans les zones correspondant à un rabattement de 1 m. La courbe de rabattement de 1 m n'atteint pas les lacs situés au nord-ouest de site minier. Considérant ces résultats, aucun impact causé par le rabattement n'est attendu pour ces lacs. Les résultats de la simulation numérique en régime permanent indiquent que la courbe de rabattement de 1 m s'étend à environ 1,2 km au nord-ouest et jusqu'à la baie des Sept Iles. Dans l'axe nord-est – sud-ouest, le rabattement de 1 m s'étend à environ 1,5 km de part et d'autre de la fosse.

## 7.2 Débits de dénoyage

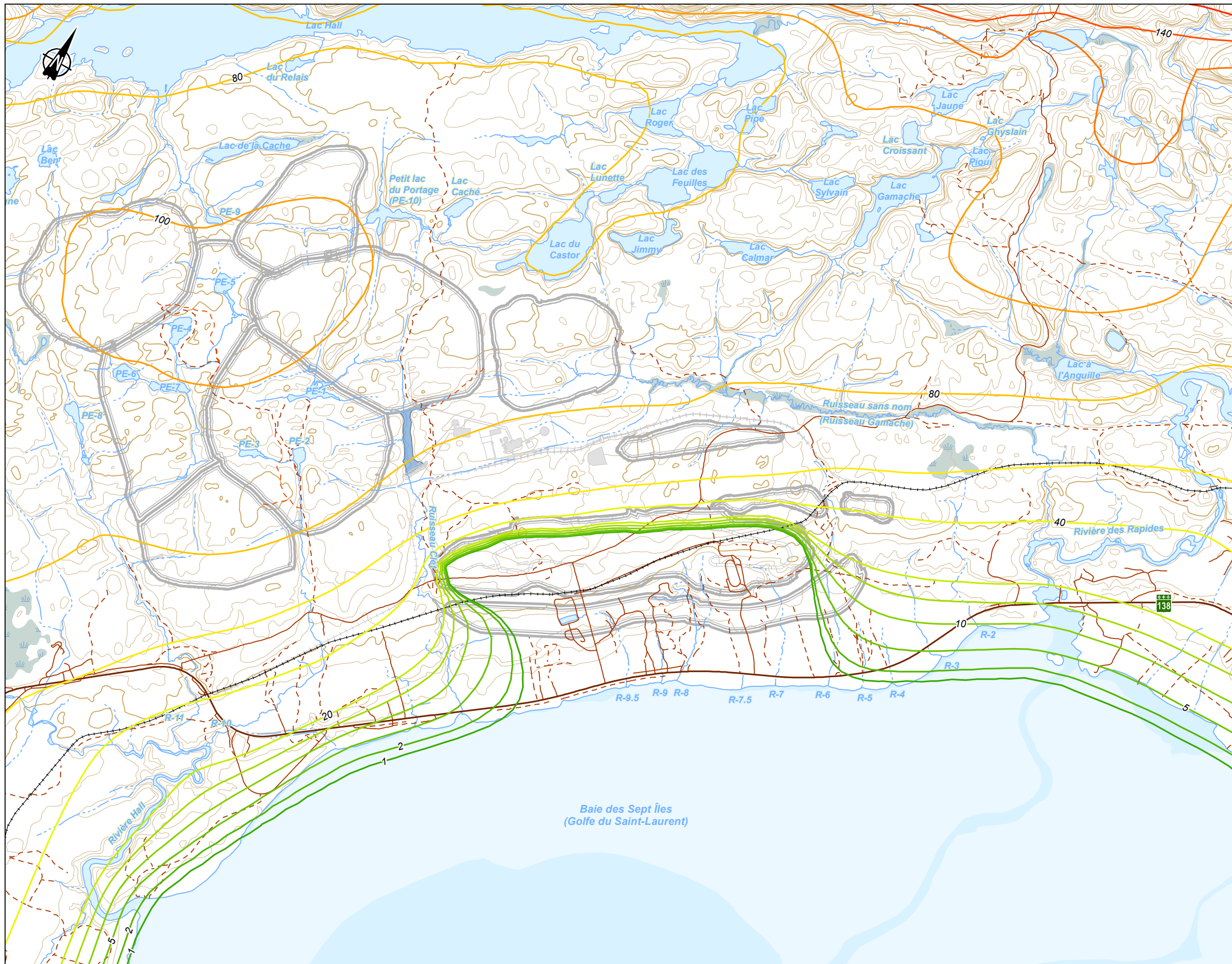
Le bilan de masse du logiciel Zone budget montre que la quantité d'eau pompée à l'intérieur de la fosse est d'environ 9 370 m<sup>3</sup>/j à la toute fin de l'exploitation. Dans le modèle, la recharge au-dessus de la fosse elle-même compte pour 58,8 % de l'eau pompée. L'apport provenant des eaux souterraines correspond donc à 41,2 % de l'eau pompée.

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. La quantité d'eau pompée est évaluée à environ 4 572 m<sup>3</sup>/jour après 7 ans d'exploitation. La quantité d'eau pompée à 15 ans d'exploitation est évaluée à 8 621 m<sup>3</sup>/jour.

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 dans certains secteurs. Le tableau 17 présente le sommaire des résultats obtenus pour les périodes d'exploitation 7, 15 et 23 ans.

Tableau 17 Sommaire des débits de dénoyage anticipés à chacune des périodes

<b><u>7 ans d'exploitation</u></b>	
Débit de dénoyage anticipé, m <sup>3</sup> /jour	4 125
Eau pompée provenant de la recharge au-dessus de la fosse (%)	72,10
Apport des eaux souterraines (%)	27,90
<b><u>15 ans d'exploitation</u></b>	
Débit de dénoyage anticipé, m <sup>3</sup> /jour	8 621
Eau pompée provenant de la recharge au-dessus de la fosse (%)	63,22
Apport des eaux souterraines (%)	36,78
<b><u>À la fin de l'exploitation</u></b>	
Débit de dénoyage anticipé, m <sup>3</sup> /jour	9 370
Eau pompée provenant de la recharge au-dessus de la fosse (%)	58,78
Apport des eaux souterraines (%)	41,22



**Modélisation hydrogéologique**

▭ Limite de la modélisation

**Piezométrie simulée lors du dénoyage final (23 ans)**

— 1 mASL	— 60 mASL
— 2 mASL	— 80 mASL
— 5 mASL	— 100mASL
— 10 mASL	— 120 mASL
— 15 mASL	— 140 mASL
— 20 mASL	— 160 mASL
— 40 mASL	

**Milieu humain**

▭ Infrastructure minière projetée (Mine Arnaud)

▭ Claim (Mine Arnaud)

— Route principale

— Route secondaire

— Rue

— Chemin de fer

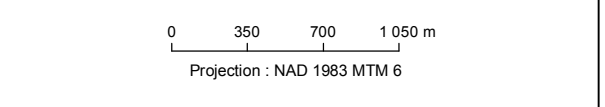
**Milieu physique**

— Cours d'eau

— Dépôts fluviaux

— Courbe de niveau

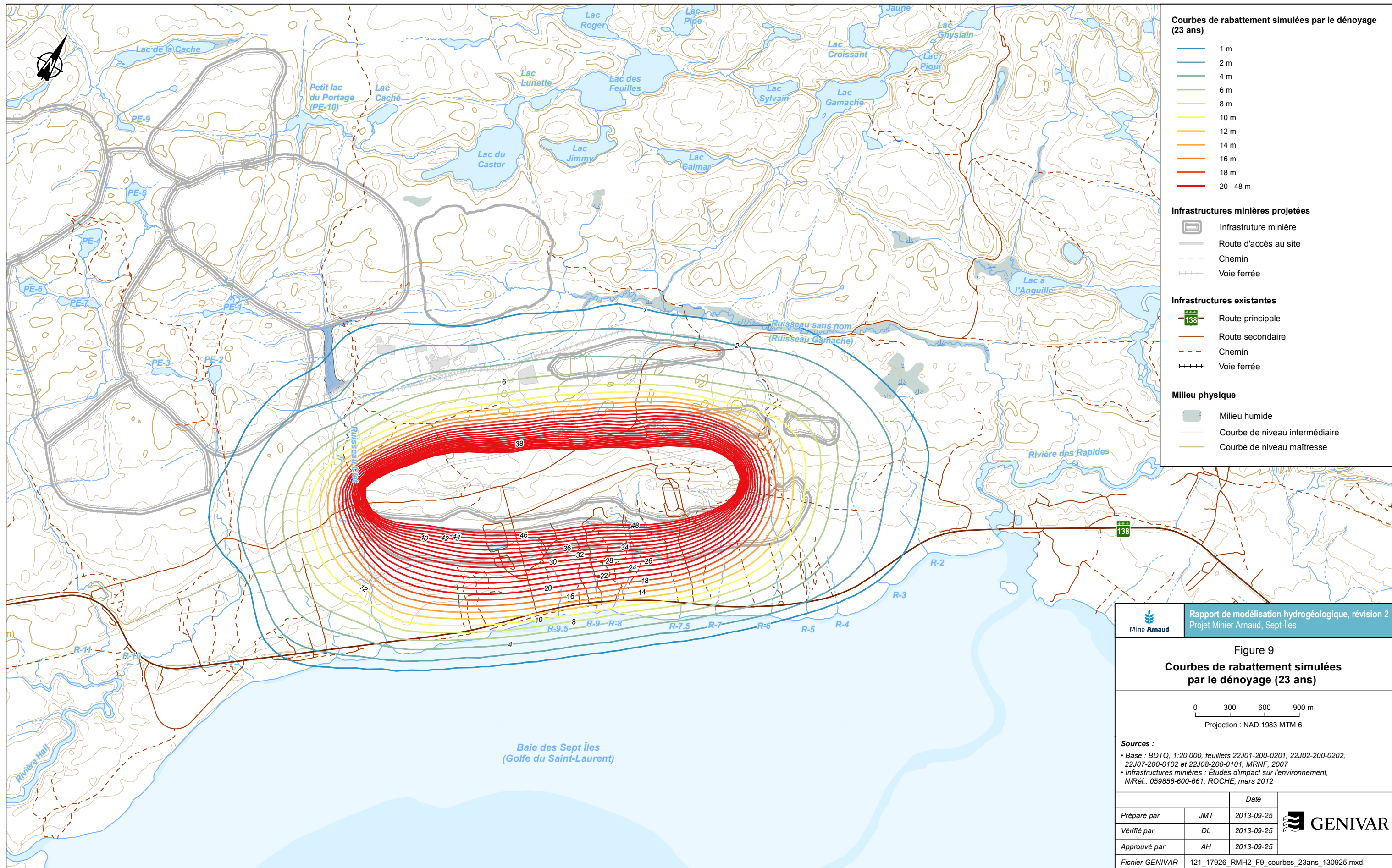
**Figure 8**  
**Élévations piézométriques simulées**  
**lors du dénoyage final (23 ans)**



**Sources :**  
 • Base : BNDT, 1:50 000, feuillets 22J01, 22J02, 22J07 et 22J08, RNCan, 2007  
 • Infrastructures minières : EIE, N/Réf.: 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date	
Préparé par	JMT	2013-09-25	
Vérifié par	DL	2013-09-25	
Approuvé par	AH	2013-09-25	
Fichier GENIVAR	121_17926_RMH2_F8_piezo_23ans_130925.mxd		





**Courbes de rabattement simulées par le dénoyage (23 ans)**

- 1 m
- 2 m
- 4 m
- 6 m
- 8 m
- 10 m
- 12 m
- 14 m
- 16 m
- 18 m
- 20 - 48 m

**Infrastructures minières projetées**

- Infrastructure minière
- Route d'accès au site
- Chemin
- Voie ferrée

**Infrastructures existantes**

- Route principale
- Route secondaire
- Chemin
- Voie ferrée

**Milieu physique**

- Milieu humide
- Courbe de niveau intermédiaire
- Courbe de niveau maîtresse

**Figure 9**  
**Courbes de rabattement simulées par le dénoyage (23 ans)**

0 300 600 900 m  
Projection : NAD 1983 MTM 6

**Sources :**  
 • Base : BDTQ, 1:20 000, feuillets 22J01-200-0201, 22J02-200-0202, 22J07-200-0102 et 22J08-200-0101, MRNF, 2007  
 • Infrastructures minières : Études d'impact sur l'environnement, N/Réf. : 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date
Préparé par	JMT	2013-09-25
Vérifié par	DL	2013-09-25
Approuvé par	AH	2013-09-25
Fichier GENIVAR	121_17926_RMh2_F9_courbes_23ans_130925.mxd	





## 7.3 Évaluation de la trajectoire des particules

### 7.3.1 Zones de captage

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 zones de captage illustrées pour chacune des périodes (figures 10 à 12) représentent chacun des scénarios en régime permanent. L'atteinte du régime permanent peut se produire beaucoup plus tard, soit après les périodes de 7, 15 ou 23 ans. Afin d'obtenir un meilleur portrait de la provenance de l'eau à chaque période, des analyses de trajectoire des particules pour un temps donné (soit 7, 15 ou 23 ans) ont donc été effectuées.

#### **23 ans**

Les résultats d'analyse de trajectoire des particules sont montrés à la figure 10 (exploitation finale). Tel que présenté, la zone de captage s'étend jusqu'au sud des lacs situés au nord-ouest de la mine, soit les lacs Jimmy, Du Castor, et Calmar. Au sud de la fosse, la zone de captage atteint la baie des Sept-Îles, indiquant qu'une portion de l'eau pompée proviendrait de l'eau de la baie. Les trajectoires des particules dessinées n'atteignent généralement pas le ruisseau Gamache, mais atteignent la baie des Sept Îles, confirmant ainsi la présence d'eau de la baie dans l'eau pompée à la fin de l'exploitation. L'évaluation de ces volumes est présentée à la section 7.3.2.

La zone de captage est plus étendue que le cône de rabattement de 1 m dans la portion nord puisque toutes les eaux vont éventuellement s'écouler dans la fosse au fil du temps (en fonction de la piézométrie régionale). Par contre, au nord-est et au sud-ouest le cône de rabattement de 1 m est plus étendu que la zone de captage. Cela signifie que la baisse des niveaux d'eau anticipée n'est pas suffisamment importante pour modifier le sens d'écoulement. Les eaux souterraines dans ces secteurs continueront de s'écouler en majorité vers la baie des Sept Îles (voir figure 8).

#### **7 ans**

La figure 11 présente les résultats d'analyse de trajectoire des particules après 7 ans d'exploitation. Tel que montré à la figure 11, la majorité de l'eau provient du nord de la fosse, comme il été obtenu à l'exploitation finale, mais à un moindre degré. Selon le modèle, la zone de captage n'atteindrait pas les eaux de la baie des Sept Îles.

## **15 ans**

La figure 12 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. Une portion de la zone de captage atteint la baie des Sept Îles; une proportion de l'eau pompée pourrait donc provenir de l'eau de la baie.

### 7.3.2 **Présence d'eau salée**

Étant donné la proximité de la baie des Sept Îles, une proportion de l'eau pompée dans la fosse pourrait être salée. Deux phénomènes pourraient se produire, soit un écoulement horizontal de la baie vers la fosse entraînant une intrusion d'eau salée dans la fosse, ou encore un écoulement vertical ascendant sous la fosse entraînant une remontée du front salin situé à plus de 800 m de profondeur (selon l'approche de Ghyben-Herzberg présenté dans Verrjuit, Arnold [1968]).

L'analyse de trajectoire des particules permet d'évaluer les proportions d'eau salée provenant de la baie des Sept Îles. La remontée du front salin sera évaluée à l'aide de formule analytique provenant de la littérature (Schmorak et Mercado [1969]).

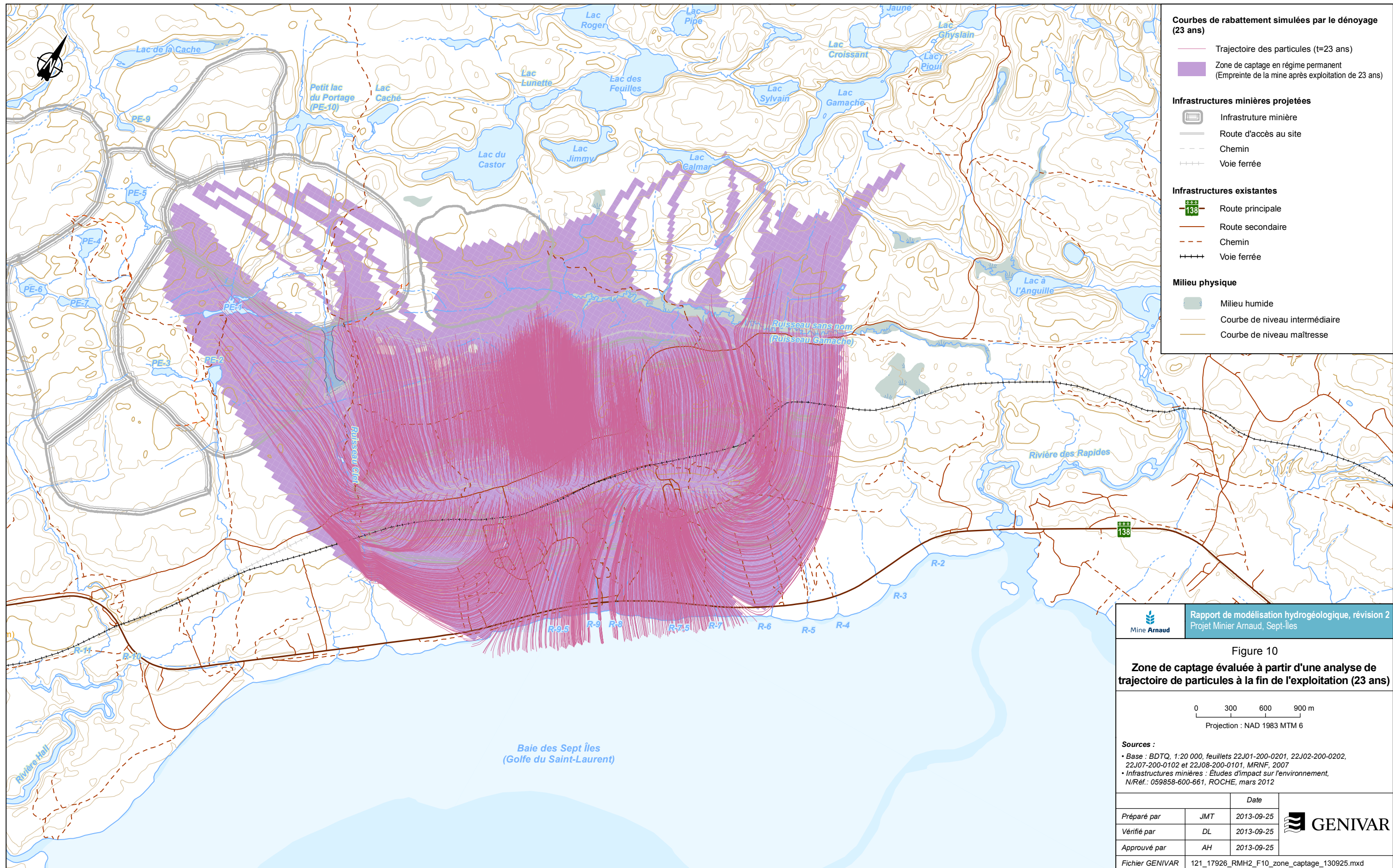
#### **Écoulement horizontal**

Selon les résultats des simulations numériques et en fonction de la géométrie de la fosse, aucune intrusion d'eau salée n'est anticipée avant une dizaine d'années d'exploitation. La simulation numérique effectuée à 15 ans d'exploitation montre que la zone de captage atteint la baie des Sept Îles, le niveau du fond de la fosse se situe à cette période sous le niveau moyen de la mer (-40 masl). Du débit de dénoyage anticipé à cette période, soit 8 621 m<sup>3</sup>/jour, seul 0,20 % (17 m<sup>3</sup>/jour) proviendrait de la baie. À la fin de l'exploitation (23 ans), 0,73 % du débit de dénoyage total (9 370 m<sup>3</sup>/jour) proviendrait de l'eau salée de la baie des Sept Îles (à l'atteinte du régime permanent). Le sommaire des résultats est présenté au tableau 18.

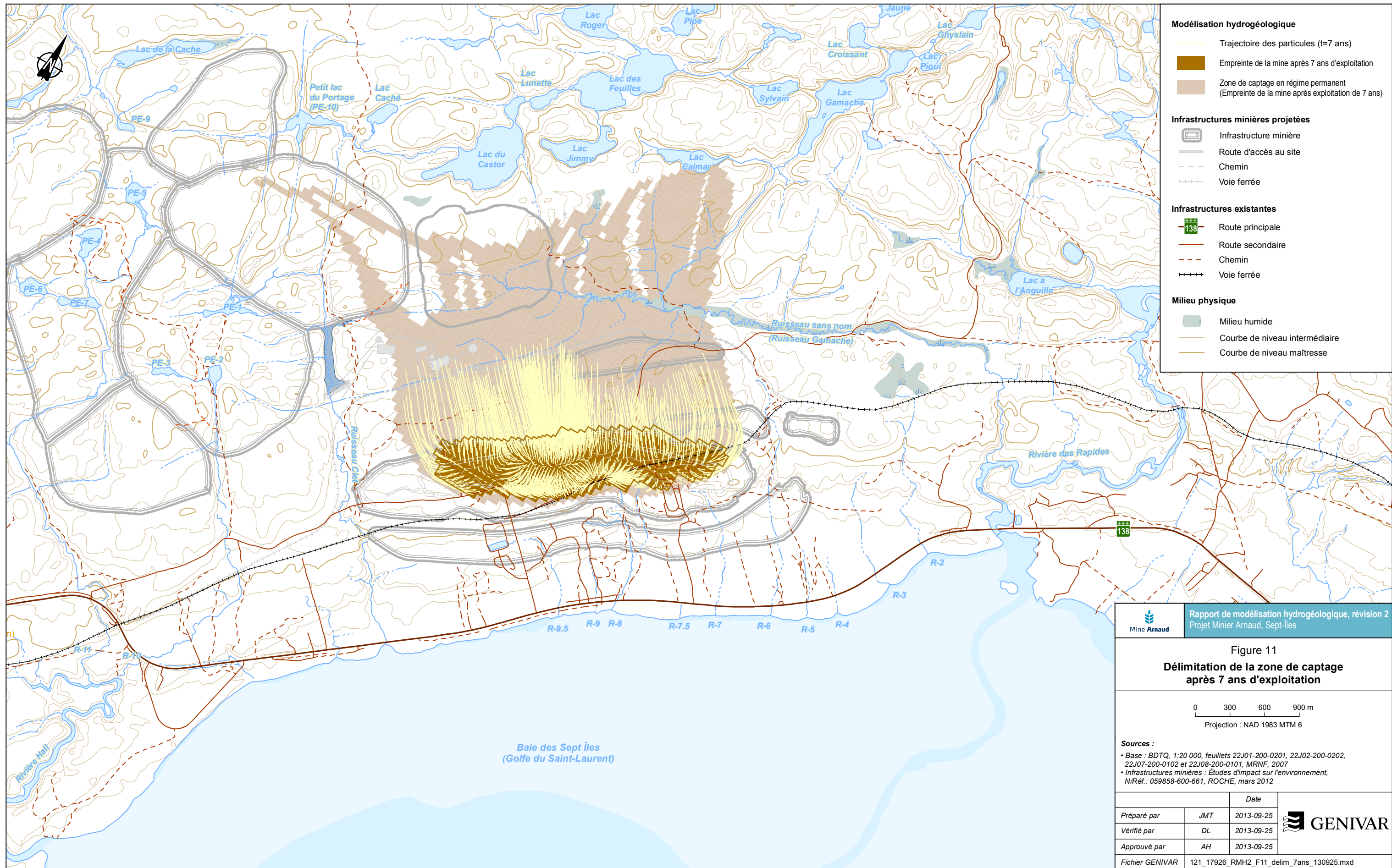
#### **Remontée du front salin**

Selon l'approche développée par Ghyben et Herzberg, la profondeur du front salin se situerait à une profondeur équivalente à 40 fois l'élévation du niveau d'eau douce par rapport au niveau de la mer. L'élévation piézométrique dans le secteur de la fosse se situe entre 20 et 70 m selon le secteur. Le front salin se situerait donc à une distance minimale de 800 m de profondeur dans le secteur sud de la fosse. À la fin de l'exploitation, le débit total de dénoyage a été évalué à 9 370 m<sup>3</sup>/jour dont 41,2 % proviendrait de l'eau souterraine, soit 3 860 m<sup>3</sup>/jour.









**Modélisation hydrogéologique**

- Trajectoire des particules (t=7 ans)
- Emprise de la mine après 7 ans d'exploitation
- Zone de captage en régime permanent (Emprise de la mine après exploitation de 7 ans)

**Infrastructures minières projetées**

- Infrastructure minière
- Route d'accès au site
- Chemin
- Voie ferrée

**Infrastructures existantes**

- Route principale
- Route secondaire
- Chemin
- Voie ferrée

**Milieu physique**

- Milieu humide
- Courbe de niveau intermédiaire
- Courbe de niveau maîtresse

Mine Arnaud | Rapport de modélisation hydrogéologique, révision 2  
Projet Minier Arnaud, Sept-Îles

Figure 11  
Délimitation de la zone de captage après 7 ans d'exploitation

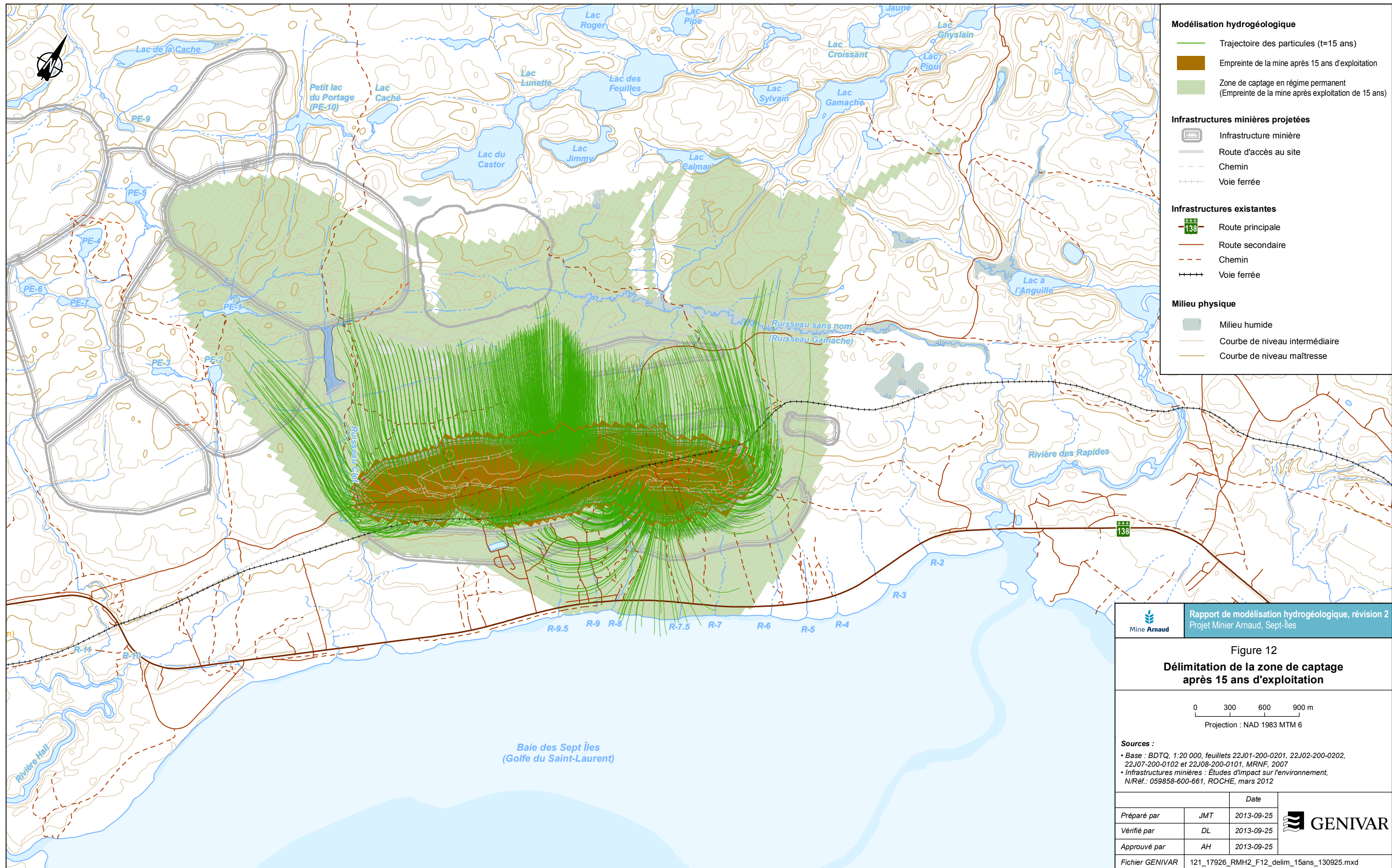
0 300 600 900 m  
Projection : NAD 1983 MTM 6

**Sources :**

- Base : BDTQ, 1:20 000, feuillets 22J01-200-0201, 22J02-200-0202, 22J07-200-0102 et 22J08-200-0101, MRNF, 2007
- Infrastructures minières : Études d'impact sur l'environnement, N/Réf. : 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date	
Préparé par	JMT	2013-09-25	
Véifié par	DL	2013-09-25	
Approuvé par	AH	2013-09-25	
Fichier GENIVAR	121_17926_RMh2_F11_delim_7ans_130925.mxd		





- Modélisation hydrogéologique**
- Trajectoire des particules (t=15 ans)
  - Empreinte de la mine après 15 ans d'exploitation
  - Zone de captage en régime permanent (Empreinte de la mine après exploitation de 15 ans)
- Infrastructures minières projetées**
- Infrastructure minière
  - Route d'accès au site
  - Chemin
  - Voie ferrée
- Infrastructures existantes**
- Route principale
  - Route secondaire
  - Chemin
  - Voie ferrée
- Milieu physique**
- Milieu humide
  - Courbe de niveau intermédiaire
  - Courbe de niveau maîtresse

Mine Arnaud | Rapport de modélisation hydrogéologique, révision 2  
 Projet Minier Arnaud, Sept-Îles

**Figure 12**  
**Délimitation de la zone de captage**  
**après 15 ans d'exploitation**

0 300 600 900 m  
 Projection : NAD 1983 MTM 6

**Sources :**

- Base : BDTQ, 1:20 000, feuillets 22J01-200-0201, 22J02-200-0202, 22J07-200-0102 et 22J08-200-0101, MRNF, 2007
- Infrastructures minières : Études d'impact sur l'environnement, N/Réf. : 059858-600-661, ROCHE, mars 2012

		Date	
Préparé par	JMT	2013-09-25	
Vérifié par	DL	2013-09-25	
Approuvé par	AH	2013-09-25	
Fichier GENIVAR	121_17926_RMh2_F12_delim_15ans_130925.mxd		



Lors du dénoyage de la fosse, celle-ci agira comme un puits de pompage et le front salin situé en profondeur pourra remonter graduellement selon l'intensité du pompage. Schmorak et Mercado (1969) ont développé une solution analytique approximative permettant d'évaluer l'avancée du front salin. L'équation s'applique pour le pompage d'un puits. Afin d'effectuer une approximation de la remontée du front salin lors du dénoyage, la fosse peut être représentée par plusieurs puits de pompage. Le nombre de puits a été estimé à partir de l'équation de Theis et par itérations afin d'obtenir la meilleure représentation possible du cône de rabattement anticipé après 23 ans d'exploitation. La conductivité hydraulique du roc sain (0,023 m/j pour les couches 3-6) a été utilisée lors des itérations. Le coefficient d'emmagasinement évalué antérieurement a également été utilisé. Suite aux itérations effectuées à partir de l'équation de Theis, la fosse serait représentée par un total de 20 puits de pompage ayant chacun un débit d'environ 8,05 m<sup>3</sup>/h. Cette représentation permet de maintenir dans la fosse un rabattement de 250 m (rabattement combiné de tous les puits) et une zone d'influence d'au moins 2 km autour de la fosse.

La formule de Schmorak et Mercado se présente comme suit :

$$Z = \frac{Q\rho(f)}{[2\pi K(\rho(s) - \rho(f))]}$$

Où :

Z : Distance du front salin par rapport au front salin initial (m);

Q : Débit de pompage (m<sup>3</sup>/jour);

$\rho_f$  : Densité de l'eau douce (g/ml);

$\rho_s$  : Densité de l'eau salée (g/ml);

d : Distance de la base du puits au front salin initial;

K : Conductivité hydraulique du milieu (m/jour).

La position initiale du front salin (d) par rapport au fond de la fosse se situerait à environ 550 m (800 m-250 m). Considérant un pompage de chacun des puits de 193 m<sup>3</sup>/j (Q), une conductivité hydraulique du roc de 0,023 m/j (K) et des densités de 1,02 g/ml et 1,0 g/ml pour l'eau salée et l'eau douce respectivement, on obtient une valeur de 121 m pour la remontée du front salin. Selon cette solution, le nouveau front salin à la fin de l'exploitation se situerait donc à une distance d'environ 429 m sous le fond de la fosse.

Tableau 18 Proportion des volumes d'eau pompée provenant de la baie (eau salée)

Excavation finale	
Débit provenant de la baie (m <sup>3</sup> /jour)	68,788
Débit de dénoyage total (m <sup>3</sup> /jour)	9 370,3
Proportions provenant de la baie (%)	0,73
Fosse après 15 ans	
Débit provenant de la baie (m <sup>3</sup> /jour)	16,83
Débit de dénoyage total (m <sup>3</sup> /jour)	8 621
Proportions provenant de la baie (%)	0,20
Fosse après 7 ans	
Aucun volume d'eau provenant de la baie n'est anticipé	

## 7.2 Impacts sur les eaux de surface

Même si la calibration du modèle n'a pas permis de reproduire avec précision tous les débits mesurés, il est tout de même possible de déterminer le risque d'impact sur les ruisseaux. 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 19. Selon les résultats obtenus, le développement de la fosse pourrait affecter les débits de base des cours d'eau situés au sud (R4 à R10). La contribution des eaux souterraines aux débits de base du cours d'eau R10 (zones 17 à 20) deviendrait inexistante selon le modèle. Pour les zones 17, 18 et 19, les débits simulés étaient déjà faibles (entre 13 et 20 m<sup>3</sup>/jour), la réduction anticipée aurait donc peu d'impacts. Le ruisseau Clet (zones de modèle 13, 14, 15, 16) pourrait également subir une diminution du débit de base, surtout dans la portion aval. Par contre, dans le cas du ruisseau Clet, cette réduction devrait être compensée par la décharge de l'effluent de la mine. Le ruisseau Gamache serait faiblement affecté selon les résultats obtenus (environ 30 % de la réduction du débit de base).

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.



Tableau 19 Valeurs des débits de base simulées à partir du modèle calibré comparativement au modèle prédictif

Zone modèle #*	Cours d'eau correspondant	Valeurs de débit simulées à partir du modèle calibré en régime permanent (m <sup>3</sup> /j)	Valeurs de débit simulées à partir d'un modèle prédictif (m <sup>3</sup> /j)	Réduction du débit de base simulé (%)**
2	PE10	59,3	58,6	1
3	Gamache	370,7	258,4	30
4	R-2	159,5	120,8	24
5	R-3	233,7	74,2	68
6	R-4	15,5	0,1	99
7	R-5	11,7	0,0	100
8	R-6	117,1	0,0	100
9	R-8	106,1	0,0	100
10	R9.5	153,7	0,0	100
11	PE-1	81,9	80,8	1
12	Clet	430,5	404,7	6
13	Clet	117,7	22,1	81
14	Clet	39,6	17,4	56
15	Clet	102,7	39,5	62
16	Clet	114,4	0,7	99
17	PE-3	20,8	0,0	100
18	PE-2	13,4	0,0	100
19	R-10	19,6	0,0	100
20	R-10	180,5	0,0	100
21	PE-5	138,5	146,2	-6
22	PE-6, PE-7	148,7	131,1	12
23	PE-8	130,8	132,8	-2
25	R-11	21,6	21,9	-1

\* Voir figure 4 pour la localisation des zones

\*\* Étant donné les résultats de calibration obtenus pour les débits, ces valeurs devraient être utilisées seulement afin de déterminer le degré d'impact attendu. Les % de réduction pourraient être très variables. Les valeurs négatives sont dues à une imprécision du modèle prédictif.

Le tableau 20 ainsi que le graphique à la page suivante présente un bilan des réductions de débits anticipés pour chacun des cours d'eau investigués en tenant compte des réductions de débits compilés dans l'étude hydrologique et en fonction des résultats de modélisation numérique.

Tableau 20 Impact anticipé sur les débits des eaux de surface

Cours d'eau	Débit annuel moyen (m <sup>3</sup> /s)	Réduction du bassin versant (%)	Débit moyen estimé projeté (m <sup>3</sup> /s)	Écoulement de base (projeté (Q <sub>2.7</sub> estimatif)) (m <sup>3</sup> /s)	Réduction de base simulé (%)***	Écoulement de base projeté*réduction du débit de base simulé (m <sup>3</sup> /s)	Débit résiduel (m <sup>3</sup> /s)	Réduction totale de débit (%)
R-2	0,023	0	0,023	0,002	24%	0,00048	0,023	-2%
R-3	0,013	0	0,013	0,002	68%	0,00136	0,012	-10%
R-4	0,014	0	0,014	0,0001	99%	0,000099	0,014	-1%
R-5	0,015	-73	0,004	0,0003	100%	0,0003	0,004	-75%
R-6	0,027	-80	0,005	0,0008	100%	0,0008	0,005	-83%
R-7	0,029	-60	0,012	0,0002	100%	0,0002	0,011	-61%
R-7.5*	0,001	0	0,001	0,00002	100%	0,00002	0,001	-2%
R-8	0,035	-79	0,007	0,0009	100%	0,0009	0,006	-82%
R-9*	0,028	-83	0,005	0,00058	100%	0,00058	0,004	-85%
R-9.5	0,032	-48	0,017	0,0015	100%	0,0015	0,015	-53%
Clet**	0,153	-64	0,055	0,0043	99%	0,004257	0,051	-67%
R-10	0,073	-46	0,039	0,0028	100%	0,0028	0,037	-50%
R-11	0,168	-68	0,054	0,0006	0%	0	0,054	-68%
Gamache	0,273	-27	0,199	0,0171	30%	0,00513	0,194	-29%

\* Le débit moyen annuel du R-9 et R- 7.5 ont été estimé puisqu'aucun jaugeage n'y a été effectué. La superficie du bassin versant du R7.5 a été estimée approximativement.

\*\* Les débits présentés ne tiennent pas compte de l'apport d'eau de l'effluent. Le ruisseau Clet subira une augmentation de son débit en considérant l'apport des eaux de l'effluent.

\*\*\* Impact estimé à 100 % pour les cours d'eau R-7, R-7.5 et le R-9 étant donné leur localisation par rapport à la fosse.

## **8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**

---

### **8.1 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;

#### **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 9 370 m<sup>3</sup> d'eau seront rejetés hors de la fosse sur une base quotidienne. 58,8 % de l'eau rejetée est liée à la recharge au-dessus du puits et 41,2 % 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 19. 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 de base 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 des Sept Îles, tel qu'indiqué par l'analyse de trajectoire des particules, lequel indique qu'environ 0,73 % de l'eau rejetée de la fosse pourrait provenir de la baie des Sept Îles;
- Selon les calculs analytiques réalisés, le dénoyage de la fosse pourrait causer une remontée du front salin, mais celui-ci n'atteindrait pas le fond de la fosse;

### **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 4 125 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 maximale prévue au fond de la fosse de -40 mASL;
- À l'année 15, la majorité de l'eau souterraine provient du nord, un très faible apport d'eau en provenance de la baie des Sept Îles est prévu (0,20 %). Le modèle prévoit que 8 621 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 s'étend à environ 1,2 km au nord-ouest et jusqu'à la baie des Sept Îles. Dans l'axe NO – SO, le rabattement de 1 m s'étend à environ 1,5 km de part et d'autre de la fosse. La modélisation indique que les débits de base de l'eau de surface dans cette zone seront réduits tel que décrit au tableau 19.

## **8.2 Recommandations**

Selon les résultats obtenus, il est probable qu'un faible pourcentage de l'eau pompée soit salé. Puisque de l'eau saumâtre a déjà été identifiée dans certains puits autour de la fosse, un suivi spécifique à cette problématique devra être mis en place durant l'exploitation. Toutefois, il faut noter qu'aucune intrusion d'eau salée (excluant l'eau saumâtre présente dans le secteur) n'est anticipée tant et aussi longtemps que la fosse n'aura pas atteint le niveau de la mer.

Un plan de gestion devrait être mis en place afin de détecter toute problématique éventuelle liée au dénoyage de la fosse (réseau de fracture non détecté, qualité de l'eau pompée, etc.). Ce plan inclurait donc un suivi de la qualité d'eau souterraine, de l'eau pompée ainsi qu'une mise à jour du modèle existant en incluant les nouvelles informations disponibles sur les propriétés hydrostratigraphiques ainsi que sur les réseaux de fractures. Le modèle numérique pourrait être mis à jour en fonction des nouvelles données acquises ou à différentes étapes clés de l'exploitation.

## 9. 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 exercées 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 peut 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.



## 10. RÉFÉRENCES

---

- ANDERSON, M. P. AND WOESSNER, W. W. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. San Diego: Academic Press, 1992.
- AUSENCO VECTOR. 2011. *Draft Hydrogeologic Investigation Report*. Mine Arnaud. 32 p and appendix.
- AXOR, 2012. Structure du projet mine Arnaud, 14 p.
- Base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH), 2013.
- BEAR, J. HYDRAULICS OF GROUNDWATER. Toronto: McGraw-Hill Book Company, 1979.
- Cartes géologiques (SIGEOM CG SIGEOM22J)
- Données digitalisées d'élévation topographique (BDTQ, 1:20 000, feuillets 22J01-200-0201, 22J02-200-0202, 22J07-200-0102 et 22J08-200-0101, MRNF, 2007)
- Données digitalisées d'élévation topographique (LIDAR, résolution 10cm, Géolocation, 2012)
- Données digitalisées des dépôts quaternaires (SIEF, 1:20 000), 2005
- Environnement Canada (données météorologiques des 30 dernières années), <http://climat.meteo.gc.ca/>
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcVIEW. Version 9.3. 2009.
- Environmental Simulations Inc. 2011. version 6.29 Vista, Build 8, 64 bit
- FREEZE, R.A. AND CHERRY, J.A. 1979: Groundwater. Hemel Hempstead: Prentice-Hall International. Xviii, 604 pp
- GENIVAR. 2012a. Projet minier Arnaud – Hydrologie - Complément d'informations à l'étude d'impact sur l'environnement. Rapport de GENIVAR inc. à Mine Arnaud inc. Novembre 2012. 47 p. et annexes.
- GENIVAR. 2013a. Projet minier Arnaud. Rapport sectoriel. Hydrogéologie, révision 1. Rapport de GENIVAR à Mine Arnaud inc. 73 p. et annexes.

- GENIVAR. 2013b. *Projet minier Arnaud. Étude complémentaire : hydrogéologie, essais Lugeon avec obturateurs*, Rapport de GENIVAR à Mine Arnaud inc. 22 p. et annexes.
- GENIVAR. 2013c. *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
- GPR, 2013. *Levés de sismique réfraction à la jonction du littoral de la baie des Sept Îles et de la zone intertidale*, 7 p. et annexes.
- 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.
- HILL AND TIEDEMAN 2007, *Effective Groundwater Model Calibration*.
- JOURNEAUX ASSOC. 2011. *Mine Infrastructure, Relocated Rail Arnaud Mine, Sept-Îles, Quebec. Geotechnical and Hydrogeological Investigation*. Report No. L-10-1411.
- POLLOCK, D.W. MODPATH. 1994. <http://www.water.usgs.gov/software/modpath>
- ROCHE, 2012, *étude d'impact Mine Arnaud Apatite Project, Sept-Îles, QC, Project No. 121848 / 59858, Document No. 1848-01-RE-GE-001*
- SOQUEM, 2011, *Rapport de forage, 2010. Project Sept- Îles (1166-1). 22J/01, 22J/02. 22J/07, 22J/08. Canton Arnaud*.
- SCHMORAK ET MERCADO, *upcoming of fresh water-sea water interface below pumping wells; field study. Water Resources. Research.* v 5 pp. 1290-1311
- The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, U.S. Environmental Protection Agency, September 1994
- Verrjuit, Arnold, 1968. "A note on the Ghyben-Herzberg formula". *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology (Delft, Netherlands: Technological University)* 13 (4): pp. 43–46. Retrieved 2009-03-21.



