

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	i

Titre du document : **MODÈLE NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE ET DU TRANSPORT DES CONTAMINANTS AU PARC À RÉSIDUS (PAR) DE LA MINE ÉLÉONORE**

Client : **LES MINES OPINACA LTEE, GOLDCORP**

Projet : **Ingénierie détaillée de la phase 2 du PAR**

Préparé par : Géraldine Cosset, ing. , M.Sc.A

G. Cosset.

Révisé par : Christian Bélanger, ing. , M.Sc

Christian Bélanger

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	ii

LISTE DES RÉVISIONS APPORTÉES AU DOCUMENT

Révision				Pages Révisées	Remarques
#	Prép.	Rev.	Date		
PB	GC	CB	2016-03-23	Toutes	Émis pour commentaires du client
00	GC	CB	2016-10-05	Toutes	Émis pour version finale

AVIS AU LECTEUR

Ce document fait état de l'opinion professionnelle de SNC-Lavalin inc. («SLI») quant aux sujets qui y sont abordés. Elle a été formulée en se basant sur ses compétences professionnelles en la matière et avec les précautions qui s'imposent. Le document doit être interprété dans le contexte de la convention en date du 27 mars 2015 (la «Convention») intervenue entre SLI et Goldcorp Inc. (le «Client»), ainsi que de la méthodologie, des procédures et des techniques utilisées, des hypothèses de SLI ainsi que des circonstances et des contraintes qui ont prévalu lors de l'exécution de ce mandat. Ce document n'a pour raison d'être que l'objectif défini dans la Convention, et est au seul usage du Client, dont les recours sont limités à ceux prévus dans la Convention. Il doit être lu comme un tout, à savoir qu'une portion ou un extrait isolé ne peut être pris hors contexte.

SLI ayant, pour évaluer les coûts, le cas échéant, suivi une méthode et des procédures et pris les précautions appropriées au degré d'exactitude visé, en se basant sur ses compétences professionnelles en la matière et avec les précautions qui s'imposent, et est d'opinion qu'il y a une forte probabilité que les coûts réelles se situent dans la marge d'erreur indiquée. Cependant, l'exactitude de ces estimations ne peut être garantie. À moins d'indication contraire expresse, SLI n'a pas contre-vérifié les hypothèses, données et renseignements en provenance d'autres sources (dont le Client, les autres consultants, laboratoires d'essai, fournisseurs d'équipements, etc.) et sur lesquelles est fondée son opinion. SLI n'en assume nullement l'exactitude et décline toute responsabilité à leur égard.

SLI décline en outre toute responsabilité envers le Client et les tiers en ce qui a trait à l'utilisation (publication, renvoi, référence, citation ou diffusion) de tout ou partie du présent document, ainsi que toute décision prise ou action entreprise sur la foi dudit document.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
		Rév	Date	Page
	628178-4000-4EER-0001	00	05 octobre 2016	iii

TABLE DES MATIÈRES

1.0	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte.....	1
1.2	Objectif et méthodologie.....	2
2.0	DESCRIPTION DES INFRASTRUCTURES EXISTANTES	2
3.0	CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	3
3.1	Géologie	3
3.1.1	Dépôts de surface.....	3
3.1.2	Socle rocheux.....	3
3.2	Hydrogéologie	4
3.2.1	Horizons hydrostratigraphiques	4
3.2.2	Piézométrie.....	8
3.3	Bilan hydrique et données de recharge	11
3.4	Évaluation et classification de la ressource eau souterraine	11
4.0	MODÈLE CONCEPTUEL	11
5.0	MODÈLE NUMÉRIQUE	12
5.1	Logiciel employé.....	12
5.2	Description du modèle numérique et maillage	12
5.3	Paramètres de modélisation et conditions frontières	13
5.4	Processus de calage du modèle hydrogéologique	15
6.0	RÉSULTATS DE MODÉLISATION - MODÈLE DE BASE DES CONDITIONS INITIALES	16
6.1	Étude de sensibilité du modèle	17
7.0	ÉVALUATION DES DÉBITS D'EXFILTRATION AU TRAVERS DE LA GÉOMEMBRANE	18
8.0	MODÈLE NUMÉRIQUE INCLUANT LE PARC À RÉSIDUS	20
8.1	Modifications au modèle numérique	21
8.2	Résultats du modèle du parc à résidus	21
9.0	TRANSPORT DES CONTAMINANTS	21
9.1	Méthodologie.....	21
9.2	Travaux réalisés dans le cadre de la demande de Certificat d'autorisation de la Phase 1	21
9.3	Suivi au site du PAR de la mine Éléonore	22
9.4	Détermination des paramètres de transport.....	22
9.4.1	Critères applicables	23
9.4.2	Teneurs de fond et concentrations initiales au site	23
9.4.3	Détermination de la source de contamination	26
9.4.4	Description du modèle de transport.....	27
9.5	Résultats de simulations de transport	29
9.5.1	Panache de la concentration en arsenic - concentration source de 0,46 mg/L	29
9.5.2	Panache de la concentration en arsenic - concentration source de 2,8 mg/L	29
9.5.3	Comparaison des panaches.....	30
10.0	LIMITES ET RECOMMANDATIONS	30
10.1	Modèle hydrogéologique par méthode numérique	30
10.2	Transport des contaminants.....	30

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	iv

11.0 SUIVI DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES	31
12.0 CONCLUSION	32
13.0 RÉFÉRENCES	33

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Conductivités hydrauliques mesurées dans les sols organiques	5
Tableau 3-2 : Conductivités hydrauliques horizontales mesurées au site dans l'unité d'argile silteuse	5
Tableau 3-3 : Conductivités hydrauliques verticales mesurées en laboratoire dans l'unité d'argile silteuse.....	6
Tableau 3-4 : Conductivités hydrauliques mesurées sur le terrain dans le till glaciaire.....	6
Tableau 3-5 : Conductivités hydrauliques mesurées sur le terrain dans le socle rocheux	7
Tableau 3-6 : Niveaux piézométriques de l'horizon de sable relevés en avril 2010	9
Tableau 3-7 : Bilan hydrique au site de la mine Niobec	11
Tableau 5-1 Conductivités hydrauliques du modèle hydrogéologique calibré	13
Tableau 5-2 : Conditions frontières appliquées au modèle des conditions initiales pour les infrastructures de la mine	15
Tableau 6-1 : Points d'observations utilisés pour la calibration du modèle.....	16
Tableau 6-2 Erreurs obtenues pour le calage du modèle hydrogéologique	17
Tableau 6-3 : Résultats de l'analyse de sensibilité	18
Tableau 7-1 : Principaux paramètres utilisés dans le modèle d'écoulement souterrain du PAR (SNC-Lavalin, 2012).....	19
Tableau 7-2 : Résultats du calcul de Giroud pour deux infiltrations différentes	20
Tableau 9-1 : Résumé des dépassements du critère RESIE lors des essais TCLP et SPLP réalisés sur des échantillons de résidus désulfurés	23
Tableau 9-2 : Critères prescrits par le MDDELCC pour les concentrations en contaminants dans l'eau souterraine en fonction du milieu récepteur	23
Tableau 9-3 : Résultats du suivi de la qualité de l'eau souterraine au PAR (concentration en arsenic et niveau piézométrique)	25
Tableau 9-4 : Teneur en arsenic dans les eaux de ruissellement au PAR	26
Tableau 9-5 : Teneur en arsenic des résidus miniers désulfurés déterminée par essais statiques	27
Tableau 9-6 : Paramètres de transport de contaminants	28

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : Figures

ANNEXE B : Calcul de Giroud

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	1

1.0 INTRODUCTION

Dans le cadre de la demande de certificat d'autorisation (CA) pour la construction et l'exploitation de la Phase II du parc à résidus (PAR), les Mines Opinaca Ltée (Opinaca) une division de Goldcorp Inc (Goldcorp) a retenu les services de la division Mines et métallurgie de SNC-Lavalin inc. (SNC-Lavalin), pour mettre à jour la modélisation hydrogéologique et de transport de contaminants réalisée en 2012 dans le cadre de la construction de la Phase I du PAR. L'objectif principal est de déterminer les débits d'exfiltration de lixiviat au fond du parc à résidus et d'évaluer la migration des possibles panaches de contaminant qui pourraient se développer aux alentours du site en fonction des caractéristiques géochimiques des résidus.

Mentionnons que les présents travaux de modélisation prendront en compte que les résidus miniers déposés actuellement dans le PAR présentent des caractéristiques géochimiques différentes que ce qui avait été initialement prévu dans le cadre de la demande de CA pour l'exploitation de la phase I.

1.1 Contexte

Goldcorp exploite un gisement aurifère au centre de la province de Québec sur le territoire du Gouvernement régional d'Eeyou Istchee Baie-James depuis octobre 2014. L'emplacement du parc à résidus se trouve à approximativement 2 km au sud de la rivière Opinaca et à 3 km au nord-ouest de la zone industrielle du site minier Éléonore. Le site se trouve dans une zone de tourbière entrecoupée par des buttons rocheux et recouvert d'arbres clairsemés. L'emplacement du parc est délimité au nord et au sud par deux crêtes montagneuses orientées est-ouest et son bassin versant est composé d'une vallée inclinée dans la direction sud-ouest vers le Réservoir Opinaca. Un ruisseau orienté NE-SW s'écoule dans la partie sud de la vallée vers le Réservoir Opinaca.

Dans le cadre de la demande de CA pour l'imperméabilisation de la phase 1 du projet, les résidus miniers désulfurés placés dans le parc à résidus étaient qualifiés, à partir des premiers essais statiques, comme non-générateurs d'acidité, mais potentiellement lixiviables pour l'arsenic. La série d'essais de caractérisation avait été réalisée sur un échantillon de résidus désulfurés produit en usine pilote par SGS Lakefield. L'échantillon testé avait été produit à partir d'un échantillon de minerai provenant de l'affleurement Roberto.

Les résidus miniers déposés actuellement dans la Phase 1 du PAR sont des résidus de procédé ayant subi une étape de désulfuration. Du fait de difficultés techniques, ce procédé d'enlèvement des sulfures est actuellement moins efficace qu'initialement prévu générant des résidus avec une teneur en sulfures plus élevée que celle présentée dans la demande de CA de la Phase 1. Ceci engendre une plus grande présence d'arsenic dans les eaux s'exfiltrant du parc du fait que l'arsenic est principalement retrouvé dans les minéraux sulfurés du gisement. Dans le cadre de ces travaux, les résidus miniers déposés dans la Phase 2 du PAR seront considérés comme similaires à ceux actuellement déposés dans la Phase 1.

La figure 1 de l'**Annexe A** montre la localisation du projet Éléonore et la figure 2 de l'**Annexe A** montre la localisation du parc à résidus, de sa position par rapport à la rivière et au Réservoir Opinaca et des phases de développement du PAR.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	2

1.2 Objectif et méthodologie

L'objectif de ce mandat est d'utiliser les débits d'exfiltration au fond du PAR au travers de possibles perforations de la géomembrane estimés lors de la phase 1 du projet, afin d'évaluer l'impact du parc à résidus sur la qualité de l'eau souterraine selon les concepts d'aménagement proposés et le suivi environnemental fait au site depuis 2012. La mesure d'étanchéité selon la caractérisation géochimique des résidus de la mine Éléonore et selon la Directive 019 est de niveau A.

Le logiciel Visual Modflow a été utilisé pour modéliser les conditions hydrogéologiques de l'aquifère régional et celles prévues sous le futur parc à résidus. Le transport de contaminants provenant du parc à résidus dans l'aquifère régional a été modélisé à l'aide du module MT3DMS.

Les étapes suivantes ont été réalisées dans le cadre de ce mandat :

- Construire un modèle numérique 3D Modflow à partir du modèle conceptuel élaboré ;
- Calibrer le modèle sur la base des niveaux piézométriques mesurés sur le terrain afin de représenter l'écoulement actuellement observé sur le terrain ;
- Revue des débits d'exfiltration au travers de la géomembrane calculés à l'aide de l'équation empirique de Giroud ;
- Intégrer le parc à résidus au modèle calibré afin de déterminer le nouveau réseau d'écoulement de l'eau souterraine ;
- Procéder à des simulations de transport de contaminant (arsenic) avec le module MT3DMS.

2.0 DESCRIPTION DES INFRASTRUCTURES EXISTANTES

La mine Éléonore de Goldcorp, située sur le territoire du Gouvernement régional d'Eeyou Istchee Baie-James, a été en développement pendant quatre (4) années et est actuellement en exploitation depuis octobre 2014. Un parc à résidus d'une superficie de 80 ha à terme est prévu avec une élévation finale de 265 m correspondant à une pile de résidus d'environ 45 m de hauteur. Il sera toutefois développé en quatre (4) phases successives et son utilisation s'échelonnera sur 20 ans.

Avant d'être déposés dans le parc, les résidus sont épaissis et filtrés. Les résidus filtrés présentent une teneur en eau très faible (pourcentage solide de 85%) et peuvent être empilés comme des sols conventionnels (i.e. transportés par camion, mis en place au bouteur). Ceci réduit la quantité d'eau à gérer au parc à résidus, la hauteur des infrastructures de confinement (i.e. digue) et les risques et impacts liés à une rupture de digue.

Plusieurs ouvrages sont nécessaires pour confiner les résidus et gérer l'eau ayant été en contact avec les résidus :

- Digue d'amorce ;
- Assise imperméabilisée ;
- Fossé de dérivation des eaux « propres » ;
- Fossé de transfert de l'eau de ruissellement des résidus ;
- Bassin de collecte ;
- Station de pompage ;
- Conduite de refoulement.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	3

Les résidus sont appuyés sur une digue d'amorce en enrochement qui ceinturera le site. Pour des raisons de stabilité de l'ensemble de la pile de résidus, le silt/argile présent sous la fondation de la digue est excavé jusqu'au niveau du till. La digue a une pente longitudinale variant de 0,38 à 0,6 % de l'est vers l'ouest (vers le bassin de collecte). Une fois les résidus en place, cette pente permet à l'eau ayant été en contact avec les résidus de se drainer vers le bassin de collecte durant l'opération et après la restauration via un drain français.

Une géomembrane lisse PEHD 1,5 mm est placée en fondation du parc à résidus et ancrée le long de la digue d'amorce. La géomembrane est placée sur une couche drainante de 0,5 m de sable et gravier, laquelle est placée directement sur le terrain naturel décapé et profilé.

Le remplissage du parc se fait de l'est vers l'ouest. Un bassin de collecte de l'eau de ruissellement ayant été en contact avec les résidus est situé à l'ouest du site et un fossé de transfert central permet à l'eau de s'écouler entre la zone active du parc et le bassin de collecte.

Le ruissellement des collines environnantes est dévié par un fossé de dérivation situé du côté nord du parc à résidus. Le bassin de collecte et le fossé de transfert sont eux aussi étanchés par une géomembrane lisse en PEHD de 2 mm. Sous le fossé de collecte, un drain français constitué de deux conduites perforées de 150 mm de diamètre et de pierre nette est construit dans le but de drainer l'eau souterraine et éviter un soulèvement de la géomembrane à cause des venues d'eau sous-jacentes. Le bassin de collecte a une capacité de 42 600 m³ sous le niveau 215,0 m.

L'eau du bassin de collecte est refoulée vers l'usine de traitement située à environ 3,5 km du parc à résidus, à proximité des installations minières. Une station de pompage permanente a été mise en place au bassin de collecte.

3.0 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

3.1 Géologie

3.1.1 Dépôts de surface

La stratigraphie du site est principalement constituée d'un horizon de tourbe, suivi d'un horizon de silt, argile silteuse ou silt argileux, suivi d'un dépôt de till reposant sur le socle rocheux. L'épaisseur de tourbe varie de nulle (au périmètre du site) à 5 m dans le centre de la vallée. L'horizon de tourbe est suivi d'une couche de silt, argile silteuse ou silt argileux gris, dont l'épaisseur varie de nulle à plus de 7 m. Le silt, argile silteuse ou silt argileux est de consistance ferme à raide et on peut y trouver des traces de sable. Dans la plupart des documents relatifs au parc à résidus, cet horizon est décrit comme étant l'horizon de silt/argile.

Sous l'horizon de silt/argile, on retrouve un horizon de till dont l'épaisseur varie de 0 à 17 m. Près des affleurements rocheux, l'horizon de till est près de la surface, directement sous la tourbe, alors que, dans la vallée, l'horizon de till est toujours sous la couche de silt/argile. Le till peut être décrit comme un sable gris avec un peu de silt, des traces de caillou et gravier. Des blocs ont été rencontrés dans quelques sondages. D'après les indices N relevés lors des forages, le till a une compacité de moyenne à très dense.

3.1.2 Socle rocheux

La propriété Éléonore repose sur des formations de la province du Supérieur du Bouclier canadien, plus précisément sur une intrusion distincte de tonalite-diorite d'un diamètre d'environ 10 km, entre la sous-province métasédimentaire d'Opinaca et la sous-province volcano-plutonique archéenne de La Grande. La lithostratigraphie de la région peut être décrite comme une suite de quatre (4) cycles volcaniques recouverts de roches

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	4

sédimentaires, le tout composant la sous-province de La Grande. Par ailleurs, la formation Auclair, un cycle sédimentaire plus récent constitué principalement de paragneiss, forme la sous-province d'Opinaca. Partout dans la région, la roche supracrustale est injectée par une succession synvolcanique, syntectonique et post ou tarditectonique de tonalite-trondhjemite-granodiorite (SRK, 2007).

Trois (3) événements de déformation, confirmés par des études géologiques sporadiques, caractérisent la structure de la géologie régionale. On trouve des degrés de métamorphisme variant entre les faciès schistes verts et amphibolites.

De plus, le degré d'intensité du métamorphisme atteint le faciès granulite près du centre du bassin d'Opinaca (SRK, 2007).

Pour ce qui est de la métallogénie régionale, SRK (2007) rapporte des signes de sept (7) types différents d'indices minéralisés dans cette ceinture (formations de fer riches en zinc ; porphyres cuivre-or et cuivre-molybdène; minéralisations volcanogéniques; zones de cisaillement aurifères; stockwerks de quartzcarbonate-tourmaline riches en or; pegmatites à spodumène, béryl et molybdénite; migmatites uranifères). De plus, outre les indices aurifères d'Éléonore, on connaît deux (2) autres indices d'or significatifs dans la région, soit les propriétés Auclair et Clearwater.

Le secteur couvert par le projet est délimité au nord et au sud par deux crêtes rocheuses orientées Est-Ouest qui enclavent la vallée où est construite le PAR. La topographie du roc dans la zone d'étude varie de 0 à 23 m de profondeur avec deux affleurements rocheux localisés au sud du PAR. Les principales roches répertoriées sont du graywacke frais, aux larges lits, gris, avec localement des intrusions de pegmatite et de quartzite.

3.2 Hydrogéologie

3.2.1 Horizons hydrostratigraphiques

Le parc à résidus est situé dans une vallée bordée au nord et au sud par des crêtes constituées d'affleurements rocheux. La vallée contient une tourbière sur la majeure partie de sa superficie. La vallée est en légère pente vers le sud-ouest, soit vers le réservoir Opinaca. Un ruisseau orienté NE-SW est présent dans la partie sud de la vallée et s'écoule vers le réservoir Opinaca.

Les principaux horizons stratigraphiques rencontrés au site de la mine Éléonore sont :

- Le sol organique ;
- L'argile silteuse ;
- Le till glaciaire ;
- Le socle rocheux.

Les horizons sont généralement continus sur l'ensemble du site excepté dans les zones de roc affleurant et les crêtes rocheuses. Les sections suivantes présentent une description sommaire de chaque unité. La description détaillée est présentée dans le rapport d'ingénierie de faisabilité de SNC-Lavalin (SNC-Lavalin, 2011a et 2011b).

3.2.1.1 Les sols organiques

Une couche de sols organiques composée de terre végétale, d'une couche de tourbe ou d'une couche de terre végétale suivie d'une couche de tourbe est observée sur une grande partie du site. Son épaisseur varie de nulle à proximité des buttons rocheux, à près de 5 m au centre de la vallée.

La conductivité hydraulique des sols organiques a été mesurée à l'endroit de 3 forages en 2008 par Golder. Le résultat des essais de perméabilité est présenté au tableau 3-1.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	5

La moyenne géométrique obtenue pour l'unité de sol organique est de $7,1 \times 10^{-7}$ m/s.

Tableau 3-1 : Conductivités hydrauliques mesurées dans les sols organiques

Forage	Unité lithologique	Profondeur de l'intervalle	Conductivité hydraulique	Source
		(m)	(m/s)	
F-08-15To	Tourbe	0,12-1,62	$7,0 \times 10^{-07}$	Golder (2009)
F-08-23To	Tourbe	0,10-2,00	$8,7 \times 10^{-07}$	Golder (2009)
F-08-24To	Tourbe	0,30-2,44	$5,8 \times 10^{-07}$	Golder (2009)
Minimum			$5,8 \times 10^{-07}$	
Moyenne			$7,1 \times 10^{-07}$	
Maximum			$8,7 \times 10^{-07}$	

3.2.1.2 L'argile silteuse et silt

Une couche d'argile silteuse et silt décrite comme du silt gris, du silt argileux et de l'argile silteuse ferme à raide avec des traces de sable est rencontrée sur la grande majorité du site, excepté dans les zones d'affleurement rocheux. Elle peut atteindre une épaisseur de 7 m.

La conductivité hydraulique horizontale de l'unité d'argile et silt a été mesurée au site en 2008 et en 2009 par Golder. Des essais de conductivité hydraulique en laboratoire ont aussi été réalisés sur des échantillons de sols non-remaniés afin de déterminer la conductivité hydraulique verticale de l'unité d'argile silteuse pour deux pressions de confinement différentes. Une pression représentative des conditions naturelles du site et une pression correspondant à la surcharge qui prévaudra suite à la mise en place des ouvrages de confinement. La conductivité hydraulique horizontale moyenne de l'argile silteuse est de $2,2 \times 10^{-7}$ m/s et la conductivité hydraulique verticale de $1,4 \times 10^{-9}$ m/s pour des conditions de préconsolidation normale est de $8,7 \times 10^{-10}$ m/s en condition surconsolidée. Les résultats des essais de perméabilité pour le silt et argile sont présentés aux tableaux 3-2 et 3-3.

Tableau 3-2 : Conductivités hydrauliques horizontales mesurées au site dans l'unité d'argile silteuse

Forage	Unité lithologique	profondeur (m)	Conductivité hydraulique (m/s)	Source
F-08-04A	Sil et argile	2,2-3,5	$3,0 \times 10^{-06}$	Golder (2010)
F-08-05A	argile silteux	4,6-5,8	$3,0 \times 10^{-08}$	Golder (2010)
F-08-08A	argile silteux	5,49-6,86	$6,0 \times 10^{-06}$	Golder (2010)
F-08-12T	argile silteux avec caillou	1,2-3,35	$1,0 \times 10^{-06}$	Golder (2010)
F-08-02A	Argile avec silt	2,72-4,42	$8,9 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
F-08-03A	Argile trace de silt	7,14-9,45	$1,4 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
F-08-05A	Silt argileux, trace de gravier	4,57-5,51	$2,8 \times 10^{-07}$	Golder (2009)
F-08-08A	Argile silteuse	5,54-6,89	$3,4 \times 10^{-06}$	Golder (2009)
F-08-09A	Argile silteuse, trace de sable	2,13-4,42	$1,5 \times 10^{-06}$	Golder (2009)
F-08-12T	Argile silteuse, un peu de sable	1,22-2,74	$2,1 \times 10^{-06}$	Golder (2009)
F-08-14A	Argile silteuse	5,23-7,82	$3,2 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
Minimum			$1,4 \times 10^{-09}$	
Moyenne			$2,2 \times 10^{-07}$	
Maximum			$6,0 \times 10^{-06}$	

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	6

Tableau 3-3 : Conductivités hydrauliques verticales mesurées en laboratoire dans l'unité d'argile silteuse

Forage	Échantillon #	Pression effective de confinement	Indice des vides	Conductivité hydraulique verticale (m/s)	Source
F-08-04	3	20	1,05	$1,3 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
F-08-13	5	35	1,38	$1,0 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
F-08-25	7	50	1,29	$1,3 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
F-08-26	7	55	1,40	$2,6 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
Minimum				$1,0 \times 10^{-09}$	
Moyenne				$1,4 \times 10^{-09}$	
Maximum				$2,6 \times 10^{-09}$	
F-08-04	3	115	1,02	$1,0 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
F-08-13	5	185	1,18	$6,2 \times 10^{-10}$	Golder (2009)
F-08-25	7	175	1,19	$7,2 \times 10^{-10}$	Golder (2009)
F-08-26	7	170	0,91	$1,3 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
Minimum				$1,0 \times 10^{-10}$	
Moyenne				$8,7 \times 10^{-10}$	
Maximum				$7,2 \times 10^{-10}$	

3.2.1.3 Le till glaciaire

La couche de till glaciaire est généralement décrite comme un sable gris avec un peu de silt, traces de gravier et caillou. Elle est rencontrée entre la couche d'argile silteuse et le socle rocheux et présente une épaisseur allant de moins d'un mètre à 17 m. La conductivité hydraulique de l'unité de till glaciaire a été mesurée sur le terrain en 2008 et 2009. La conductivité hydraulique moyenne du till glaciaire est de $6,1 \times 10^{-07}$ m/s.

Tableau 3-4 : Conductivités hydrauliques mesurées sur le terrain dans le till glaciaire

Forage	Unité lithologique	profondeur (m)	Conductivité hydraulique (m/s)	Source
F-08-01T	Till glaciaire: sable et gravier	1,63-2,83	$1,0 \times 10^{-06}$	Golder (2010)
F-08-05T	Till glaciaire: sable et gravier/sable silteux	6,10-8,4	$2,0 \times 10^{-06}$	Golder (2010)
F-08-09T	Till glaciaire: sable graveleux	6,12-11	$1,0 \times 10^{-06}$	Golder (2010)
F-08-14T	Till glaciaire: sable silteux	13,6-15,25	$6,0 \times 10^{-07}$	Golder (2010)
F-10-59T	Till glaciaire: sable silteux, un peu d'argile	20,57-24,67	$7,0 \times 10^{-08}$	Golder (2010)
F-10-64C	Till glaciaire: sable silteux/socle rocheux	19,2-24,7	$4,0 \times 10^{-08}$	Golder (2010)
F-10-79T	Till glaciaire: sable et gravier/sable et silt, un peu d'argile/sable silteux	5,26-8,9	$4,0 \times 10^{-07}$	Golder (2010)
F-08-02T	Till glaciaire: sable et gravier	5,03-7,16	$6,4 \times 10^{-07}$	Golder (2009)
F-08-03T	Till glaciaire: gravier sableux	9,45-16,92	$1,3 \times 10^{-06}$	Golder (2009)
F-08-08T	Till glaciaire: sable et gravier/sable graveleux	7,31-9,45	$6,2 \times 10^{-06}$	Golder (2009)
Minimum			$4,0 \times 10^{-08}$	
Moyenne			$6,1 \times 10^{-07}$	
Maximum			$6,2 \times 10^{-06}$	

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	7

3.2.1.4 Le socle rocheux

Le socle rocheux typiquement rencontré est composé de grauwacke frais, aux larges lits, gris, aux grains fins à moyens, de résistance forte à très forte et d'intrusions de pegmatite et de quartzite.

La conductivité hydraulique de surface, zone considérée comme plus fracturée, varie de 5×10^{-8} m/s à 2×10^{-6} m/s. La conductivité hydraulique du roc profond varie quant à elle d'imperméable à relativement perméable, soit de 2×10^{-9} m/s à 1×10^{-7} m/s avec une valeur plus élevée de 2×10^{-5} m/s.

Tableau 3-5 : Conductivités hydrauliques mesurées sur le terrain dans le socle rocheux

Forage	Unité lithologique	Profondeur	Conductivité hydraulique	Source
		(m)	(m/s)	
Roc de surface				
F-08-07R	Socle rocheux : Grauwacke	1,19-4,2	$2,0 \times 10^{-06}$	Golder (2010)
F-08-10R	Socle rocheux : Pegmatite	1,2-4,33	$2,0 \times 10^{-07}$	Golder (2010)
F-10-78R	Socle rocheux : Pegmatite/Grauwacke	1,08-5,61	$2,0 \times 10^{-07}$	Golder (2010)
F-10-82R	Socle rocheux : Pegmatite	1,6-3,5	$5,0 \times 10^{-08}$	Golder (2010)
Minimum			$5,0 \times 10^{-08}$	
Moyenne			$2,5 \times 10^{-07}$	
Maximum			$2,0 \times 10^{-06}$	
Roc profond				
F-08-01R	Socle rocheux : Grauwacke	7,9-10,14	$2,0 \times 10^{-08}$	Golder (2010)
F-08-04R	Socle rocheux : Grauwacke	5,6-7,68	$2,0 \times 10^{-05}$	Golder (2010)
F-10-60R	Socle rocheux : Grauwacke/Pegmatite	13,5-15,53	$2,0 \times 10^{-09}$	Golder (2010)
F-10-80C	Sable et gravier / Socle rocheux : Grauwacke	5,69-9,59	$1,0 \times 10^{-07}$	Golder (2010)
F-08-01R	Socle rocheux : Grauwacke	7,8-10,11	$5,5 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
F-08-11R	Socle rocheux : Grauwacke	14,48-16,61	$8,5 \times 10^{-08}$	Golder (2009)
F-08-12R	Socle rocheux : Grauwacke	4,27-6,75	$4,6 \times 10^{-09}$	Golder (2009)
Minimum			$2,0 \times 10^{-09}$	
Moyenne			$4,0 \times 10^{-08}$	
Maximum			$2,0 \times 10^{-05}$	

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
			Rév	Date	Page
	628178-4000-4EER-0001		00	05 octobre 2016	8

3.2.2 Piézométrie

Un relevé piézométrique a été réalisé en 2010 à partir de 22 piézomètres installés par Golder et a permis de tracer une carte piézométrique du système hydrogéologique de la région avant la mise en place du PAR. Les niveaux piézométriques sont indiqués au tableau 3-6 tandis que la carte piézométrique est présentée à la figure 3.

Pour les besoins de la modélisation, cette carte a été complétée par des points de contrôle déterminés à partir de la topographie et des cours d'eau environnants. Ceux-ci ont été ajoutés aux endroits suivants :

- Le long du ruisseau au centre de la vallée ;
- Le long du réservoir Opinaca au niveau 215,8 m ;
- Dans les crêtes rocheuses au nord et au sud des points de charges élevées ont été assignées.

La recharge de cet aquifère se fait uniquement par les précipitations qui alimentent le bassin versant de l'aquifère de surface. Les zones topographiques basses sont caractérisées par des zones de tourbières et ainsi les précipitations rechargent le système par les points topographiques plus élevés telles que les buttes et crêtes rocheuses. L'écoulement se fait dans le sens de la vallée, soit de l'est vers l'ouest en direction du réservoir Opinaca. Les niveaux du réservoir Opinaca varient de 212,8 à 215,8 avec un niveau d'opération critique de 216,7 (SNC-Lavalin, 2014). La carte piézométrique avec la localisation des piézomètres est présentée à la figure 3 de l'**Annexe A**. Des gradients hydrauliques importants sont observés au niveau des crêtes rocheuses situées au nord et au sud du site (de l'ordre de 8%) alors qu'on retrouve de faibles gradients hydrauliques au niveau de la vallée (de l'ordre de 1%). Les niveaux piézométriques mesurés sur le terrain en avril 2010 fluctuent de 216,48 m mesuré au puits F-08-09 à 236,95 mesuré au F-08-10.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger / P. Gomes		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	9

Tableau 3-6 : Niveaux piézométriques de l'horizon de sable relevés en avril 2010

Forage	X	Y	Élévation sol	Sommet du PVC	Date du relevé	Profondeur du niveau d'eau p/r référence	Élévation piézométrique	Élévation de la Crépine	Unité interceptée	Référence
	(m)	(m)	(m)	(m)		(m)	(m)	(m)		
F-08-01R	424640	5841417	228,63	229,75	25/04/2010	3,82	225,93	219,25	Socle rocheux	PVC
F-08-01T	424639	5841419	228,77	229,84	25/04/2010	3,59	226,25	226,75	Till glaciaire	PVC
F-08-02A	425074	5840732	221,44	222,70	25/04/2010	1,45	221,25	218,10	Argile	PVC
F-08-02T	425073	5840734	221,44	222,65	25/04/2010	1,53	221,12	215,80	Till glaciaire	PVC
F-08-03A	424529	5841142	222,66	223,80	25/04/2010	1,86	221,94	214,28	Argile	PVC
F-08-03T	424531	5841143	222,66	223,87	25/04/2010	2,28	221,59	207,45	Till glaciaire	PVC
F-08-04A	424397	5840738	217,18	218,40	26/04/2010	1,04	217,36	214,85	Argile	PVC
F-08-04R	424401	5840739	217,18	218,20	26/04/2010	0,8	217,40	210,75	Socle rocheux	PVC
F-08-05A	423787	5840876	222,24	223,48	26/04/2010	1,73	221,75	217,42	Argile	PVC
F-08-05T	423786	5840873	222,24	223,40	26/04/2010	1,8	221,60	215,35	Till glaciaire	PVC
F-08-07	423717	5840495	230,03	231,25	06/04/2010	2,14	229,11	226,90	Socle rocheux	PVC
F-08-08A	423222	5840481	218,50	219,73	26/04/2010	2,7	217,03	212,66	Argile	PVC
F-08-08T	423220	5840483	218,50	219,69	26/04/2010	2,66	217,03	210,43	Till glaciaire	PVC
F-08-09A	423521	5840136	216,13	217,43	26/04/2010	1,3	216,13	212,88	Argile	PVC
F-08-09T	423521	5840135	216,13	217,51	26/04/2010	1,2	216,31	208,03	Till glaciaire	PVC
F-08-10R	423552	5839860	236,30	237,61	26/04/2010	1,85	235,76	233,39	Socle rocheux	PVC
F-08-11	423128	5840286	218,00	219,20	26/04/2010	2,31	216,89	202,55	Socle rocheux	PVC
F-08-12R	422918	5840593	221,63	223,02	26/04/2010	1,76	221,26	216,21	Socle rocheux	PVC
F-08-12T	422919	5840592	221,63	223,01	26/04/2010	1,76	221,25	220,02	Argile	PVC
F-08-14A	423072	5840365	217,40	218,62	26/04/2010	1,63	216,99	211,09	Argile	PVC
F-08-14T	423071	5840367	217,40	218,60	26/04/2010	1,79	216,81	203,76	Till glaciaire	PVC
F-10-59T	423378	5840685	219,38	220,33	26/04/2010	2,13	218,20	196,11	Till glaciaire	PVC
F-10-60R	423519	5840477	219,12	220,04	26/04/2010	1,65	218,39	204,36	Socle rocheux	PVC
F-10-63R	423578	5841198	233,72	234,70	26/04/2010	1,68	233,02	224,75	Socle rocheux	PVC


 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger / P. Gomes		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	10

Tableau 3-6 Suite

Forage	X	Y	Élévation sol	Sommet du PVC	Date du relevé	Profondeur du niveau d'eau p/r référence	Élévation piézométrique	Élévation de la Crépine	Unité interceptée	Référence
	(m)	(m)	(m)	(m)		(m)	(m)	(m)		
F-10-64C	423449	5840591	219,26	220,10	26/04/2010	2,18	217,92	197,94	Till glaciaire	PVC
F-10-78R	423603	5840305	217,49	218,53	26/04/2010	1,83	216,70	213,73	Socle rocheux	PVC
F-10-79T	423859	5840497	217,15	218,11	26/04/2010	0,89	217,22	210,15	Till glaciaire	PVC
F-10-80C	424082	5840663	217,44	218,53	26/04/2010	1,13	217,40	209,74	Till glaciaire/Socle rocheux	PVC
F-10-81R	424541	5840932	224,23	225,27	26/04/2010	1,79	223,48	221,38	Socle rocheux	PVC
F-10-82R	424772	5841243	221,48	222,33	26/04/2010	0,98	221,35	218,93	Socle rocheux	PVC
F-10-83C	424020	5840454	217,26	218,44	26/04/2010	1,5	216,94	214,46	Argile	PVC

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	11	

3.3 Bilan hydrique et données de recharge

Les informations hydriques sont tirées du manuel d'opération (SNC-Lavalin, 2014) et résumées au tableau 3-7. Elles ont été tirées de l'analyse des données statistiques des stations La Grande A et Matagami A.

Tableau 3-7 : Bilan hydrique au site de la mine Niobec

Description	Valeur
Précipitations annuelles moyennes (P) (mm/an)	752
Ruissellement (R) (mm/an)	638
Évapotranspiration	indéterminée
Infiltration (I) (mm/an)	>114

Mentionnons que ces valeurs restent théoriques, n'étant pas basées sur des mesures de débit dans les cours d'eau entourant le parc à résidus qui pourraient aider à une meilleure quantification des différents paramètres du bilan hydrique. L'infiltration au site est faible étant donnée la saturation en surface du milieu.

3.4 Évaluation et classification de la ressource eau souterraine

Selon le système de classification du MDDELCC, l'eau souterraine peut être de classe I, II ou III selon ses propriétés hydrogéologiques, sa qualité et son potentiel d'utilisation. Évaluer la ressource en eau consiste à définir les usages possibles de l'eau souterraine et ainsi considérer l'ensemble du système hydrogéologique soit les aires de recharge, les limites hydro stratigraphiques, son utilisation ou son potentiel d'utilisation, les liens avec les eaux de surfaces. L'eau souterraine de classe I constitue une source d'alimentation en eau irremplaçable. Une formation hydrogéologique de classe II constitue une source courante ou potentielle d'alimentation en eau selon la qualité et la quantité. Finalement, une formation hydrogéologique de classe III ne peut constituer une source d'alimentation en eau (qualité insatisfaisante et quantité insuffisante). La zone industrielle de la mine Éléonore se trouve à plus de 3 km au sud-est de la zone d'étude, aucun puits d'alimentation en eau n'est situé à moins de 1 km du PAR et aucun des puits ne se trouve à l'aval hydraulique du site. Ainsi, on peut définir l'aquifère de la zone à l'étude comme étant de classe II sous l'empreinte du futur PAR.

4.0 MODÈLE CONCEPTUEL

Les limites du modèle conceptuel ont été choisies à partir des lignes de partage des eaux limitant le bassin versant du système et de la topographie de surface. Le modèle est limité au nord et au sud par des crêtes rocheuses et à l'est par une ligne topographique plus élevée considérée comme des lignes de partage des eaux où aucune condition frontière n'est appliquée et qui sont ainsi des limites imperméables. La figure 4 de l'**Annexe A**, montre les limites du modèle.

Le modèle conceptuel a été développé en intégrant la stratigraphie et les propriétés hydrogéologiques des différentes unités rencontrées dans les limites du modèle.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	12

Le modèle conceptuel hydrogéologique comporte les unités suivantes :

- Des dépôts meubles enclavés entre deux crêtes rocheuses au nord et au sud du site ;
 - Tourbe, silt et argile ainsi que till
- Le roc, séparé en roc fracturé de surface et en roc profond.
 - Roc profond a été scindé en deux en fonction de la topographie du site avec une conductivité légèrement plus élevée au niveau des butons et crêtes rocheux.

La recharge et les exutoires du système sont les suivants :

- La recharge du système se fait par les précipitations principalement dans les zones de topographies plus élevées (butons et crêtes rocheuses) puisque la vallée est composée d'une zone de tourbière ;
- L'eau souterraine des dépôts quitte le domaine modélisé par le cours d'eau A et en suivant le gradient hydraulique naturel des dépôts meubles vers le réservoir Éléonore. Ainsi, l'exutoire final de l'eau souterraine est le réservoir Éléonore.

5.0 MODÈLE NUMÉRIQUE

5.1 Logiciel employé

Modflow 2011.1 Pro a été utilisé pour simuler l'écoulement souterrain. Il permet de représenter de façon simplifiée l'écoulement des eaux souterraines à l'aide d'une grille tridimensionnelle utilisant la méthode des différences finies. Le code de calcul a été développé par la commission géologique des États-Unis (USGS). Les équations du modèle sont présentées dans le manuel de référence du modèle (McDonald et Harbaugh, 1988). C'est un logiciel qui est reconnu dans la communauté scientifique et fréquemment utilisé par les chercheurs et les firmes de génie-conseil pour simuler l'écoulement souterrain et le transport de contaminants.

Le modèle numérique se veut la traduction mathématique du modèle conceptuel. Il a été développé à l'aide des données disponibles après la compilation de l'information existante. Il est à prévoir que ces données ne représentent qu'imparfaitement les réalités géologiques et hydrauliques du site, compte tenu de l'extension spatiale limitée des investigations hydrogéologiques. En ce sens, les résultats de simulation seront tributaires de cette représentation imparfaite de la réalité, et recèleront une part d'incertitude, ce qui est le lot de tous les modèles hydrogéologiques.

5.2 Description du modèle numérique et maillage

Les limites du modèle numérique correspondent à celles du modèle conceptuel qui ont été choisies à partir de la carte piézométrique, des frontières hydrologiques de surface et de la topographie. Le modèle est limité au nord à l'est et au sud par des points topographiques plus élevés. À l'ouest, la frontière du modèle correspond au Réservoir Opinaca qui est l'exutoire du système. Finalement, La figure 4 à l'**Annexe A**, montre les limites du modèle. L'étendue du modèle fait 3555 m de longueur sur 1373 m de largeur sur une hauteur maximale de 100 m.

Un maillage 3D est automatiquement généré à partir des limites du modèle puis celui-ci est raffiné en ajoutant des cellules inactives et en raffinant le maillage. Le maillage est composé de 280 colonnes et 93 lignes pour un total de 130200 éléments rectangulaires répartis sur 5 couches.

La discrétisation verticale divise le modèle 3D en 5 couches correspondant aux différentes unités lithologiques rencontrées soit : la tourbe (couche 1), l'argile et silt (couche 2), le till glaciaire (couche 3), le roc fracturé de

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE			Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant			Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001			Rév	Date	Page
				00	05 octobre 2016	13

surface (couche 1, 2, 3, 4) et le roc profond (couche 5). L'épaisseur des dépôts meubles a été déterminée à partir de la topographie du site et à partir des élévations mesurées dans les forages réalisés sur le site.

La topographie appliquée au modèle numérique est présentée à la figure 5. Deux vues en coupe du modèle sont présentées à la figure 6 à l'**Annexe A**.

5.3 Paramètres de modélisation et conditions frontières

La figure 6 à l'**Annexe A**, montre deux coupes transversales du modèle. Les figures 7 et 11 à l'**Annexe A** montrent la vue en plan de la distribution des différentes unités des dépôts meubles pour les couches 1 à 5.

Les principales unités représentées dans le modèle et leurs propriétés hydrauliques calibrées sont décrites comme suit :

- Une couche de sols organiques d'épaisseur variable, présente sur le domaine est limitée par les crêtes rocheuses au nord et au sud, avec une conductivité hydraulique de 1×10^{-5} m/s sans anisotropie verticale.
- Une couche d'argile et silt à laquelle une conductivité hydraulique horizontale de 5×10^{-6} m/s avec une anisotropie verticale de 100 a été assignée.
- Une couche de till glaciaire à laquelle une conductivité hydraulique horizontale de 5×10^{-6} m/s sans anisotropie verticale a été assignée.
- Une couche de roc fracturé, le roc fracturé que l'on retrouve au niveau des crêtes et boutons rocheux et du roc de surface a été représentée en une seule unité de conductivité hydraulique de 1×10^{-7} m/s sans anisotropie.
- Le roc fracturé est suivi d'un roc peu fracturé en profondeur, qui est généralement caractérisé par une perméabilité plus faible, mais localement peut être fracturé et représenté en une seule unité de conductivité hydraulique de 7×10^{-9} m/s sans anisotropie. En profondeur, un roc sain représenté en une seule unité de conductivité hydraulique de 5×10^{-9} m/s sans anisotropie est identifié.

Le tableau 5-1 résume les différents paramètres hydrauliques du modèle calibré.

Tableau 5-1 Conductivités hydrauliques du modèle hydrogéologique calibré

	Unités lithologiques					
	Tourbe (blanc)	Argile (vert)	Till (turquoise)	Socle rocheux de surface (rouge)	Socle rocheux moyen (rose)	Socle rocheux (bleu)
K_x (m/s)	1E-05	5E-06	5E-06	1E-07	7E-09	5E-09
K_y (m/s)	1E-05	5E-06	5E-06	1E-07	7E-09	5E-09
K_z (m/s)	1E-05	5E-08	5E-06	1E-07	7E-09	5E-09
Anisotropie	1	100	1	1	1	1
Recharge (mm/an)	8	8	8	25	0	0

Les conditions frontières simulant le système hydrogéologique naturel sont les suivantes :

- Dans les dépôts meubles et le roc, des conditions frontières de charge hydraulique constante ont été appliquées le long du réservoir Opinaca (voir les figures 14 et 15 à l'**Annexe A**). Une condition de charge constante de 215,8 m correspondant au niveau maximum d'opération y a été assignée car d'après les informations reçues sur le mode d'opération du réservoir, le niveau maximum est conservé du printemps à

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Préparé par : G. Cosset Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	14

l'automne ce qui correspond au principale période d'écoulement de l'eau souterraine. Le calcul des gradients entre les niveaux minimum et maximum du réservoir Opinaca et le forage F-08-14 donne respectivement des gradients de 0,6 % et de 1 % ce qui suggère un gradient d'écoulement local plus important avec un niveau maximal de réservoir. Ce niveau correspond aussi probablement au niveau du réservoir pendant le relevé réalisé en avril 2010 qui a permis de calibrer le modèle. Finalement l'analyse de sensibilité présentée à la section 6.1 vient confirmer cette hypothèse de travail. Ce niveau d'opération amène la limite du réservoir Opinaca plus près du PAR et ainsi représente un cas conservateur (récepteur plus près des infrastructures et gradient hydraulique calculé plus important).

- Aucune condition frontière n'a été appliquée à la limite nord, sud et est du modèle puisque ce sont des frontières imperméables (débit nul).
- Une condition de rivière a été assignée au niveau du ruisseau (voir figure 14). La configuration du ruisseau a été assignée de façon arbitraire à partir d'information provenant de personne ayant visité le site (profondeur de 0,5 m et une largeur de 1 m). La conductance a été calibrée par processus itératif (5 m²/jour) à partir de la carte piézométrique aux abords du ruisseau.
- La recharge dans le modèle numérique est appliquée à la première couche du modèle et varie en fonction des unités lithologiques retrouvées en surface du modèle et de la topographie. La recharge calibrée par processus itératif est présentée au tableau 5-2 et à la figure 16. La recharge sur l'ensemble du modèle est relativement faible, ceci est en partie causé par les importantes zones de tourbières couvrant en grande partie la surface du domaine modélisé.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	15

Tableau 5-2 : Conditions frontières appliquées au modèle des conditions initiales pour les infrastructures de la mine

Paramètre	Type de condition frontière	Valeur	Couche
Réservoir Opinaca	Charge constante	215,8 m Niveau maximum d'opération	1-5
Ruisseau	Rivière	Largeur 1 m Profondeur 0,5 m Conductance 5 m ² /jour	1
Recharge	Crêtes et boutons rocheux	25 mm/an	1
	Vallée	8 mm/an	

5.4 Processus de calage du modèle hydrogéologique

Le modèle piézométrique est ajusté grâce aux paramètres hydrogéologiques existants afin de vérifier qu'il reproduit bien le réseau d'écoulement et les charges hydrauliques mesurées sur le terrain par Golder en 2010 à partir des données d'entrée et des conditions limites appliquées au modèle (ASTM D5981-96, 2002). Le calage du modèle hydrogéologique a été réalisé en modifiant principalement les conductivités hydrauliques des différentes unités et de la recharge de la surface. Le but de la calibration est de déterminer un ensemble de paramètres entrants du modèle qui minimise la différence entre les charges hydrauliques simulées et mesurées. Le paramètre de calibration choisi pour l'étude est l'erreur NRMSE calculée à l'aide de l'équation 1. Une erreur NRMSE inférieure à 15% est généralement acceptée par l'industrie.

L'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) :

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

Où:

N: nombre total d'observations

h_s : charge hydraulique simulée [m]

h_m : charge hydraulique mesurée [m]

h_{max} : charge hydraulique mesurée maximum [m]

h_{min} : charge hydraulique mesurée minimum [m]

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	16

6.0 RÉSULTATS DE MODÉLISATION - MODÈLE DE BASE DES CONDITIONS INITIALES

Les simulations des conditions initiales représentant les conditions d'écoulement observées avant la mise en place du parc à résidus au site ont été réalisées en régime permanent et en écoulement saturé.

Les charges hydrauliques initiales (requis par Modflow même pour une simulation en régime permanent) correspondent à la carte piézométrique déterminée grâce au relevé réalisé en 2010. Les charges hydrauliques initiales pour les dépôts meubles et pour le roc profond sont présentées à la figure 17 à l'**Annexe A**.

Tableau 6-1 : Points d'observations utilisés pour la calibration du modèle

Forage	X	Y	Z	Élévation moyenne de la lanterne	Élévation de l'eau	Unité interceptée
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
F-08-01R	424639,64	5841416,99	228,60	219,58	225,93	Socle rocheux
F-08-01T	424638,5	5841418,71	228,80	226,70	226,25	Sable
F-08-02T	425072,62	5840733,66	221,75	222,55	221,25	Sable
F-08-03T	424528,81	5841142,1	222,80	215,35	221,94	Sable
F-08-03A	424531,26	5841142,66	222,80	220,50	221,59	Argile
F-08-04A	424396,9	5840737,85	217,70	225,88	217,36	Argile
F-08-04R	424401,05	5840738,56	217,60	222,00	217,4	Socle rocheux
F-08-05A	423786,66	5840875,54	222,67	223,40	221,75	Argile
F-08-05T	423785,97	5840873,29	222,70	221,35	221,6	Sable
F-08-08A	423222,14	5840481,4	218,76	222,40	217,03	Argile
F-08-08T	423220,26	5840482,72	218,78	220,23	217,03	Sable
F-08-09A	423521,02	5840135,91	216,43	225,30	216,13	Argile
F-08-09T	423520,67	5840134,94	216,48	220,05	216,31	Sable
F-08-10R	423552,41	5839859,92	236,94	225,85	235,76	Socle rocheux
F-08-12R	422917,57	5840593,1	222,16	223,10	221,25	Socle rocheux
F-08-12T	422919,17	5840592,47	222,12	226,35	221,26	Argile
F-08-14A	423071,77	5840365,13	217,74	222,10	216,99	Argile
F-08-14T	423070,89	5840366,94	217,81	214,68	216,81	Sable
F-10-59T	423377,93	5840684,19	219,38	205,82	218,2	Till glaciaire
F-10-60R	423519,08	5840476,8	219,12	214,09	218,39	Socle rocheux
F-10-64C	423449,47	5840590,72	219,26	206,65	217,92	Sable
F-10-78R	423603,05	5840305,43	217,49	225,25	216,7	Socle rocheux
F-10-79T	423859,05	5840496,59	217,15	221,65	217,22	Sable
F-10-80C	424082,15	5840663,44	217,44	221,00	217,4	Sable/Socle rocheux
F-10-81R	424541,16	5840931,89	224,23	225,75	223,48	Socle rocheux
F-10-82R	424772,27	5841243,34	221,48	226,05	221,35	Socle rocheux
F-10-83C	424019,8	5840454,29	217,26	225,20	216,94	Sable/Socle rocheux

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
			Rév	Date	Page
	628178-4000-4EER-0001		00	05 octobre 2016	17

Les résultats du modèle indiquent que la piézométrie créée par le modèle numérique correspond au patron d'écoulement et les charges hydrauliques déterminées par l'analyse des données de terrain collectées avant la mise en place du PAR. La piézométrie simulée pour les couches 1 à 5 est présentée aux figures 18 à 22 de l'**Annexe A**.

Les niveaux d'eau des 28 points d'observation utilisés pour la validation du calage du modèle, sont présentés au tableau 6-1 et leur localisation est montrée à la figure 17 de l'**Annexe A**. Les résultats du calage sont présentés au tableau 6-2 et donnent un NRMSE (erreur quadratique moyenne normalisée) de 5,44% indiquant que le calage du modèle obtenu est adéquat et représente bien les conditions observées sur le terrain. La charge hydraulique sur l'ensemble du site varie de 216,1 m à 235,8 m. L'erreur moyenne absolue sur le modèle est de 0,198 m ce qui représente une erreur moyenne pondérée de 1,2 %. La figure 24 à l'**Annexe A** est une comparaison entre les charges hydrauliques mesurées sur le terrain versus celles calibrées et indique que celle-ci sont toutes dans le même ordre de grandeur, s'alignent uniformément le long de la courbe unitaire et se positionnent entre les deux courbes rouges pointillées représentant une erreur de 10%.

Tableau 6-2 Erreurs obtenues pour le calage du modèle hydrogéologique

Paramètre	Erreur sur le modèle calibré	Valeurs acceptables
NRMSE (%)	5,44 %	10-15 %

6.1 Étude de sensibilité du modèle

L'étude de sensibilité permet de vérifier que les paramètres du modèle calibré par processus itératifs correspondent bien à la meilleure représentation du système d'écoulement et que l'erreur sur le modèle est minimale. Cette étude permet aussi de déterminer quels paramètres ont le plus d'influence sur la solution du modèle. L'étude de sensibilité a été réalisée sur les paramètres ayant fait l'objet de modifications durant la phase de calibration du modèle et ceux présentant une plus grande variation dans les données d'entrée soient la conductivité hydraulique de la tourbe, du roc profond, de la recharge et de la condition frontière amont. Ces quatre paramètres ont été augmentés et diminués lorsque possible à partir des valeurs mesurées sur le terrain pour voir leurs effets respectifs sur la solution (ASTM D5611-95, 2002). La conductivité hydraulique de la tourbe a été diminuée à 1×10^{-6} m/s, valeur mesurée sur le terrain par Qualitas. La conductivité hydraulique du roc a été augmentée à 1×10^{-8} m/s puis diminuée à 3×10^{-9} m/s. La recharge appliquée a été divisée par 2 et multipliées par 1.6 (valeurs de recharge maximales acceptées par le modèle). Les détails des analyses de sensibilité et les résultats obtenus sont présentés au tableau 6-2.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE			Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant			Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001			Rév	Date	Page
				00	05 octobre 2016	18

Tableau 6-3 : Résultats de l'analyse de sensibilité

Paramètre				Erreur RMSE	
Conductivité Hydraulique	Unité	Kh (m/s)	Kv (m/s)	RMSE (%)	
	Tourbe	1,00x10 ⁻⁰⁵	1,00x10 ⁻⁰⁵	5,44	
		1,00x10 ⁻⁰⁶	1,00x10 ⁻⁰⁶	10,08	
		5,00x10 ⁻⁰⁵	5,00x10 ⁻⁰⁵	∅ convergence	
	Roc profond	1,00x10 ⁻⁰⁸	1,00x10 ⁻⁰⁸	20,94	
		3,00x10 ⁻⁰⁹	3,00x10 ⁻⁰⁹	6,00	
		5,00x10 ⁻⁰⁹	5,00x10 ⁻⁰⁹	5,44	
	Recharge	Crête (mm/an)	Vallée (mm/an)		
16		40	9,13		
10		25	5,44		
5		12,5	9,85		
Condition frontière au réservoir	Charge constante (m)		RMSE (%)		
	212,8		7,52		
	215,8		5,44		

Les résultats de l'analyse de sensibilité montrent que le calage du modèle réalisé est optimal avec un NRMSE de 5,44 %, ce qui est la valeur la plus faible de tous les cas présentés dans l'analyse de sensibilité. Le paramètre le plus sensible du modèle est la recharge. La recharge appliquée sur le modèle est relativement faible et on observe qu'une faible augmentation ou diminution de celle-ci augmente le NRMSE à plus de 9 %. Ceci s'explique par les conductivités hydrauliques verticales peu perméables de toutes les unités de surface et le degré de saturation élevée de ces mêmes unités de surface. La tourbe de surface et le socle rocheux profond sont aussi des paramètres sensibles du modèle et ont un impact important sur l'objectif de la modélisation numérique. En augmentant la conductivité hydraulique du socle rocheux d'un demi-ordre de grandeur, on observe que l'erreur est multipliée par 4. Finalement, l'utilisation du niveau maximum d'opération du réservoir Opinaca favorise la convergence du modèle.

7.0 ÉVALUATION DES DÉBITS D'EXFILTRATION AU TRAVERS DE LA GÉOMEMBRANE

Cette section décrit l'étape intermédiaire requise afin d'intégrer le parc à résidus au système d'écoulement régional. La taille du modèle régional d'écoulement de l'eau souterraine est trop étendue pour intégrer le détail d'une géomembrane HDPE de 2 mm d'épaisseur et ainsi le problème est traité en deux systèmes distincts :

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	19

- Le système de la pile de résidus installée sur une géomembrane HDPE avec le développement d'une charge hydraulique au sein du PAR ;
- Le système d'écoulement souterrain régional modifié par l'excavation de tourbe et de roc et l'ajout de tapis drainant sous le parc.

Le système de la pile de résidus permet de calculer à l'aide des niveaux piézométriques au sein du PAR et du modèle empirique de Giroud (1994), les débits d'exfiltrations au travers de possibles perforations d'une géomembrane. Ce débit est appliqué à l'empreinte du parc à résidus dans le système d'écoulement modifié afin d'évaluer les panaches de contamination.

Dans le cadre des travaux de modélisation réalisés en 2012, un modèle 3D de la pile de résidus avait été réalisé pour déterminer les niveaux piézométriques attendus au sein du parc en fonction de différent taux d'infiltration (2% et 8%) afin d'évaluer les débits d'exfiltrations au travers de la géomembrane. Les principales hypothèses utilisées pour ce modèle sont présentées au tableau 7-1. La conductivité hydraulique des résidus, a été déterminée à partir d'essais de conductivité hydraulique en cellule triaxiale réalisés en laboratoire (SNC-Lavalin, 2012) à des contraintes effectives représentant les conditions de terrain pour des profondeurs variables dans le PAR. La valeur de $2,7 \times 10^{-8}$ m/s, correspond à une pression de préconsolidation pour le tiers inférieur de la pile de résidus (SNC-Lavalin, 2012).

Tableau 7-1 : Principaux paramètres utilisés dans le modèle d'écoulement souterrain du PAR (SNC-Lavalin, 2012)

Paramètres		Valeurs	Source
Conductivité hydraulique	Résidus	$2,7 \times 10^{-8}$ m/s	Essais réalisés par SLI
Géométrie du parc	Topographie empreinte du futur parc	216 à 220 m	SLI (2011b)
	Digue ouest	220 m	
	Digue est	230 m	
	Hauteur de résidus (au centre)	265 m	
	Aire	80 hectares	
	Fondation du parc	Drain de 0,5 m de sable et gravier sur argile	SLI (2011b)
	Géomembrane	PEHD 1,5 mm	
	Drain de pourtour du PAR	Drain français de 1,5 m de profondeur	SLI (2011b)

Une recharge différente du reste du modèle doit être attribuée aux cellules représentant la couche de drainage située sous le parc à résidus. Cette recharge est le résultat des fuites de lixiviat au travers des éventuels défauts dans la géomembrane imperméabilisant le fond du parc. Giroud et al. (1994) ont établi que la fréquence des défauts est de l'ordre de 2,5 défauts de 100 mm² par hectare pour une géomembrane placée avec un bon contrôle

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
			Rév	Date	Page
	628178-4000-4EER-0001	00	05 octobre 2016	20	

qualité. Comme le parc à résidus couvrira une superficie de 80 ha, 200 défauts sont considérés pour le calcul du débit total de fuite provenant du parc.

L'équation de Giroud pour un système composite (Erickson et al., 2002) est inversée afin de représenter le cas actuel (résidus fin au-dessus de la géomembrane et drain de sable et gravier sous celle-ci):

$$Q_{GM} = C \times [1 + 0.1 \times (h_w/t)^{0.95}] \times a^{0.1} \times h_w^{0.9375} \times k_s^{0.74} \quad [\text{eq. 2}]$$

où

C : facteur relié à la qualité du contact entre la géomembrane et la couche de matériau fin (i.e. les résidus miniers), considéré égal à 0,01;

$t=h_w$: hauteur d'eau dans le parc [m]

a : est l'aire du défaut [m]

k_s : est la conductivité hydraulique des résidus [m/s].

La hauteur d'eau dans le parc est déterminée à partir du modèle d'écoulement du parc à résidus présenté plus tôt. Pour ce calcul, l'élévation moyenne du fond du parc à résidus (≈ 220 m) est soustraite à la hauteur de nappe moyenne dans le parc ($\approx 238,9$ m). Cette approche est conservatrice puisque le niveau d'eau en périphérie du parc, qui se trouve quelques mètres au-dessus du fond du parc et qui diminue ainsi la charge hydraulique dans celui-ci, n'est pas considéré.

L'équation présentée permet d'obtenir un débit de fuite par défaut de l'ordre de $1,73 \times 10^{-7}$ m³/s, soit un débit total pour l'ensemble du parc de l'ordre de $3,45 \times 10^{-5}$ m³/s, soit environ 1 090 m³/an. Étant donné que la distribution des défauts est aléatoire, ce débit est distribué de façon uniforme sur l'ensemble de la superficie du parc à résidus. Le taux de recharge moyen obtenu, pour les cellules correspondant à l'empreinte du parc, est de $4,32 \times 10^{-11}$ m/s, soit un peu plus de 1,4 mm par an. Le tableau 7-2 présente les résultats pour deux infiltrations selon deux charges hydrauliques. Plus de détails peuvent être trouvés dans SNC-Lavalin (2012) et à l'**Annexe B**.

Tableau 7-2 : Résultats du calcul de Giroud pour deux infiltrations différentes

Infiltration	K	Nappe moyenne	Δh dans le modèle de la pile	Débit par trou	Débit total		
	m/s	m	m	m ³ /s	m ³ /m ² /s	l/m ² /jr	mm/an
2%	$2,70 \times 10^{-08}$	235,7	15,7	1,45E-07	3,63E-11	0,0031	1,1
8%	$2,70 \times 10^{-08}$	238,9	18,9	1,73E-07	4,32E-11	0,0037	1,4

8.0 MODÈLE NUMÉRIQUE INCLUANT LE PARC À RÉSIDUS

Le modèle calibré est utilisé comme condition de départ pour développer un modèle numérique réaliste intégrant le parc à résidus grâce aux débits d'exfiltration calculés à l'aide du modèle empirique de Giroud et présenté à la section précédente.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
			Rév	Date	Page
	628178-4000-4EER-0001		00	05 octobre 2016	21

8.1 Modifications au modèle numérique

La topographie du modèle numérique calibré a été modifiée pour intégrer l'assise du parc à résidus et du bassin de collecte au modèle d'écoulement régional. La topographie sous le parc à résidus est tirée de la conception prévue de ces ouvrages. De plus, la couche de tourbe au niveau de l'empreinte du parc a été diminuée à une épaisseur d'environ 0,5 m et une conductivité hydraulique égale à 5×10^{-5} m/s lui a été assignée pour représenter la couche drainante servant d'assise au parc. Un drain au centre de cette zone a aussi été représenté par une zone présentant une conductivité hydraulique de 5×10^{-4} m/s. Il était difficile d'assigner des conductivités hydrauliques plus élevées à ces zones, car des différences de conductivité hydraulique trop importantes nuisent à la convergence du modèle. À l'extrémité ouest du parc à résidus, la topographie a été modifiée pour représenter le bassin de collecte des eaux s'exfiltrant du parc à résidus.

La vue en plan et les coupes du modèle numérique 3D incluant le PAR sont montrées à la figure 25 de l'**Annexe A**.

Au niveau de l'empreinte du parc, il a été attribué à la recharge la valeur de 1,4 mm/an qui correspond à l'eau qui s'exfiltrera du PAR.

8.2 Résultats du modèle du parc à résidus

La piézométrie dans les couches 1 à 5 du modèle est présentée aux figures 26 à 30 de l'**Annexe A**. On observe que les niveaux piézométriques diminuent sous l'empreinte du PAR et en aval de celui-ci, et ceci en particulier pour les couches 1 et 2 de surface. Ceci s'explique par la diminution de la recharge au niveau de l'empreinte du PAR, passant de 8 mm/an à 1,4 mm/an.

Le suivi des niveaux piézométriques dans les puits PO-PAR01, PO-PAR04, PO-PAR14 et PO-PAR15 présentés à la figure 35, n'indique pas de tendance à la baisse suite depuis le début des opérations du PAR en octobre 2014. La dernière mesure de suivi date du 22 août 2015 et ainsi il est fort probablement trop tôt pour détecter un impact de la construction du PAR et de l'imperméabilisation d'une partie du site sur le niveau piézométrique des puits avoisinants.

9.0 TRANSPORT DES CONTAMINANTS

9.1 Méthodologie

La modélisation du transport des contaminants a comme objectif de simuler l'impact sur la qualité de l'eau souterraine du PAR. Le modèle d'écoulement souterrain incluant le PAR et développé avec Visual Modflow est utilisé dans le module MT3DMS pour réaliser le transport de contaminant. Les sections suivantes présentent un sommaire des travaux de modélisation réalisés en 2012 pour la Phase 1, le suivi réalisé au site entre 2012 et 2016 qui a permis de bonifier les données de base pour le transport dans le cadre de ces travaux et finalement, les paramètres de transport du modèle.

9.2 Travaux réalisés dans le cadre de la demande de Certificat d'autorisation de la Phase 1

Dans le cadre de la demande de certification d'autorisation pour la construction de la phase 1, les caractéristiques géochimiques des résidus ont été déterminées sur la base d'un échantillon de résidus désulfurés produit en usine pilote par SGS Lakefield. L'échantillon testé a été produit à partir d'un échantillon de minerai provenant de l'affleurement Roberto.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	22

La concentration à la source en métaux est déterminée à partir des résultats obtenus dans les essais statiques (TCLP, SPLP, CTEU9) et les essais cinétiques en cellules humides réalisés en laboratoire sur les résidus miniers. Les essais statiques TCLP, SPLP et CTEU9 donnent respectivement des concentrations en arsenic de 0,34 mg/L, 0,36 mg/L et 0,88 mg/L (SLI, 2011c).

Un essai en cellule humide d'une durée de 30 semaines a été réalisé et le graphique de l'évolution de la teneur en arsenic dans le temps est présenté à la figure 33 de l'**Annexe A**. Les premières semaines de l'essai cinétique en cellule humide (i.e. lorsque les concentrations sont les plus élevées) indiquent une concentration maximale de 0,115 mg/L d'arsenic et qui décroît par la suite à une concentration stable d'environ 0,02 mg/L après quelques semaines.

Pour la modélisation géochimique de la Phase 1, une valeur de concentration à la source en arsenic de 0,46 mg/L a été utilisée ce qui correspondait à 4 fois la concentration maximale observée en cellule et environ à la moyenne des résultats des essais statiques. Cette valeur était considérée comme conservatrice puisqu'elle est de 4 fois supérieures à la concentration maximale observée en cellule humide qui devrait être la concentration la plus représentative des conditions de terrain.

9.3 Suivi au site du PAR de la mine Éléonore

Entre 2012 et 2016, des travaux de suivi dans le cadre de la détermination des teneurs de fond et dans le cadre de l'exploitation du PAR ont été réalisés. Ces données permettent de compléter les travaux de modélisation qui ont été réalisés en 2012.

- ❑ Le suivi de la qualité de l'eau souterraine au site de la mine Éléonore est réalisé depuis avril 2011 sur le piézomètre PO-PAR04-R et depuis juillet 2014 sur les piézomètres PO-PAR01-R et PO-PAR01-T, PO-PAR04-A, PO-PAR14-A et PO-PAR14-T PO-PAR14-R, PO-PAR15-A, PO-PAR15-R et PO-PAR15-T. Les résultats de suivi en arsenic et des niveaux d'eau sont présentés au tableau 9-3 et leur évolution dans le temps aux figures 34 et 35 de l'**Annexe A**.
- ❑ Des essais statiques SPLP, TCLP de caractérisation des résidus sont réalisés sur des échantillons de résidus miniers concentrés en sulfures et sur des échantillons de résidus miniers désulfurés collectés suite au procédé de désulfuration.
- ❑ La géochimie de l'eau du bassin de collecte, de l'eau du ruissellement de la pile de résidus et de la pile de stériles est régulièrement analysée.

9.4 Détermination des paramètres de transport

Les données de géochimie utilisées lors des travaux de modélisation réalisés pour la Phase 1 et celles collectées de 2012 à 2016 sont utilisées pour déterminer les teneurs de fond et les concentrations à la source du modèle. Les essais de caractérisation des résidus miniers réalisés depuis le début des opérations sont résumés dans ce qui suit et au tableau 9-1 :

- ❑ Les essais TCLP réalisés sur des échantillons de rejet de concentrateur désulfuré indiquent des dépassements du critère de résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts (RESIE) en aluminium, arsenic, chrome (4 dépassements), cuivre, cyanure disponible (4 dépassements), nickel, plomb (5 dépassements) et zinc (7 dépassements).
- ❑ Les essais SPLP réalisés sur des échantillons de rejet de concentrateur désulfuré indiquent des dépassements du critère RESIE en arsenic, cyanure disponible (10 dépassement), mercure (5 dépassements) et plomb (1 dépassement).

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001		Rév	Date	Page
			00	05 octobre 2016	23

Tableau 9-1 : Résumé des dépassements du critère RESIE lors des essais TCLP et SPLP réalisés sur des échantillons de résidus désulfurés

Échantillon	Essai	Critère Résie
Rejet de concentrateur – désulfure	TCLP (20 échantillons analysés)	aluminium arsenic chrome (4 dépassements) cuivre cyanure disponible (4 dépassements) nickel plomb (5 dépassements) zinc (7 dépassements)
	SPLP (20 échantillons analysés)	arsenic cyanure disponible (10 dépassement) mercure (5 dépassements) plomb (1 dépassement)

À partir des résultats obtenus lors des essais TCLP (condition à pH acide) et des essais SPLP (condition à pH neutre) réalisés sur les échantillons de rejet de concentrateur désulfuré, l'arsenic a été identifié, en accord avec le client, comme le seul paramètre à modéliser pour le transport de contaminant puisqu'il est le seul élément à lixivier en condition de pH acide et neutre au dessus du critère RESIE.

9.4.1 Critères applicables

Aucune prise d'eau potable ou potentiel aquifère significatif n'est connue en aval hydraulique du PAR de la mine Éléonore. Ainsi, le critère actuellement applicable et retenu aux fins de notre évaluation correspond au critère de résurgences dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts (RESIE) du MDDELCC. La valeur pour le critère RESIE ainsi que celle pour le critère à des fins de consommation humaine (EC) sont présentées au tableau 9-2. Mentionnons que le critère EC est indiqué à titre indicatif seulement.

Tableau 9-2 : Critères prescrits par le MDDELCC pour les concentrations en contaminants dans l'eau souterraine en fonction du milieu récepteur

Paramètre	Critère d'eau souterraine (mg/L)	
	Résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts (RESIE)	Aux fins de consommation humaine – Eau Potable (EC)
Arsenic	0,34	0,025

9.4.2 Teneurs de fond et concentrations initiales au site

Afin de procéder à la modélisation de transport de contaminants, il est généralement nécessaire de prendre en considération l'état du site et déterminer les teneurs de fond locales des eaux souterraines avant la mise en place du parc à résidus.

Les résultats du suivi en arsenic présenté au tableau 9-3 montrent que seul le piézomètre PO-PAR14 indique une teneur en arsenic au-dessus de la limite de détection (0,0005 mg/L) et ce pour une valeur moyenne de 0,0022 mg/L dans l'unité d'argile, de 0,0017 mg/L dans l'unité de till et de 0,0153 dans l'unité de socle rocheux. En 2015,

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset	
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger	
			Rév	Date
628178-4000-4EER-0001		00	05 octobre 2016	24

aucune concentration en arsenic supérieure à la limite de détection n'a été mesurée. Ainsi, aucune teneur de fond en arsenic n'a été considérée dans le modèle de transport. De plus, les données collectées ne permettent pas de statuer sur un possible panache qui se serait développé entre octobre 2014 et 2016. Cette observation est conforme aux résultats des simulations prédictives indiquées dans le modèle de transport développé précédemment.

Tableau 9-3 : Résultats du suivi de la qualité de l'eau souterraine au PAR (concentration en arsenic et niveau piézométrique)

Date	Commentaire	PO-PAR01-R		PO-PAR01-T		PO-PAR04-A		PO-PAR04-R		PO-PAR14-A		PO-PAR14-R		PO-PAR14-T		PO-PAR15-A		PO-PAR15-R		PO-PAR15-T		
		[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	[As-Dis] mg/L	Élévation de l'eau m	
16-avr-2011	Niveau de glace								217,60													
20-mai-2011	Niveau de l'eau								217,51													
01-juin-2011									217,45													
16-juil-2011	Développement du puits								217,33													
23-juil-2011	Baseline 1							<0,0005	217,30													
13-août-2011	Baseline 2							<0,0005	217,28													
20-août-2011	Baseline 3							<0,0005	217,31													
11-sept-2011	Baseline 4							<0,0005	217,34													
17-sept-2011	Baseline 5							<0,0005	217,42													
02-oct-2011	Baseline 6							<0,0005	217,48													
09-oct-2011	Baseline 7							<0,0005	217,37													
06-nov-2011	Baseline 8							<0,0005	217,41													
12 oct, 2013			226,562		226,811		217,66		217,20		214,83				214,83							
11-avr-2014															215,25							
23-mai-2014																						
6 juil, 2014			226,002		226,231		217,25		217,20		215,44				214,72							
14 juil, 2014			226,082		226,821		217,57		217,25		214,74		213,97		214,4		213,78		212,83			212,84
23 juil, 2014	Baseline #1	<0,0005	225,772		226,551	<0,0005	217,55	<0,0005	217,13		214,52	0,0072	214,39	0,0056	214,85	<0,0005	213,95	<0,0005	213,43	<0,0005	213,37	
27 juil, 2014	Baseline #2	<0,0005	226,562	0,0028	227,151	<0,0005	217,54	0,001	217,25	0,006	214,12	0,0233	214,45	0,0038	215,22	<0,0005	214,04	<0,0005	213,4	<0,0005	213,44	
3 août 2014			226,572		226,721	<0,0005		0,001		0,0032	214,82	0,0343		0,002	218,6	<0,0005		<0,0005		<0,0005		
13 août 2014	Baseline #3	<0,0005	226,262		226,391	<0,0005	217,51	<0,0005	217,10	0,0032	218,62	0,0288	213,97	0,0009	215,07	<0,0005	213,47	0,0008	212,54	<0,0005	212,75	
20 août 2014	Baseline #4	0,0006	224,902		226,801	<0,0005	217,55	<0,0005	217,12	0,0017	214,86	0,0262	214,07	0,0023	214,95	<0,0005	213,31	<0,0005	211,83	<0,0005	212	
28 août 2014	Baseline #5	0,0007	226,142			0,0008	217,49	0,0011	217,09	0,0022	214,62	0,0146	213,92	0,0019	214,97	<0,0005	213,62	<0,0005	218,27	<0,0005	212,01	
18 sept, 2014	Baseline #6	<0,0005	225,762			<0,0005	217,48	0,0006	217,09	0,0029	214,8	0,0092	213,93	0,0005	214,91	<0,0005	213,32	<0,0005	211,87	<0,0005	212,04	
28 sept, 2014	Baseline #7	<0,0005	225,652			<0,0005	217,42	<0,0005	217,07	0,0017	214,76	0,0126	214,23	0,0005	214,92	<0,0005	213,34	<0,0005	211,61	<0,0005	212,1	
5 oct, 2014	Baseline #8	<0,0005	225,562			<0,0005	217,44	0,0006	217,11	0,0011	214,8	0,0107	214,03	<0,0005	214,99	<0,0005	213,63	<0,0005	212,06	<0,0005	212,26	
27-mai-2015							215,62		210,66	0,0007	214,13											
17-juin-2015		<0,0005	226	sec	sec	<0,0005	217,37	<0,0005	217,02	<0,0005	215,68	<0,0005	215,29	<0,0005	215,6	<0,0005	215,38	<0,0005	214,6	<0,0005	214,62	
22-août-2015		<0,0005	225	sec	sec	<0,0005	200(?)	<0,0005	217	<0,0005	215,24	<0,0005	214,74	<0,0005	215,28	<0,0005	214,9	<0,0005	213,9	<0,0005	213,36	
	Moyenne	0,0005		0,0028		0,0005		0,0006		0,0022		0,0153		0,0017		0,0005		0,0005		0,0005		
	Minimum	<0,0005		0,0028		<0,0005		<0,0005		<0,0005		<0,0005		<0,0005		<0,0005		<0,0005		<0,0005		
	Maximum	0,0007		0,0028		0,0008		0,0011		0,006		0,0343		0,0056		0,0005		0,0008		0,0005		

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset	
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger	
			Rév	Date
628178-4000-4EER-0001		00	05 octobre 2016	26

9.4.3 Détermination de la source de contamination

Les concentrations en arsenic minimum, moyenne et maximum de l'eau qui s'exfiltre de la pile de résidus et des stériles ainsi que la concentration en arsenic de l'eau au bassin de collecte sont présentées au tableau 9-4. On voit que l'eau qui s'exfiltre de la pile présente une concentration en arsenic minimum de 0,036 mg/L, moyenne de 0,20 mg/L et maximum de 0,34 mg/L. Les moyennes des résultats des essais statiques (analyse chimique, TCLP et SPLP) réalisés régulièrement sur des échantillons de résidus miniers désulfurés prélevés à l'usine de traitement du minerai entre mai 2015 et juillet 2016 sont présentées au tableau 9-5. Les lixiviats des essais TCLP présentent une concentration en arsenic minimum de 1,1 mg/L, moyenne de 2,6 mg/L et maximum de 6,1 mg/L. Une valeur maximale de 10,9 mg/L d'arsenic a été obtenue dans les essais TCLP sur un échantillon composite de rejet de concentrateur désulfuré en janvier 2016. Cette valeur est ponctuelle et les valeurs obtenues par la suite sont entre 2,3 et 4,0 mg/L.

Lors des travaux de modélisation réalisés dans le cadre de la construction de la phase 1, le résultat de l'essai TCLP disponible à ce moment là avait été réalisé sur un échantillon de résidus désulfurés issus d'essais métallurgiques en usine pilote et indiquait une teneur en arsenic moyenne de 0,34 mg/L. Le résultat de l'essai SPLP était de 0,36 mg/L. Ainsi, on note que les résultats des essais de lixiviations sur les résidus déposés actuellement montrent une concentration en arsenic dans leur lixiviat plus importante qu'initialement prévue. Ceci serait probablement attribuable au fait que les essais avaient été effectués sur des échantillons de résidus miniers représentatifs mais dont la constitution n'est pas identique à celle des résidus actuels et que le procédé de désulfuration n'est actuellement pas aussi efficace que prévu.

Un essai en cellule humide de 30 cycles de mouillage-séchage a été réalisé sur le même échantillon de résidus miniers désulfurés provenant de l'usine pilote. Il montre que la lixiviation de l'arsenic passe de 0,115 mg/L au premier cycle, à 0,0162 mg/L au dernier cycle ce qui indique que le taux de production devrait décroître avec le temps (voir figure 33). Par contre, cette décroissance ne sera pas considérée étant donné qu'il résulte d'un unique essai sur un échantillon de résidus désulfurés.

Au vu de toutes ces données géochimiques, deux scénarios ont été sélectionnés :

- Cas 1 (de base) – concentration source de 0,46 mg/L tel qu'il a été simulé lors des travaux de modélisation de 2012 et correspondant à la concentration moyenne en arsenic des essais TCLP, SPLP et CTEU9 de 2012 et environs à la concentration en arsenic maximum mesurée à la sortie de la pile de résidus miniers.
- Cas 2 – concentration source de 2,8 mg/L correspondant environs à la concentration moyenne en arsenic des essais TCLP et SPLP réalisés sur des échantillons de résidus miniers désulfurés sortant de l'usine depuis octobre 2014.

Tableau 9-4 : Teneur en arsenic dans les eaux de ruissellement au PAR

Point de mesure	Concentration en arsenic		
	Minimum (mg/L)	Maximum (mg/L)	Moyenne (mg/L)
Eau du bassin de collecte du PAR	0,0006	0,44	0,03
Eau de ruissellement des résidus de la phase 1	0,036	0,34	0,20
Eau de ruissellement de la halde à stérile du PAR	<0,0005	0,023	

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
			Rév	Date	Page
	628178-4000-4EER-0001		00	05 octobre 2016	27

Tableau 9-5 : Teneur en arsenic des résidus miniers désulfurés déterminée par essais statiques

Résidus	Type essai	Minimum (mg/L)	Maximum (mg/L)	Moyenne (mg/L)	Nombre d'essai
Rejet de concentrateur-désulfuré	Analyse chimique (mg/kg)	29.2	2850.0	1137.3	68
	TCLP (mg/L)	1.3	10.9	3.2	19
	SPLP (mg/L)	1.1	6.1	2.6	20
Rejet de concentrateur-concentré de sulfure	Analyse chimique (mg/kg)	7469.0	28165.0	14760.1	26
	TCLP (mg/L)	0.1	12.9	2.3	20
	SPLP (mg/L)	0.1	9.2	2.4	20

9.4.4 Description du modèle de transport

Les paramètres de transport tels que la porosité effective, la dispersivité longitudinale, le poids volumique apparent et le coefficient de distribution (K_d) sont introduits dans le module MT3DMS pour chaque contaminant et chaque couche. Les paramètres sont donnés dans le tableau 9-6, excepté pour le coefficient de partition qui est discuté plus bas.

- La dispersion hydrodynamique en une dimension (D_x) s'exprime par la relation suivante (Domenico et Schwartz, 1997) :

$$D_x = \alpha_x v_x + D^*$$

Où α_x est la dispersivité du milieu, v_x est la vitesse d'écoulement des eaux souterraines et D^* est le coefficient moléculaire du contaminant dans le milieu. Le phénomène de diffusion moléculaire est généralement négligeable par rapport aux autres phénomènes et ne sera pas considéré.

Trois éléments définissent la dispersivité d'un contaminant dans un milieu soit la dispersivité longitudinale (α_L), la dispersivité transversale (α_T) et la dispersivité verticale (α_V). La dispersivité longitudinale (α_L) est considérée égale à 10% de la longueur de parcours calculée entre le milieu du parc et le réservoir Opinaca (approximativement 1000 m) et les dispersivités transversale et verticale sont respectivement égales à 10% et 1% de la dispersivité longitudinale (selon Spitz et Moreno, 1996).

Les valeurs de dispersivité utilisées pour les simulations numériques sont plus faibles que celles utilisées dans le modèle de 2012 parce que le niveau d'opération maximale du réservoir de 215,8 m réduit la distance entre le parc et ce récepteur.

- Aucune réaction chimique et donc de dégradation n'a été considérée pour une approche conservatrice.
- L'adsorption de l'arsenic est introduite dans le modèle avec le coefficient de partition des métaux K_d aussi connu sous le nom de coefficient de distribution de l'adsorption. Les contaminants métalliques dissous dans l'eau souterraine subissent des réactions avec la surface des solides avec lesquels ils entrent en contact. Les réactions d'adsorption réfèrent aux réactions dans lesquelles un métal est lié à la matrice d'un solide. Le métal qui est lié est dit adsorbé. Par définition, le coefficient K_d est le ratio de la concentration de métaux adsorbés (en mg de métal par kg de matériel sorbé) sur la concentration en métaux dissous à l'équilibre (en mg de métal par litre de solution) ;

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger		
			Rév	Date	Page
	628178-4000-4EER-0001	00	05 octobre 2016	28	

$$K_d = \frac{\text{Concentration de métaux adsorbés} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)}{\text{Concentration de métaux dissous} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}$$

Lorsque l'eau souterraine transporte des métaux dans le sol, l'adsorption des métaux sur les solides réduit la concentration en métaux dissous et affecte le taux de transport des métaux. Les valeurs K_d dans le sol, pour un métal donné, dépendent des paramètres géochimiques du sol et de l'eau interstitielle.

Comme aucun K_d n'a pu être mesuré sur le terrain à l'étude, des valeurs empiriques trouvées dans la littérature sont utilisées dans le modèle. Un rapport détaillé de l'USEPA sur le sujet (USEPA, 2005) indique que le K_d de l'arsenic varie de 2 L/kg à 20000 L/kg. Dans ce modèle, la valeur la plus faible de 2 L/kg a été utilisée.

- Le modèle de transport a été effectué avec le parc arrivé à pleine capacité à la fin de son exploitation avant les travaux de restauration et de fermeture. Ainsi, la tête d'eau utilisée pour calculer le débit d'exfiltration de Giroud qui passe au travers de possibles perforations de la géomembrane considère une recharge par les précipitations au sommet du parc sans géomembrane ou couche granulaire pour réduire l'infiltration.
- Les simulations ont été réalisées sur une période de 500 ans à partir de la fermeture du parc.
- Bien qu'un essai en cellule humide réalisé sur un échantillon de résidus miniers désulfuré obtenu en usine pilote ait montré une diminution par 10 de la concentration en arsenic en 30 cycles de mouillage-séchage, la concentration source a été conservée constante. Cette hypothèse est évidemment conservatrice.

Le tableau 9-6 présente les paramètres de transport de contaminants pour l'arsenic. Les hypothèses suivantes ont été considérées :

Tableau 9-6 : Paramètres de transport de contaminants

Couche	Épaisseur	Type	Conductivité hydraulique K_h, K_v (m/s)	Porosité effective n_{eff} (-)	Dispersivité longitudinale α_L (m)	Poids volumique apparent (g/cm ³)
1	0-5 m	Tourbe	$K_h=K_v= 1 \times 10^{-5}$	0,8	100	1121
	0,5 m	Assise de la géomembrane	$K_h=K_v= 1 \times 10^{-5}$	0,3	100	2242
	0-55 m	Roc	$K_h=K_v= 1 \times 10^{-7}$	0,01	100	2500
2	0-5 m	Argile	$K_h= 1 \times 10^{-6}$ $K_v= 1 \times 10^{-8}$	0,5	100	1681
		Roc	$K_h=K_v= 1 \times 10^{-7}$ à 7×10^{-9}	0,01	100	2500
3	0-12 m	Sable et gravier	$K_h=K_v= 1 \times 10^{-6}$	0,25	100	2242
		Roc	$K_h=K_v= 1 \times 10^{-7}$ à 7×10^{-9}	0,01	100	2500
4	15 m	Socle rocheux	$K_h=K_v= 1 \times 10^{-7}$ à 7×10^{-9}	0,01	100	2500
5	10-20 m	Roc profond	$K_h=K_v= 5 \times 10^{-9}$	0,01	100	2500

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
	628178-4000-4EER-0001	Rév	Date	Page
		00	05 octobre 2016	29

9.5 Résultats de simulations de transport

Le modèle de transport de contaminant a été simulé pour deux valeurs de concentrations en arsenic dans l'eau qui lixivie des résidus miniers désulfurés, soient 0,46 mg/L et 2,8 mg/L, déterminées à partir de la caractérisation des résidus miniers et du suivi réalisé au PAR de la mine Éléonore. Les sections suivantes présentent les résultats des simulations numériques pour les deux scénarios étudiés.

9.5.1 Panache de la concentration en arsenic - concentration source de 0,46 mg/L

Les figures 36 à 40 de l'**Annexe A** montrent le panache de contamination en arsenic à un 1 an, 100 ans, 250 ans et 500 ans, et ce, pour les couches 1 à 5.

- Après 500 ans, aucune concentration supérieure au critère RESIE n'a été observée pour l'ensemble des couches du modèle.
- Après 500 ans, des concentrations supérieures à 0,025 mg/L (critère EC) sont observées dans les couches 2 à 3 au niveau des boutons rocheux au centre-sud du PAR.
- À 100 ans, le panache au réservoir Opinaca, présente une concentration maximale de 0,00022 mg/L (couche 1).
- À 500 ans, le panache présente au niveau du réservoir Opinaca une concentration maximale de 0,0023 mg/L (couche 1).
- Le panache en arsenic dans le roc fracturé (couche 4) et profond (couche 5) atteint à 500 ans des concentrations respectives peu élevées de l'ordre de 0,001 mg/L et de 0,0001 mg/L.
- Le panache se disperse principalement dans les dépôts meubles.

9.5.2 Panache de la concentration en arsenic - concentration source de 2,8 mg/L

Les figures 41 à 45 de l'**Annexe A** montrent le panache de contamination en arsenic à un 1 an, 10 ans, 50 ans, 100 ans, 250 ans et 500 ans, et ce, pour les couches 1 à 5.

- À l'année 100, des concentrations supérieures au critère RESIE sont observées dans les couches 2 et 3 du modèle, au niveau du bouton rocheux situé au centre sud du parc, au sud-est et au nord. Toutefois, le panache simulé n'atteint pas le récepteur, le réservoir Opinaca, à des concentrations supérieures au RESIE.
- À 500 ans, le critère RESIE est atteint dans les couches 1, 2 et 3 du modèle au niveau du boutons rocheux situé au centre sud du parc, au sud-est et au nord. La concentration de 0,025 mg/L (critère de l'eau potable) est atteinte sur une superficie significative du parc. Toutefois, le panache simulé n'atteint pas encore le récepteur, le réservoir Opinaca, à des concentrations supérieures au RESIE.
- À 100 ans, le panache au réservoir Opinaca, présente une concentration simulée maximale de 0,0043 mg/L (couche 1) et qui est inférieure au RESIE.
- À 500 ans, le panache présente au niveau du réservoir Opinaca une concentration simulée maximale de 0,033 mg/L (couche 1), toujours sous le critère RESIE.
- Le panache en arsenic dans le roc fracturé (couche 4) et profond (couche 5) atteint à 500 ans des concentrations respectives peu élevées de l'ordre de 0,16 mg/L et de 0,0125 mg/L.
- Le panache se disperse principalement dans les dépôts meubles.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset	
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger	
			Rév	Date
628178-4000-4EER-0001		00	05 octobre 2016	30

9.5.3 Comparaison des panaches

Le panache de contamination obtenu pour une concentration de 0,46 mg/L, soit le cas de base, est consistant avec les résultats obtenus en 2012, bien que des concentrations plus importantes soient atteintes. Ceci s'explique en partie à cause du coefficient de dispersion qui est 2 fois plus élevé.

On observe que pour une concentration source de 2,8 mg/L, le panache de contamination simulé dans les couches 1, 2 et 3 est beaucoup plus étendu et présente des concentrations plus importantes que dans le cas de base simulé. Toutefois, le panache simulé pour 500 ans n'atteint pas le récepteur, le réservoir Opinaca, à des concentrations supérieures au RESIE.

10.0 LIMITES ET RECOMMANDATIONS

10.1 *Modèle hydrogéologique par méthode numérique*

Le modèle développé représente une version conservatrice du système hydrogéologique naturelle et du parc à résidus qui présente toutefois certaines limitations :

- Simplification de la grande variabilité de la stratigraphie avec des propriétés hydrauliques très différentes qui montre un comportement global et ne détaille pas les zones d'écoulement préférentielles dans les dépôts meubles.
- Le domaine modélisé est enclavé entre deux buttes rocheuses et comporte peu d'exutoires, ce qui rend la calibration du modèle sensible aux paramètres hydrauliques et à la recharge, nécessitant une augmentation des conductivités hydrauliques et une diminution de l'infiltration efficace. Il faut toutefois mentionner que cette localisation géologique est favorable au confinement de la contamination. D'autre part, l'augmentation de la conductivité hydraulique des unités hydrostratigraphiques rend le modèle conservateur puisqu'il favorise l'écoulement souterrain.

10.2 *Transport des contaminants*

La durée des simulations en régime transitoire est fonction de la complexité du maillage, des conditions frontières et des paramètres hydrauliques des unités stratigraphiques. Ainsi le choix de ces paramètres doit être réalisé en considérant les objectifs des simulations, le cadre et les délais alloués au mandat.

L'étendu de ce modèle semi-régional complexe ne permet pas la représentation en détail de la stratigraphie variable observée dans les dépôts meubles et de la fracturation du roc, ce qui apporte une limitation de précision au niveau des résultats de transport de contaminants. Les résultats devraient être utilisés pour montrer des tendances décrivant le comportement global du site et non pas une prédiction pour des niveaux précis de concentrations dans le temps.

Le cas modélisé est conservateur pour les conditions au PAR étant donné les conditions suivantes appliquées :

- Le coefficient de dispersion utilisé est deux fois plus élevé que dans les simulations réalisées en 2012.
- Le flux appliqué au fond du PAR a été calculé à partir d'une tête d'eau élevée dans le PAR et le flux est conservé constant sur toute la simulation (500 ans). Cette hypothèse ne considère pas le mode de restauration qui sera mis en place à la fermeture du site pour réduire l'infiltration en surface.
- La décroissance de la concentration en arsenic identifiée dans les essais cinétiques n'a pas été utilisée pour diminuer la concentration source avec le temps. Ainsi, la concentration source au PAR reste

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset	
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger	
			Rév	Date
628178-4000-4EER-0001		00	05 octobre 2016	31

constante dans le temps. Un nouvel essai en cellule permettrait de confirmer le taux de décroissance de lixiviation de l'arsenic.

11.0 SUIVI DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

D'après le manuel d'opération (SNC-Lavalin, 2014), le suivi de la qualité des eaux souterraines doit être effectué deux fois par année, au printemps et à l'été, et ce pour les piézomètres PO-PAR01, PO-PAR04, PO-PAR14 et PO-PAR15. Le suivi au site pour déterminer les teneurs de fond avant le début des activités au site a été réalisé en 2014 d'après les recommandations de la Directive 019. Le parc est en exploitation depuis octobre 2014. Ainsi les recommandations présentées au tableau 11-1 concernent les périodes de développement et d'exploitation. Tel qu'indiqué dans la Directive 019, le relevé de la qualité de l'eau doit être réalisé 2 fois par an au printemps et à l'été. Le tableau 11-1 résume les campagnes d'échantillonnage à réaliser.

Le suivi des concentrations à l'exutoire de la pile de résidus en exploitation et de l'eau pompée sous la géomembrane au niveau du bassin de collecte devrait être également poursuivi afin de détecter tout changement dans les teneurs en arsenic des eaux s'exfiltrant du parc.

Dans le cadre du suivi de la qualité des eaux souterraines de la Phase 2 du PAR, il est recommandé d'ajouter un puits d'observation entre la nouvelle zone de déposition des résidus et le ruisseau car le piézomètre PO-PAR04 n'est pas en aval hydraulique de celle-ci (voir les figures 18 à 22 présentant les réseaux d'écoulement de l'eau souterraine suite à l'ajout du PAR). Ce piézomètre devrait être localisé à proximité des limites du PAR et permettrait de détecter rapidement un problème de contamination des eaux souterraines. Le piézomètre PO-PAR04 devrait continuer à être relevé dans le cadre du suivi de la Phase 1.

Tableau 11-1 : Campagnes d'échantillonnage à réaliser pour le suivi de la qualité des eaux pour la Phase 1 et la Phase 2

Période	Nombre de campagnes par année	Période recommandée	Puits recommandés
Développement et exploitation Phase 1 et 2	2	Printemps et Été	PO-PAR01 PO-PAR04 PO-PAR14 PO-PAR15 Puits d'observation – Phase 2 (à ajouter)

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : G. Cosset	
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant		Révisé par : C. Bélanger	
			Rév	Date
628178-4000-4EER-0001		00	05 octobre 2016	32

12.0 CONCLUSION

L'objectif de la modélisation hydrogéologique était de déterminer les débits d'eau s'exfiltrant du PAR de la mine Éléonore afin de vérifier si ces débits respectaient le niveau d'étanchéité de niveau A de la Directive 019. Le modèle conceptuel a été développé utilisant les résultats d'une étude hydrogéologique complète basée sur tous les résultats des études antérieures et des données de suivi réalisé depuis 2011. Le modèle numérique a été construit avec le logiciel Modflow 2011.1 basé sur le modèle conceptuel pour valider la bonne représentation des conditions naturelles observées avant la construction du PAR. Le modèle représente bien les conditions hydrogéologiques observées sur le terrain avec une erreur pondérée moyenne très faible de 5,44%. Le modèle calibré a été modifié pour intégrer le PAR et le bassin de collecte.

Le débit d'exfiltration en fond de parc a été déterminé grâce à la méthode empirique de Giroud à partir d'une charge hydraulique dans le parc à résidus déterminée avec un modèle 3D Modflow du PAR (SNC-Lavalin, 2012). Le débit obtenu est de 1,4 mm/an soit 0,0037 l/m²/jr ce qui est en deçà du 3,3 l/m²/jr requis et ainsi l'ouvrage respecte les exigences de la Directive 019 quant à la mesure d'étanchéité de niveau A.

Les simulations de transport des contaminants ont été réalisées avec le module MT3DMS pour deux concentrations sources en arsenic déterminées à partir des résultats du suivi réalisé au site depuis 2012 soit de 0,46 mg/L et de 2,8 mg/L. Les simulations montrent que le panache de contamination en arsenic s'écoule très lentement vers le réservoir Opinaca. À 500 ans, la concentration en arsenic qui atteint le réservoir est de 0,0023mg/L pour une concentration source de 0,46 mg/L et de 0,03 mg/L pour une concentration source de 2,8 mg/L. Les concentrations dans le socle rocheux demeurent faibles même après 500 ans de simulation. Le panache se développe principalement dans les dépôts meubles.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
		Rév	Date	Page
	628178-4000-4EER-0001	00	05 octobre 2016	33

13.0 RÉFÉRENCES

- ASTM, 2002. Standard Guide for Calibrating a Ground-Water Flow Model Application. ASTM D5981-96.
- ASTM, 2002. Standard Guide for Conducting a Sensitivity Analysis for a Ground-Water Flow Model Application. ASTM D5981-96.
- Giroud, J.P., Badu-Tweneboah, K. and Soderman, K.L., 1994. Evaluation of Landfill Liners, Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, 5-9 September 1994.
- Golder & Associés, 2010 Factual Report on Geotechnical and Hydrogeological Investigation, Tailings and Waste Rock Management Facility (Site "C"). 002-101221100-46RA, Québec, Canada, July 2010.
- Golder & Associés, 2009a. Geochemical Evaluation of Waste Rock and Tailings : Static Testing Report – Eleonore Project, James Bay, Québec. 07-1221-3027, February 2009.
- Golder & Associés, 2009b. Mine Eleonore – Étude hydrologique de base. 09-1221-0021, Québec, Canada, décembre 2009.
- Golder & Associés, 2009c. Rapport factuel d'investigation géotechnique pour le parc à résidus, 08-1221-0006-5000, Québec, Canada, mars 2009.
- Golder & Associés, 2009d. Waste rock kinetic test results éléonore project, James Bay, Québec. 07-1221-3027. Septembre 2009.
- Interralogic, 2010. Tailing Seepage Prediction, 24 Novembre 2010.
- Ministère du développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2012). Directive 019 sur l'industrie minière, mars 2012.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP). Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés. http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_grille_eaux.htm consulté en Novembre 2011.
- Roche Ltée Groupe Conseil, 2007. Étude géotechnique préliminaire – Parc à résidus – Projet Éléonore. 4350-89-01-02, Québec, Canada, Juillet 2007.
- Roche Ltée Groupe Conseil, 2006. Étude géotechnique préliminaire du parc à résidus – Variantes A et B – Mines Opinaca, 4350-89-01-01, Québec, Canada, Décembre 2006.
- Schroeder, P. R., Dozier, T.S., Zappi, P.A., McEnroe, B.M., Sjoström, J. W., and Peyton R.L., 1994. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3, EPA/600/R-94/168b, Septembre 1994, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.
- SNC-Lavalin Inc., 2014, Manuel d'opération du parc à résidus – Projet Éléonore, 615214-1000-4EER-0001, juillet 2014.
- SNC-Lavalin Inc., 2012, Modélisation hydrogéologique au futur parc à résidus de la mine Éléonore, 507491-07-100-40ER-0001, février 2012.
- SNC-Lavalin Inc, 2011a. Geotechnical Investigation Factual Report, 506324-1010-4GER-0001, Quebec, Canada, May 2011.
- SNC-Lavalin Inc, 2011b. Conceptual Engineering of Eleonore Project Mine Tailings management Facility, 506324-1000-4GER-0001, Québec, Canada, June 2011.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : G. Cosset		
	Modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de contaminant	Révisé par : C. Bélanger		
		Rév	Date	Page
	628178-4000-4EER-0001	00	05 octobre 2016	34

SNC-Lavalin Inc, 2011c. Caractérisation géochimiques des résidus miniers- projet Éléonore, 507491-07-100-40ER-0004, Québec, Canada, Décembre 2011

Spitz et Moreno, 1996. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. John Wiley and Sons, INC.

U.S. Environmental Protection Agency, 2005. Partition Coefficients for Metals in Surface Water, Soil, and Waste, July 2005.

ANNEXE A

FIGURES

- Figure 1 : Localisation du site
- Figure 2: Infrastructures au site
- Figure 3 : Carte piézométrique des dépôts meubles et du roc
- Figure 4 : Limites du modèle hydrogéologique conceptuel
- Figure 5 : Vue 3D : topographie du modèle
- Figure 6 : Vue 3D: coupe nord-sud (a) et est-ouest (b) du modèle
- Figure 7 : Vue en plan : Unités lithologiques des dépôts meubles et du roc de la couche 1
- Figure 8 : Vue en plan : Unités lithologiques des dépôts meubles et du roc de la couche 2
- Figure 9 : Vue en plan : Unités lithologiques des dépôts meubles et du roc de la couche 3
- Figure 10 : Vue en plan : Unités lithologiques des dépôts meubles et du roc de la couche 4
- Figure 11 : Vue en plan : Unités lithologiques des dépôts meubles et du roc de la couche 5
- Figure 12 : Vue en coupe 3D :Unités lithologiques représentées dans le modèle numérique
- Figure 13 : Vue en plan : Élévation topographique du modèle (couche 1)
- Figure 14 : Vue en plan: Conditions frontières appliquées à la couche 1
- Figure 15 : Vue en plan: Conditions frontières appliquées aux couche 2 à 5
- Figure 16 : Vue en plan : Recharge appliquée en surface (couche 1)
- Figure 17 : Vue en plan : Charge hydraulique initiale appliquée au modèle
- Figure 18 : Résultats du modèle calibrée couche 1
- Figure 19 : Résultats du modèle calibrée couche 2
- Figure 20 : Résultats du modèle calibrée couche 3
- Figure 21 : Résultats du modèle calibrée couche 4
- Figure 22 : Résultats du modèle calibrée couche 5
- Figure 23 : Nappe piézométrique 3D calibrée avec localisations des points d'observations
- Figure 24 : Courbe de calibration du modèle numérique d'écoulement souterrain
- Figure 25 : Vue en plan et coupes du modèle hydrogéologique incluant le PAR
- Figure 26 : Recharge appliquée sur le modèle avec zone plus faible pour représenter le PAR
- Figure 27 : Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 1
- Figure 28 : Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 2
- Figure 29 : Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 3
- Figure 30 : Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 4
- Figure 31 : Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 5
- Figure 32 : Nappe piézométrique 3D avec le PAR et le bassin de collecte

Figure 33 : Évolution de la concentration en arsenic lors de l'essai en cellule humide
(30 cycles de mouillage/séchage)

Figure 34 : Évolution de la concentration en arsenic dans les piézomètres de suivi

Figure 35 : Évolution de la concentration du niveau piézométrique dans les piézomètres de suivi

Figure 36 : $C_{\text{source}} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 1

Figure 37 : $C_{\text{source}} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 2

Figure 38 : $C_{\text{source}} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 3

Figure 39 : $C_{\text{source}} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 4

Figure 40 : $C_{\text{source}} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 5

Figure 41 : $C_{\text{source}} = 2,8 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 1

Figure 42 : $C_{\text{source}} = 2,8 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 2

Figure 43 : $C_{\text{source}} = 2,8 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 3

Figure 44 : $C_{\text{source}} = 2,8 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 4

Figure 45 : $C_{\text{source}} = 2,8 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 5

Localisation
du site



PAR du projet
Éléonore

Projet
Éléonore



Modélisation
hydrogéologique
et de transport

Demande de CA – Phase 2 – Mine Éléonore

Projet: 628178 - 4000

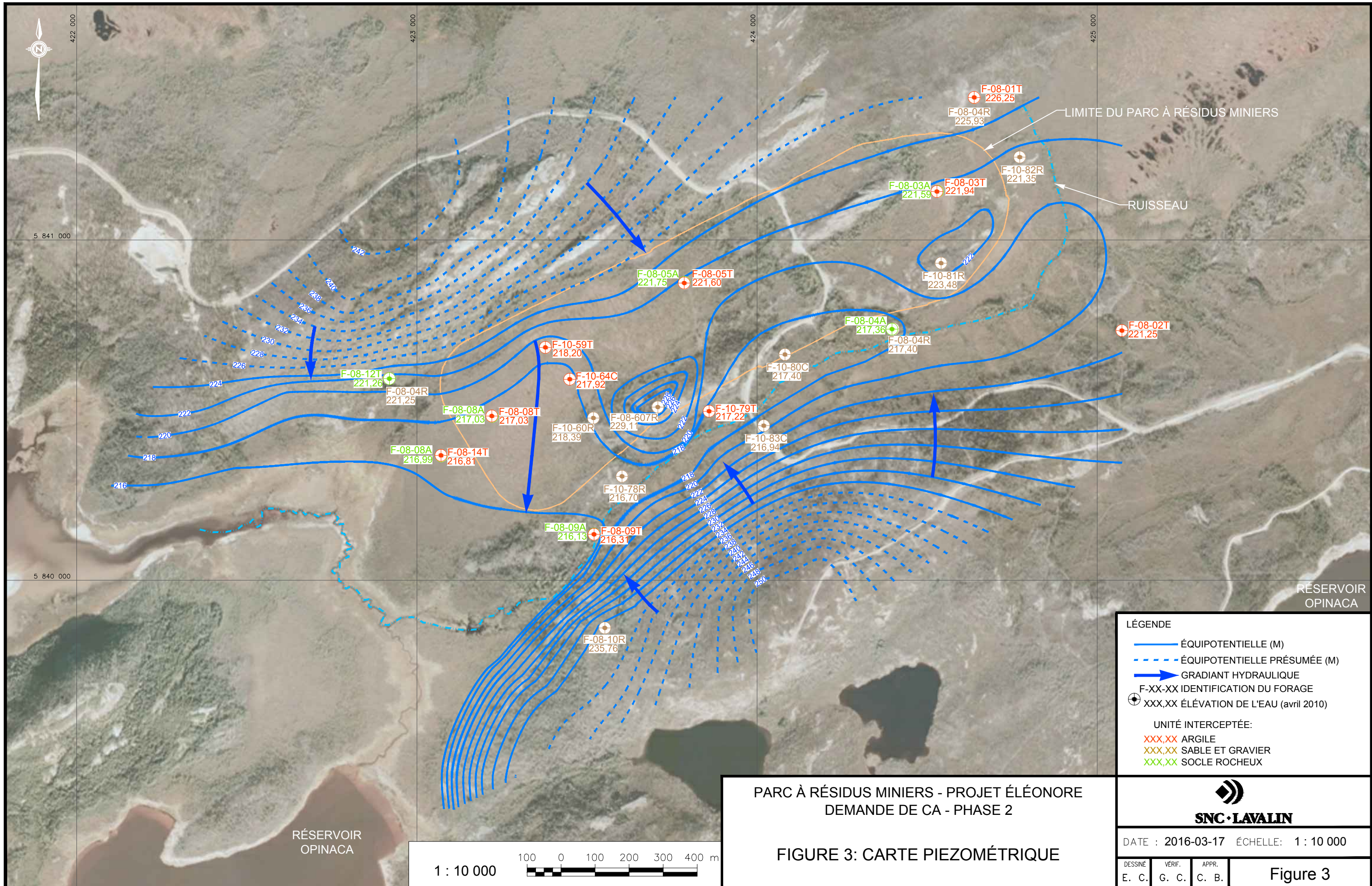
Figure: 1



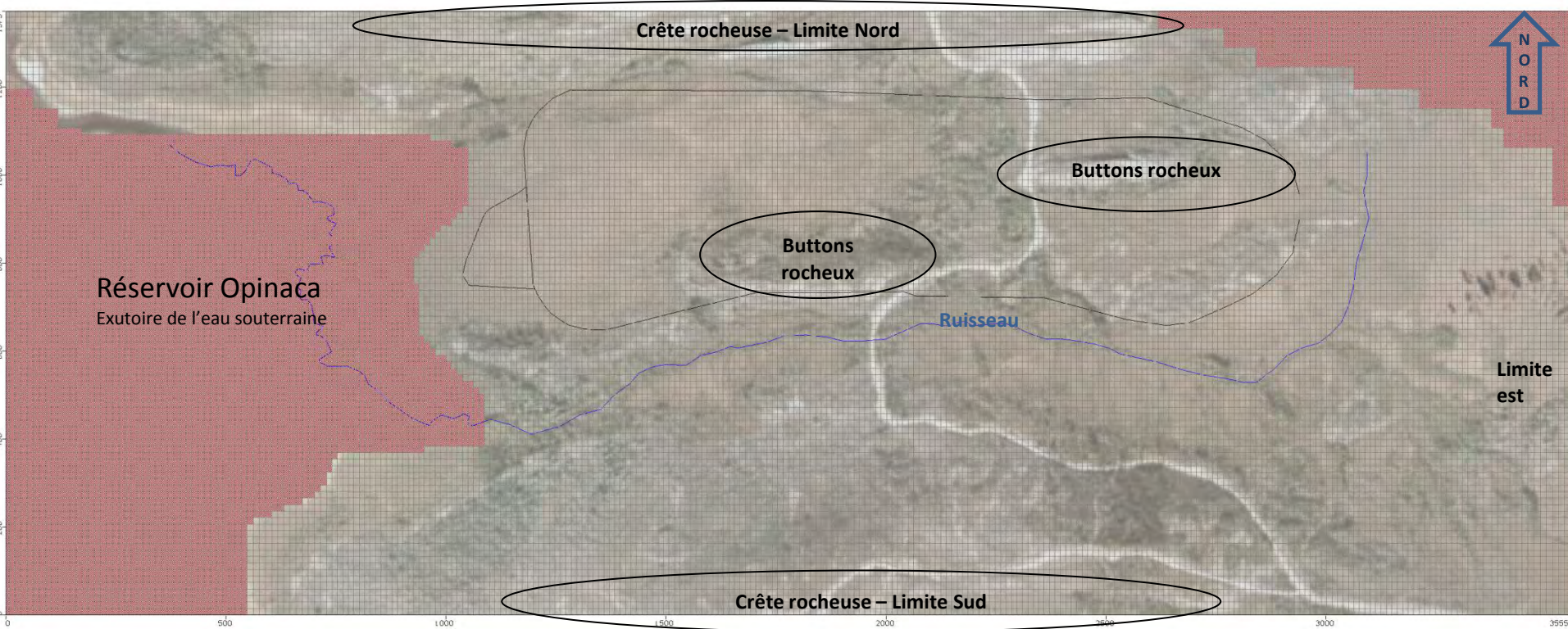
PARC À RÉSIDUS MINIERS - PROJET ÉLEONORE
 DEMANDE DE CA - PHASE 2

FIGURE 2: INFRASTRUCTURES AU SITE

			SNC LAVALIN INC. 360, Saint-Jacques street West Montreal (Quebec) Canada H2Z 1P5
DATE : 2016-03-15 ÉCHELLE: 1 : 20 000			Figure 2
DESSINÉ E. C.	VÉRIF. G. C.	APPR. C. B.	



Limites du modèle hydrogéologique conceptuel

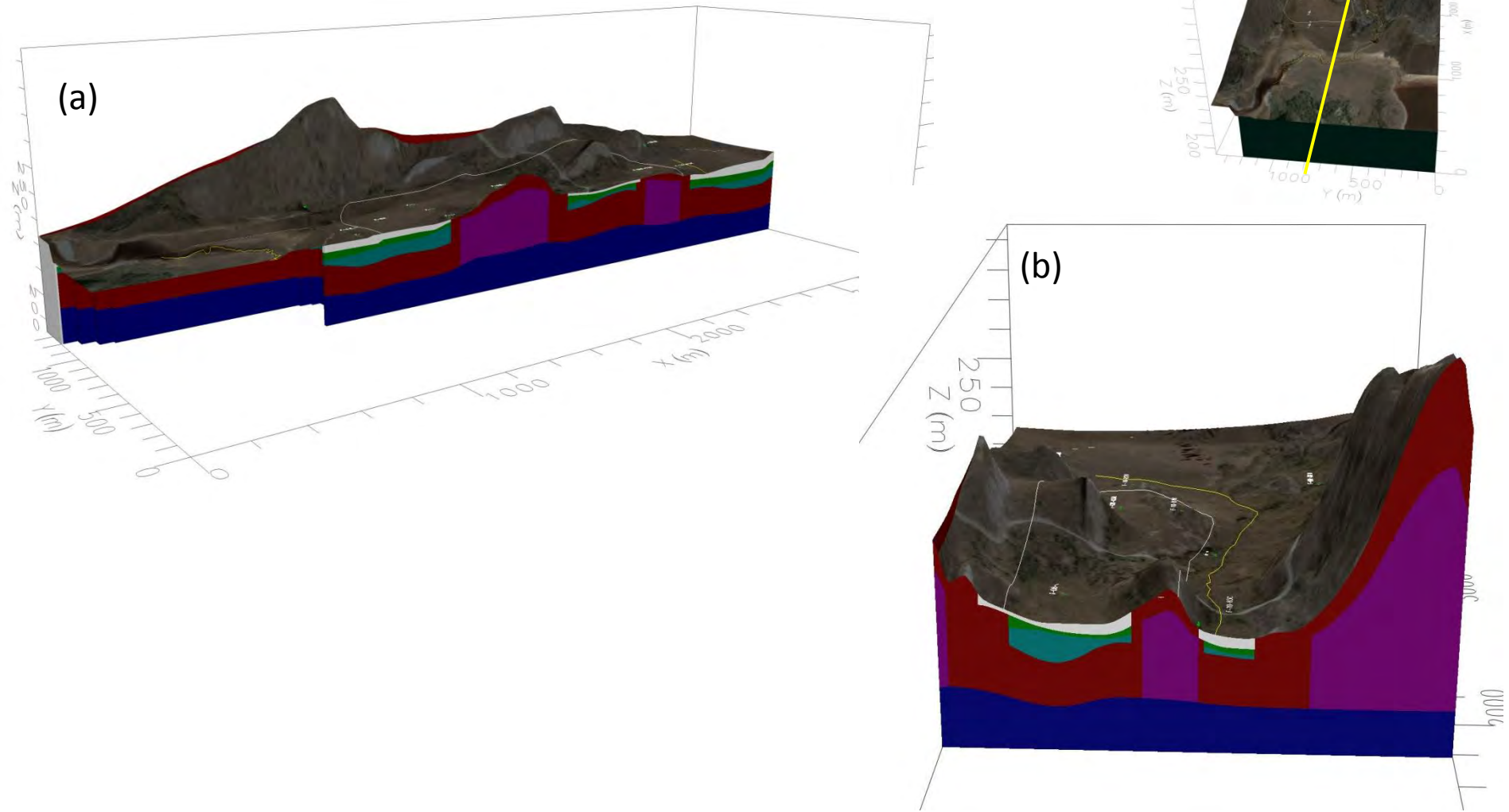


Zone rose = cellules inactives

Vue 3D : topographie du modèle

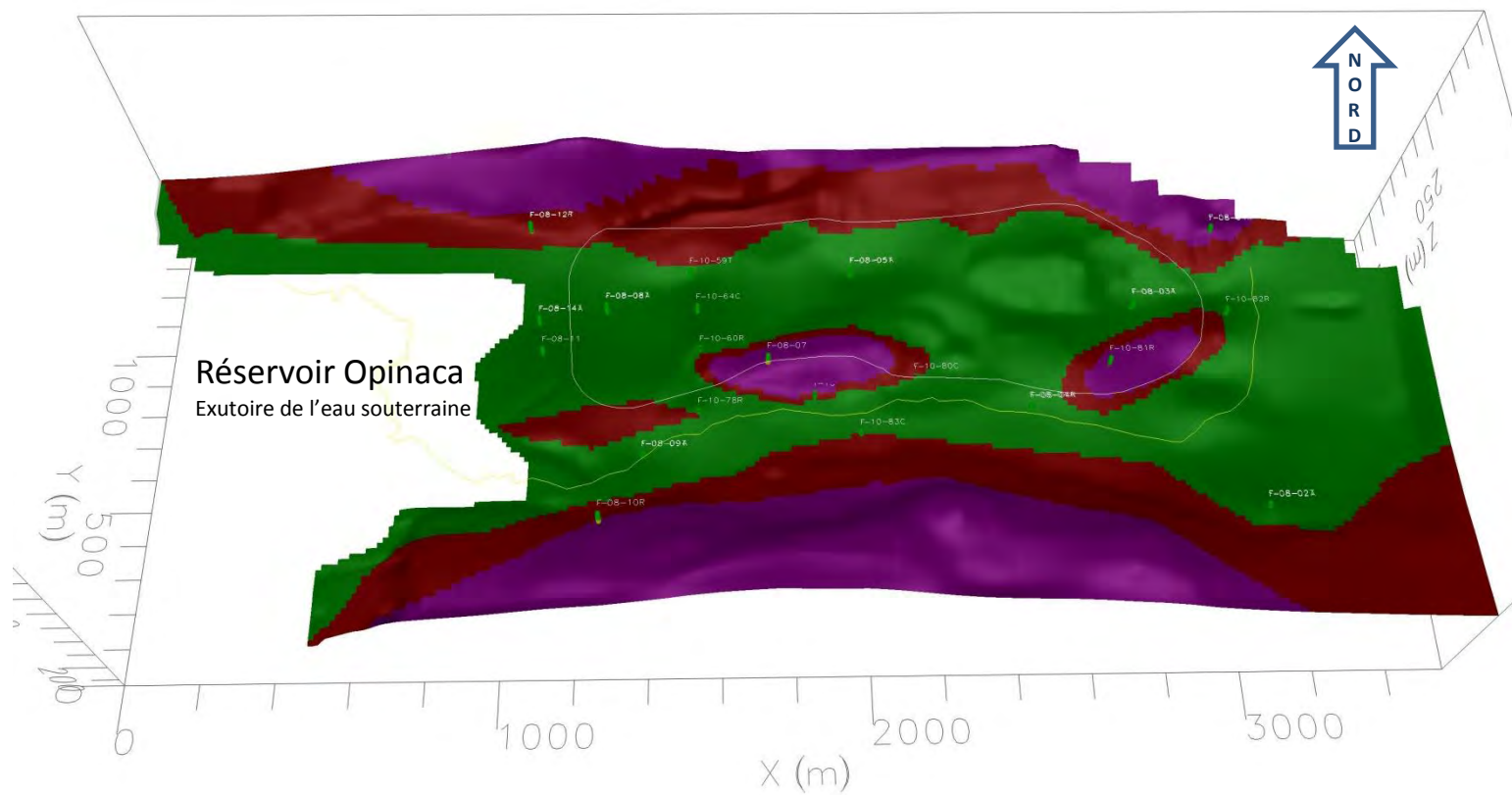


Vue 3D: coupe nord-sud (a) et est-ouest (b) du modèle



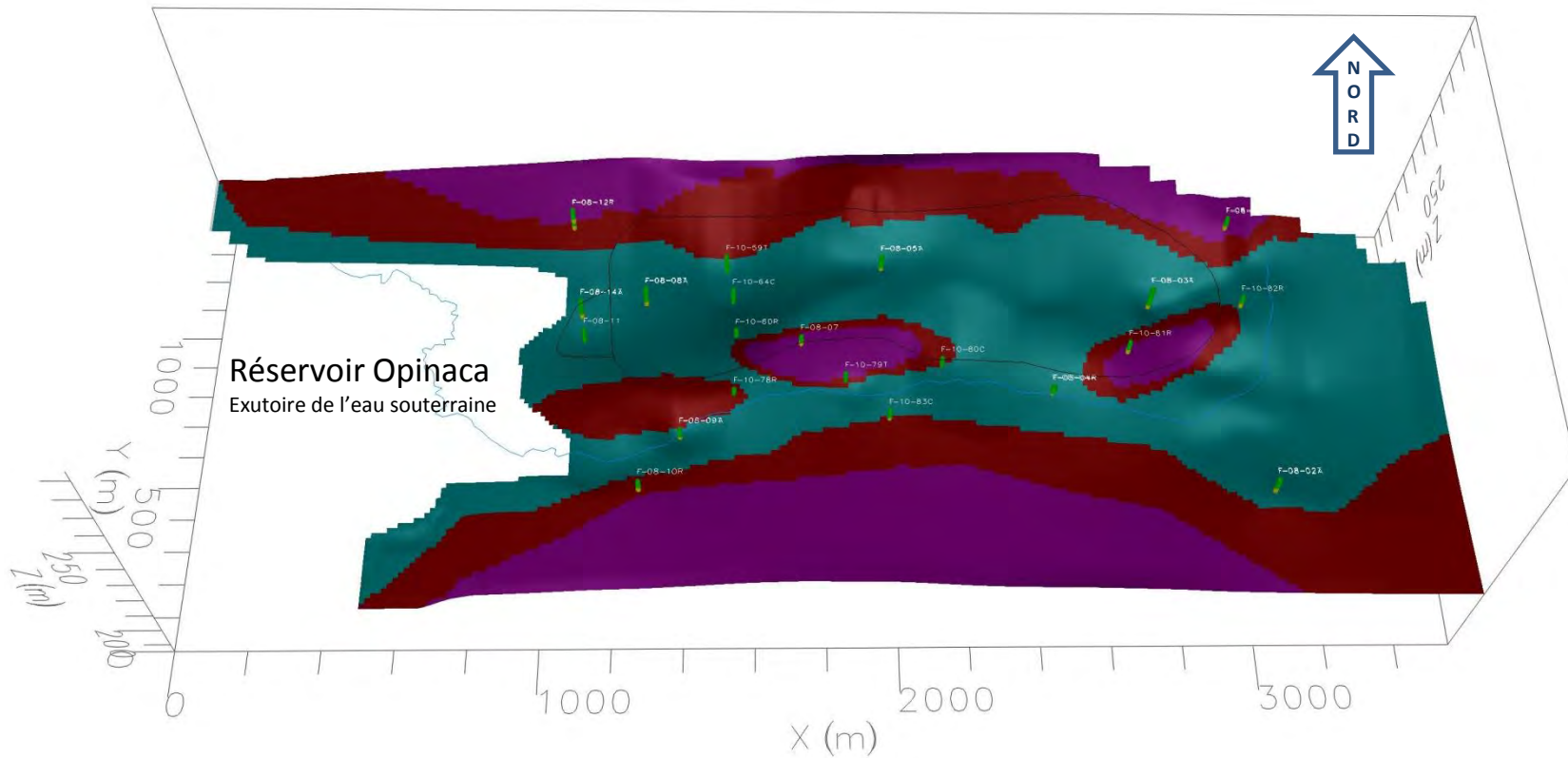
Vue en plan : Unités lithologiques des dépôts meubles et du roc de la couche 2

Unités lithologiques					
Tourbe BLANC	Argile VERT	Till TURQUOISE	Socle rocheux de surface ROUGE	Socle rocheux moyen ROSE	Socle rocheux BLEU



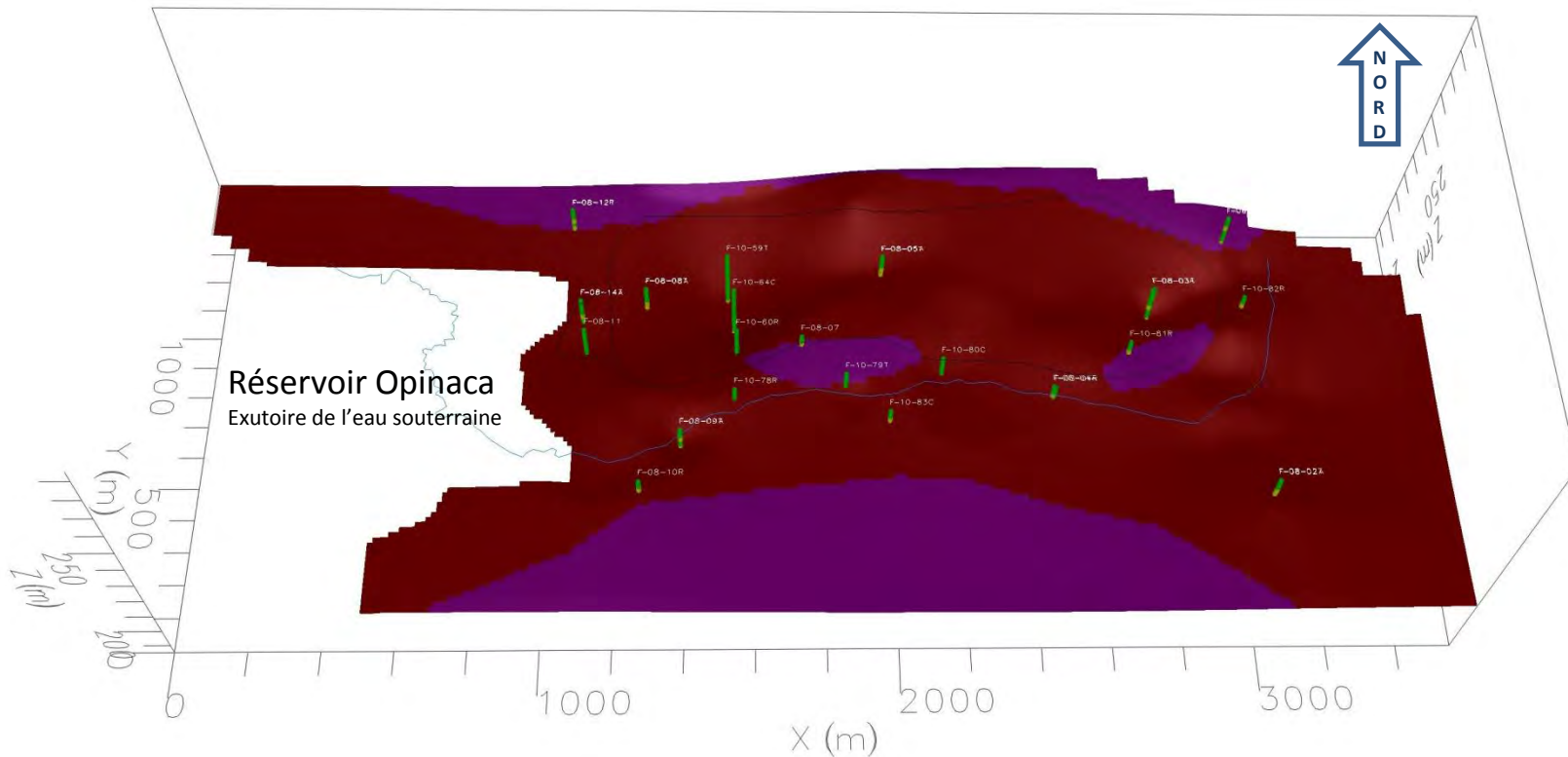
Vue en plan : Unités lithologiques des dépôts meubles et du roc de la couche 3

Unités lithologiques					
Tourbe BLANC	Argile VERT	Till TURQUOISE	Socle rocheux de surface ROUGE	Socle rocheux moyen ROSE	Socle rocheux BLEU



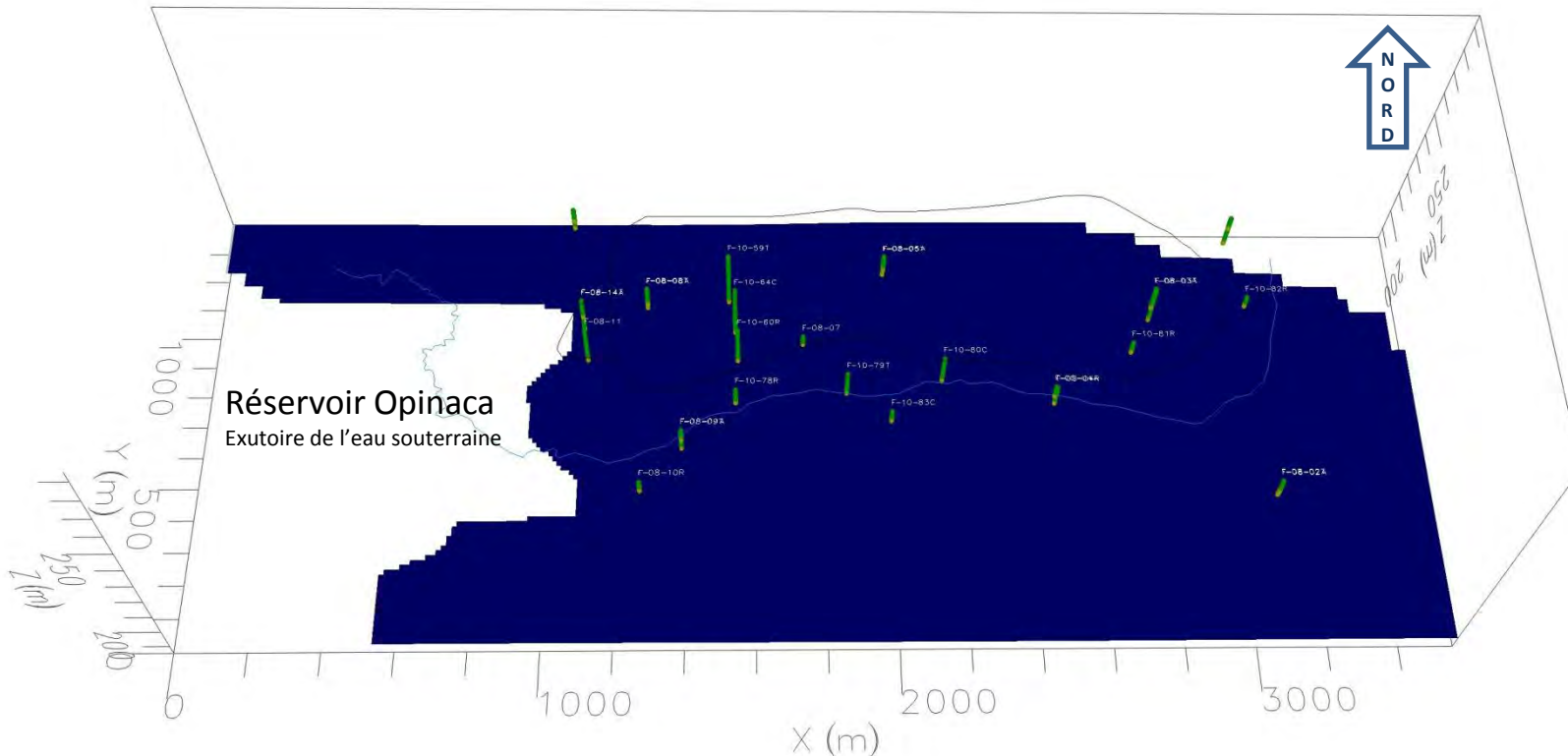
Vue en plan : Unités lithologiques des dépôts meubles et du roc de la couche 4

Unités lithologiques					
Tourbe BLANC	Argile VERT	Till TURQUOISE	Socle rocheux de surface ROUGE	Socle rocheux moyen ROSE	Socle rocheux BLEU



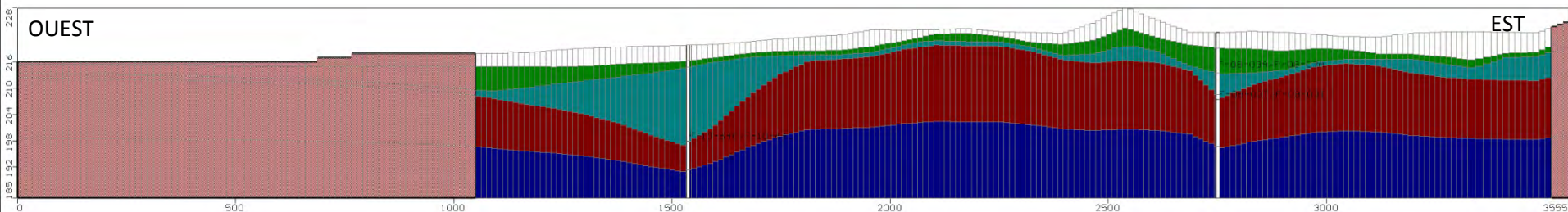
Vue en plan : Unités lithologiques des dépôts meubles et du roc de la couche 5

Unités lithologiques					
Tourbe BLANC	Argile VERT	Till TURQUOISE	Socle rocheux de surface ROUGE	Socle rocheux moyen ROSE	Socle rocheux BLEU

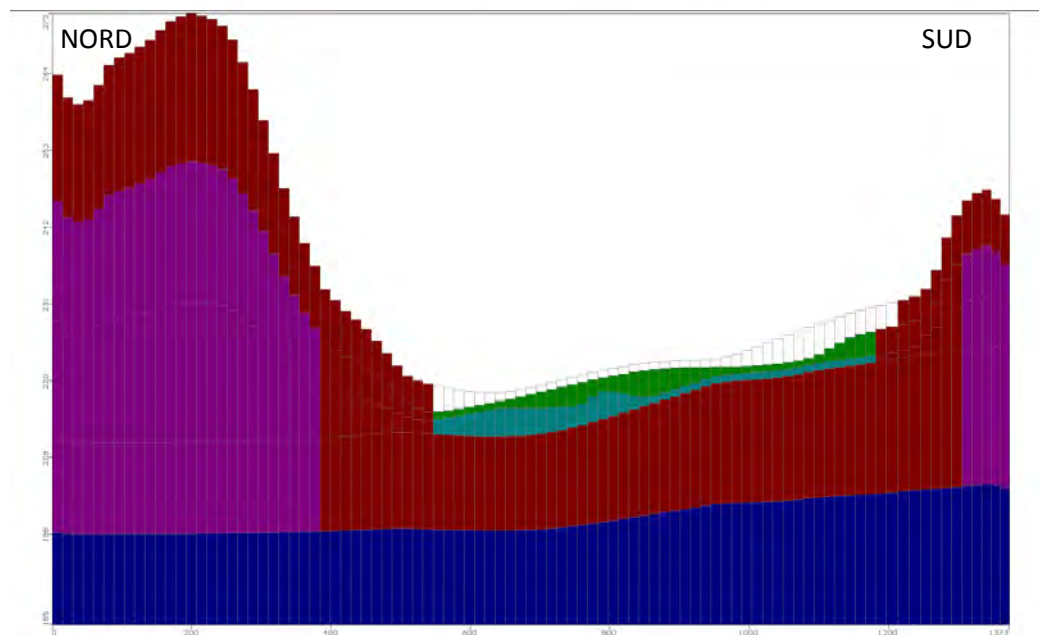


Vue en coupe 3D :Unités lithologiques représentées dans le modèle numérique

Unités lithologiques					
Tourbe BLANC	Argile VERT	Till TURQUOISE	Socle rocheux de surface ROUGE	Socle rocheux moyen ROSE	Socle rocheux BLEU

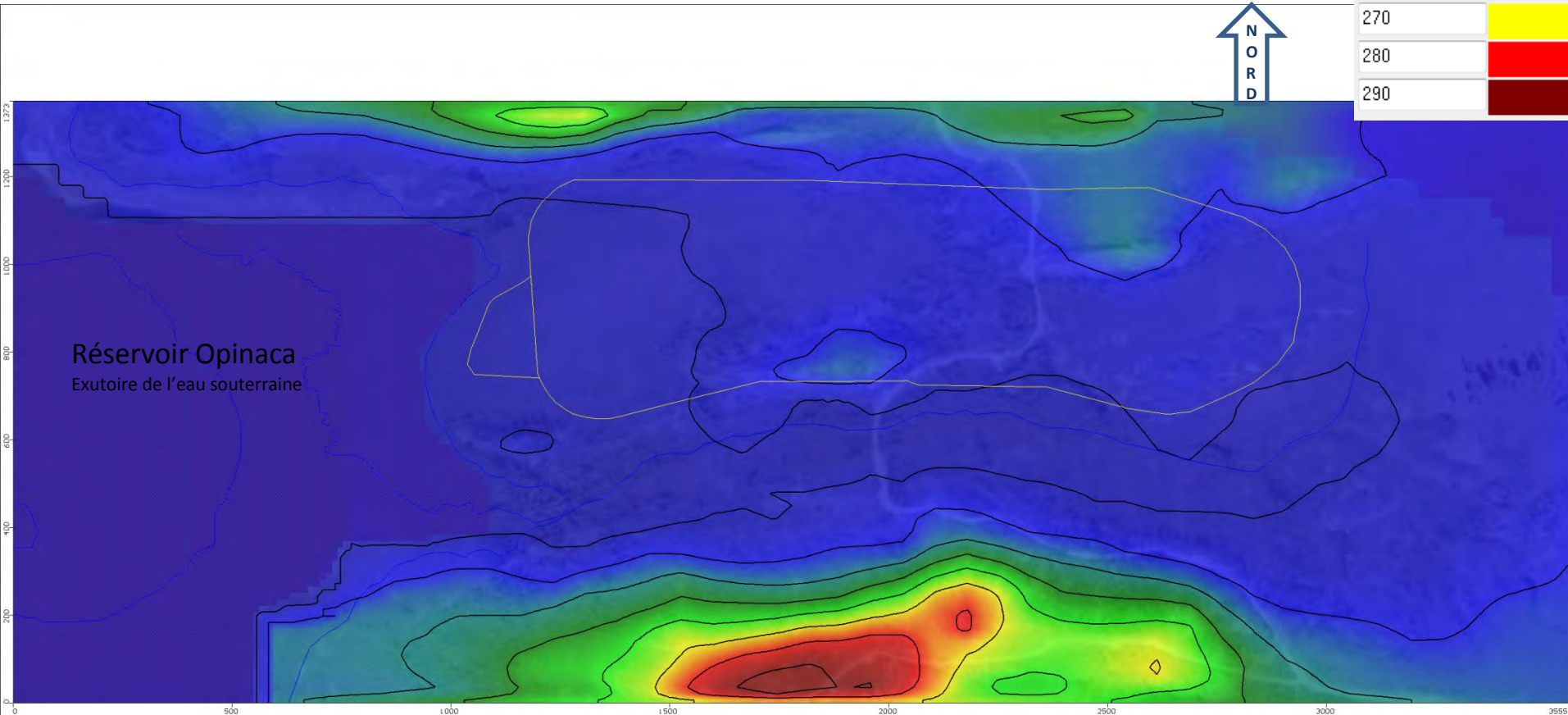
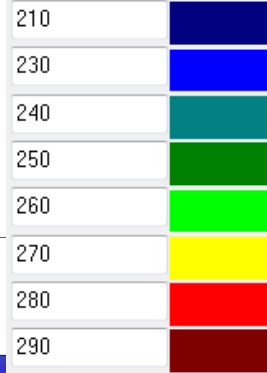


Zone rose = cellules inactives



Vue en plan : Élévation topographique du modèle (couche 1)

Élévation (m)



SNC • LAVALIN

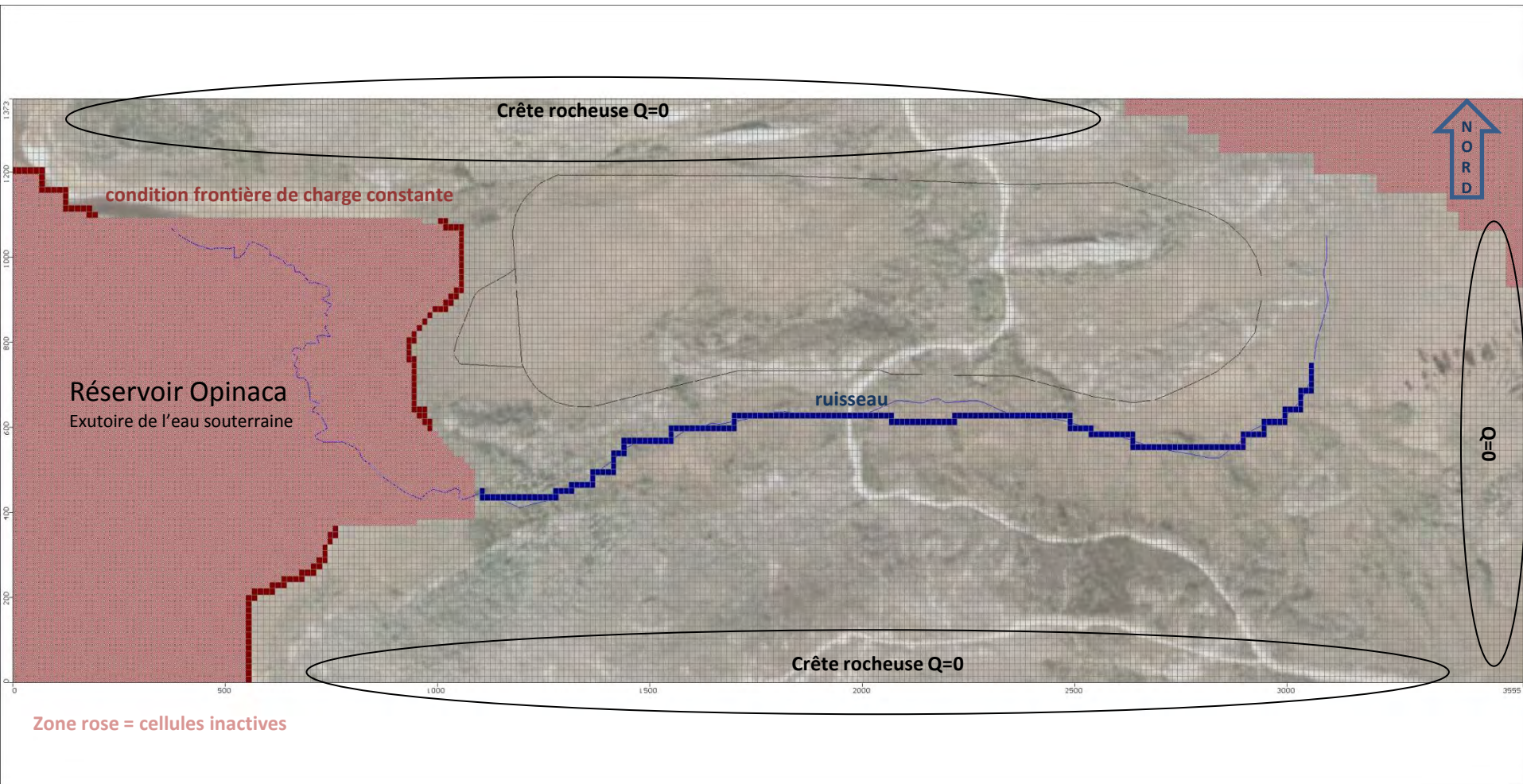
**Modélisation
hydrogéologique
et de transport**

Demande de CA – Phase 2 – Mine Éléonore

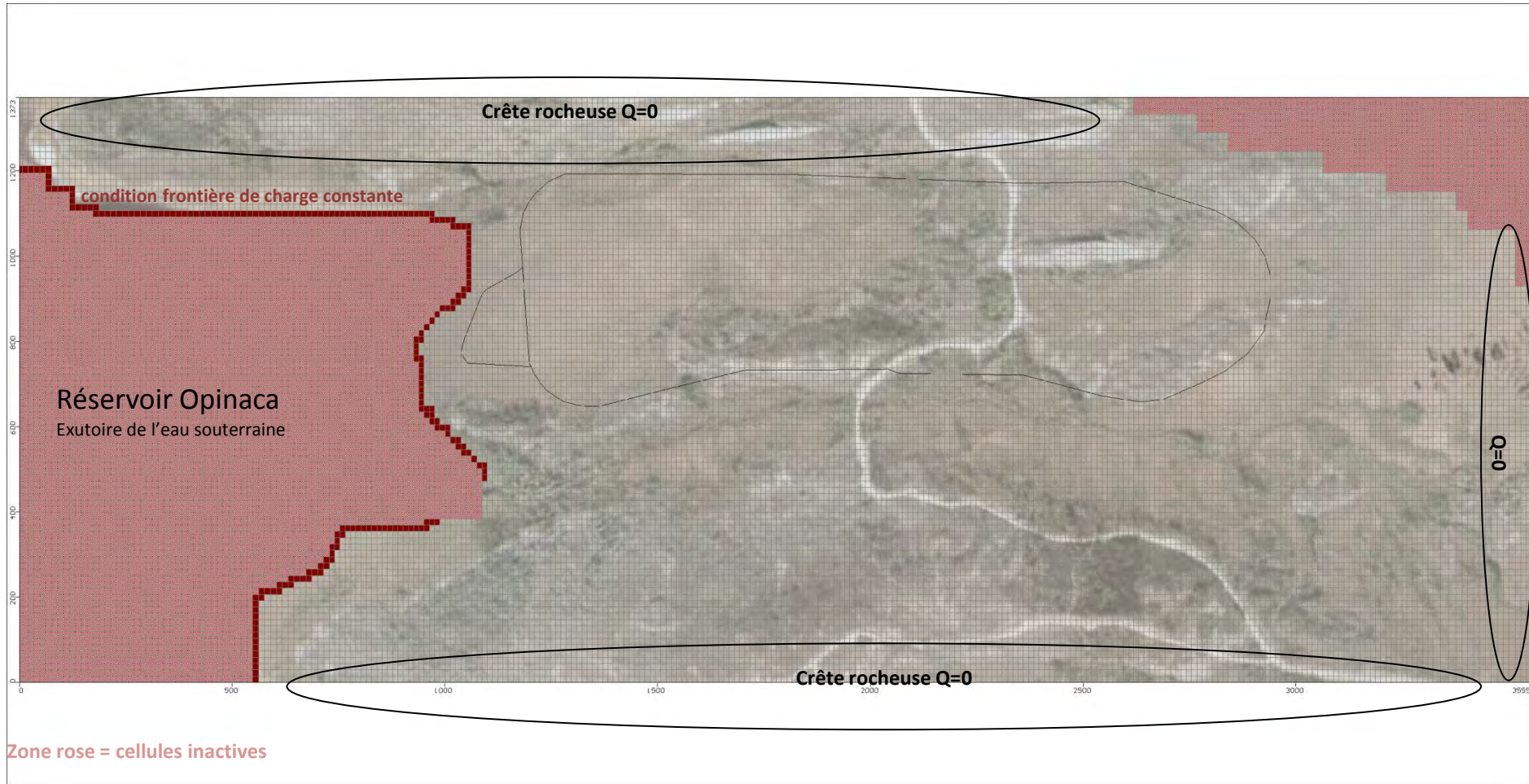
Projet: 628178 - 4000

Figure: 13

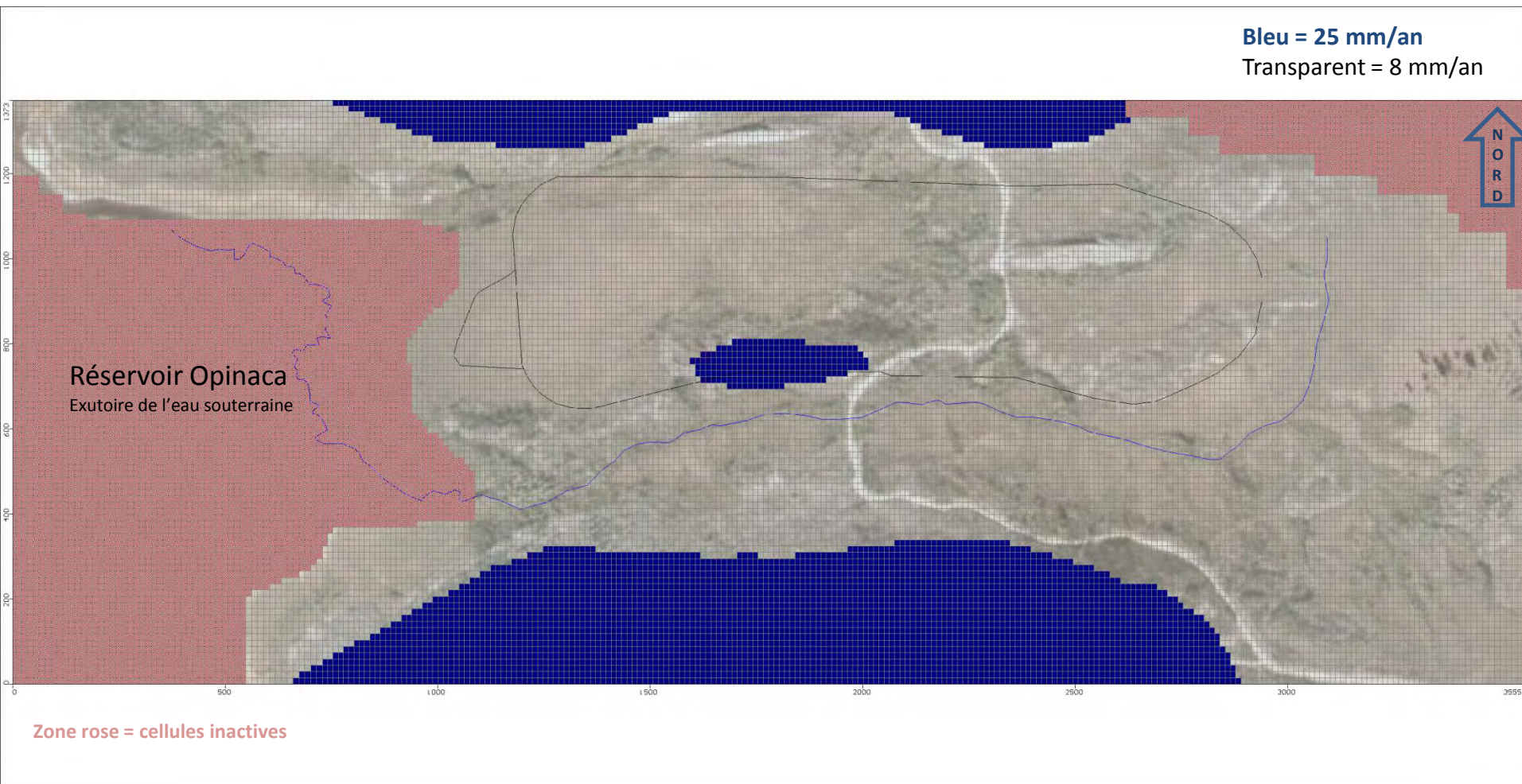
Vue en plan: Conditions frontières appliquées à la couche 1



Vue en plan: Conditions frontières appliquées aux couche 2 à 5

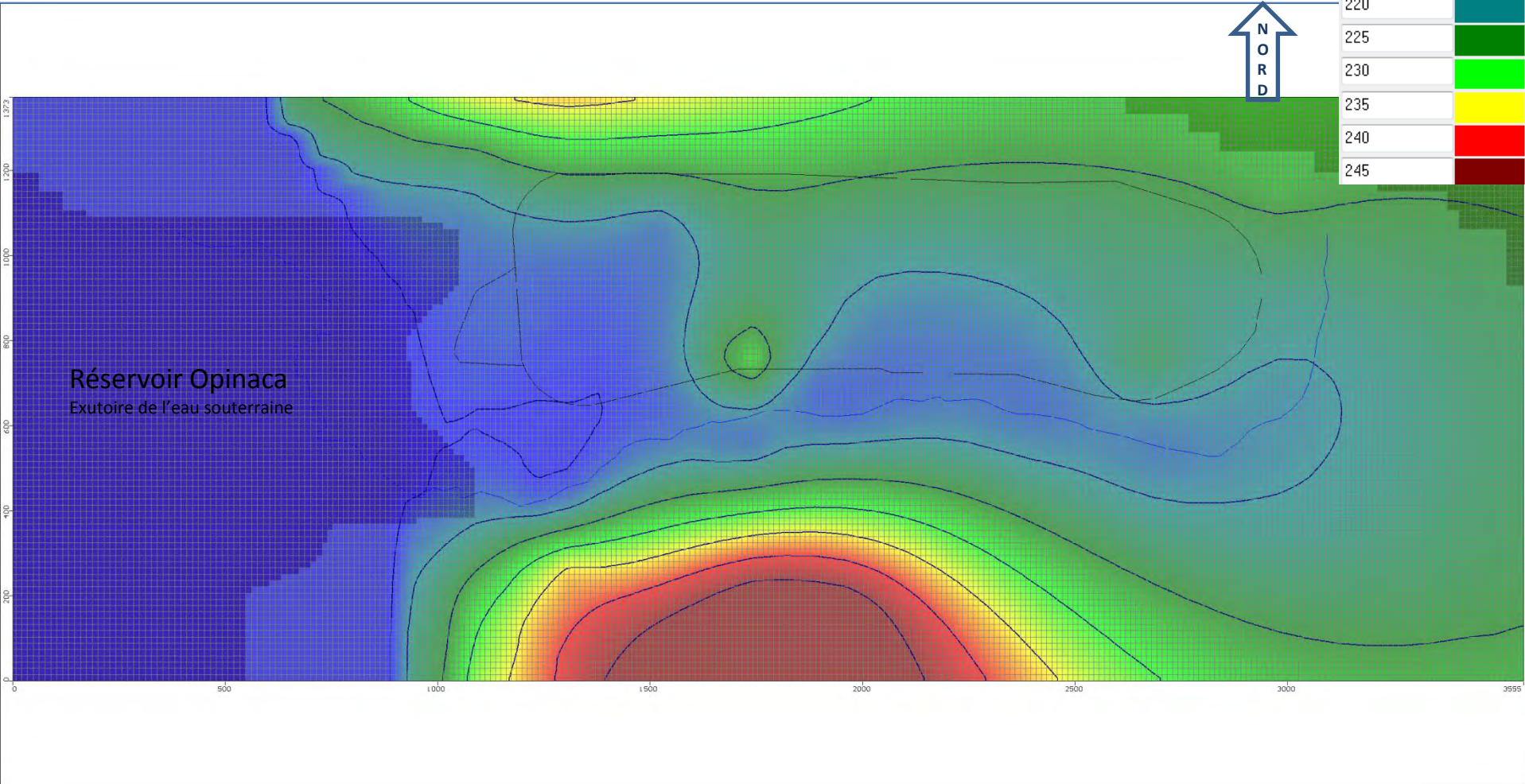
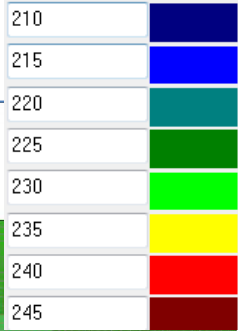


Vue en plan : Recharge appliquée en surface (couche 1)



Vue en plan : Charge hydraulique initiale appliquée au modèle

Charge hydraulique (m)



SNC • LAVALIN

**Modélisation
hydrogéologique
et de transport**

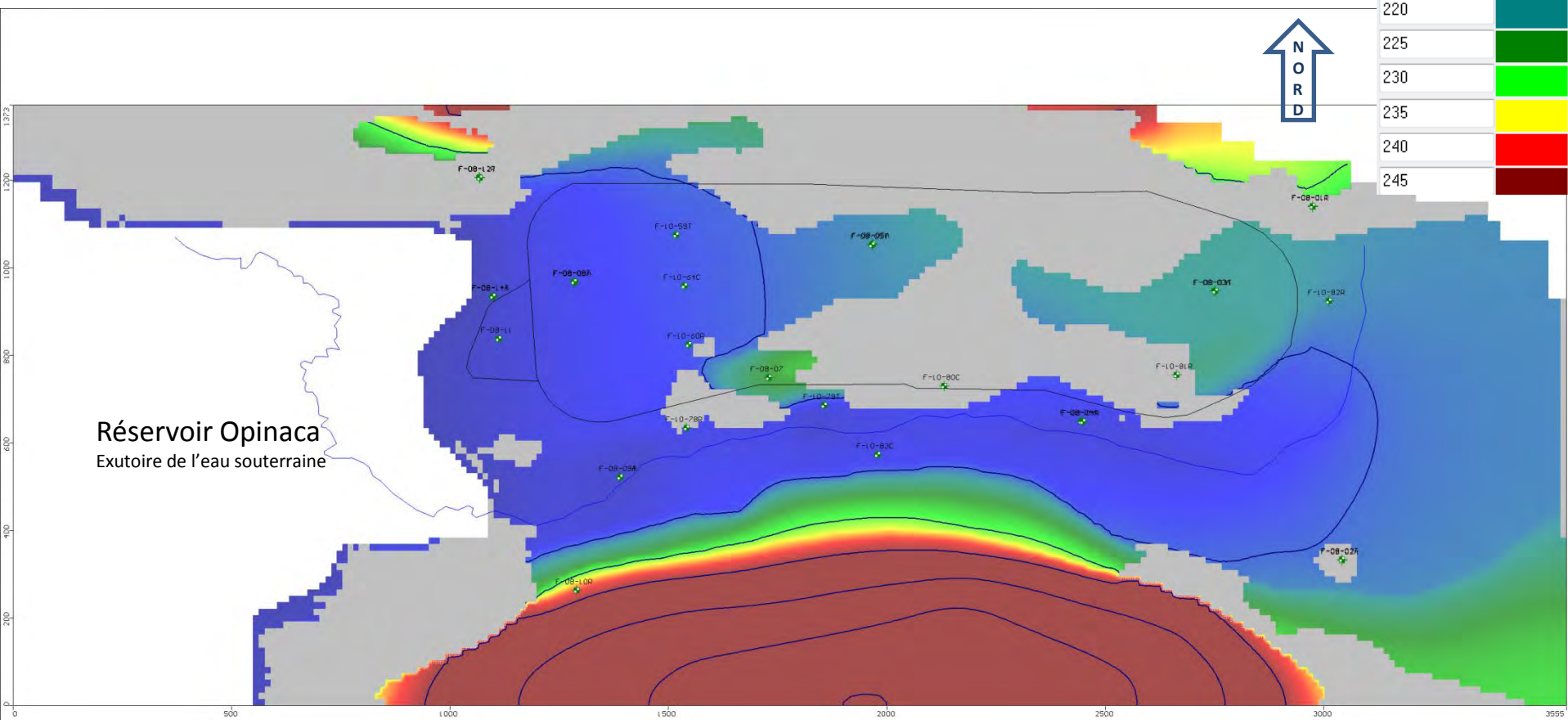
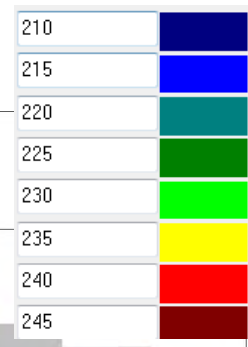
Demande de CA – Phase 2 – Mine Éléonore

Projet: 628178 - 4000

Figure: 17

Résultats du modèle calibrée couche 1

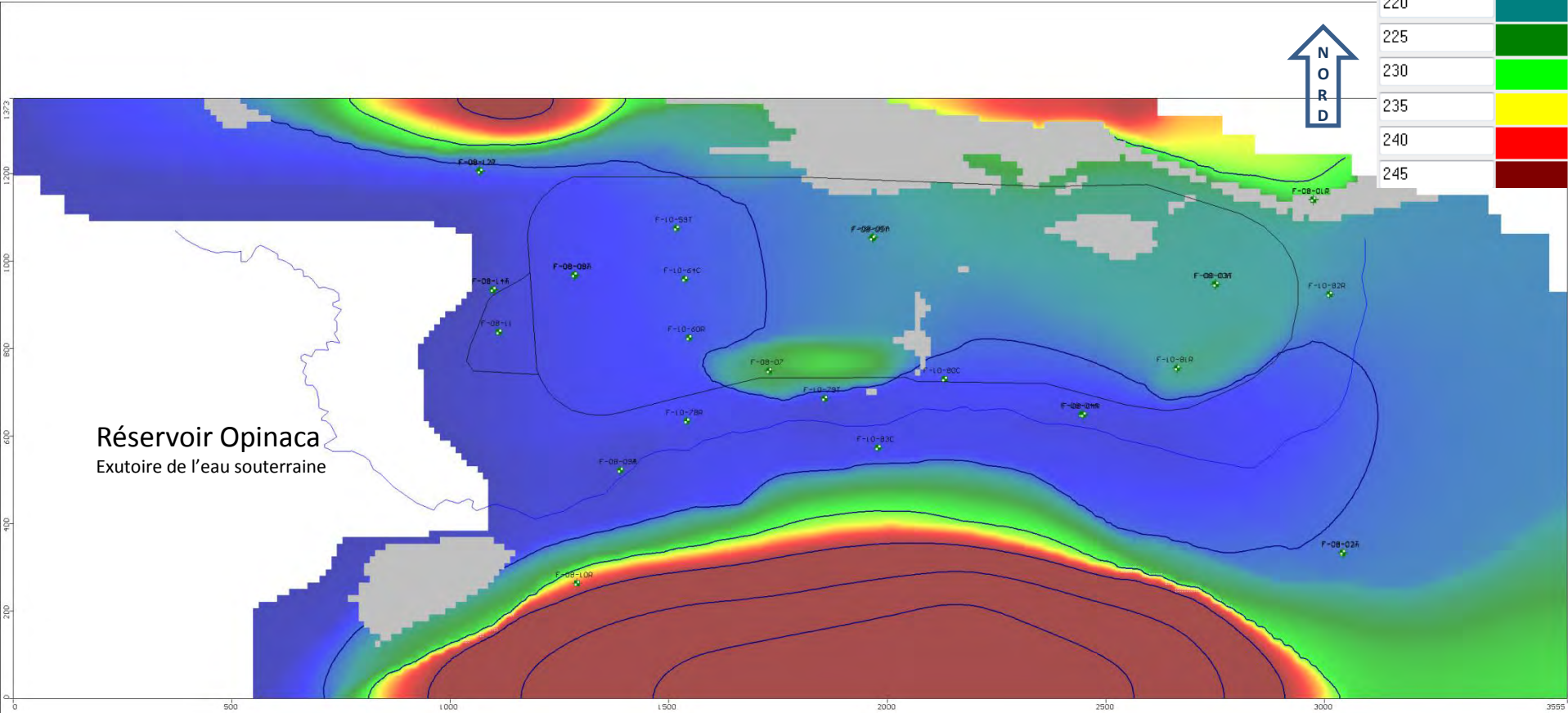
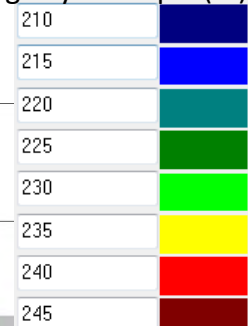
Charge hydraulique (m)



Zones blanches = cellules inactives
 Zones grises = cellules sèches

Résultats du modèle calibrée couche 2

Charge hydraulique (m)

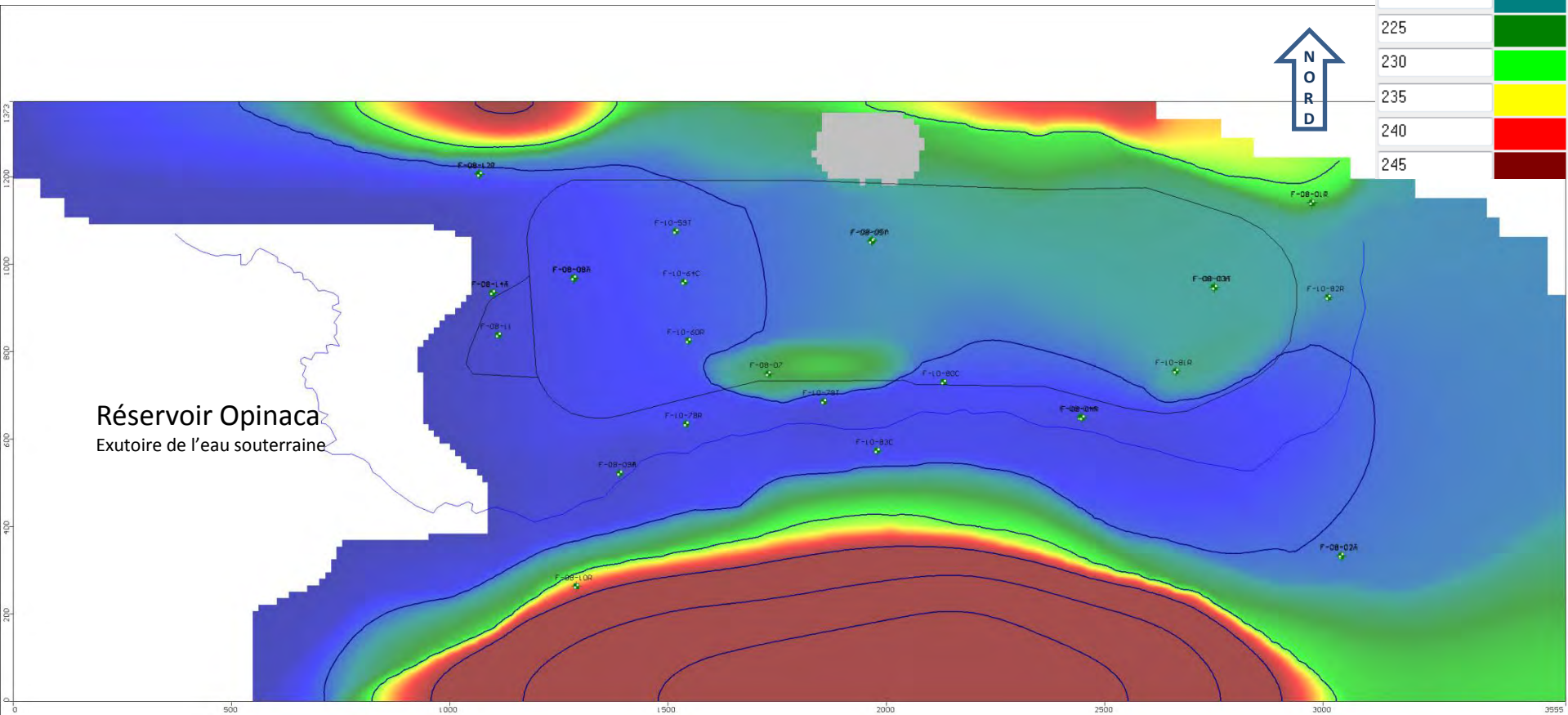
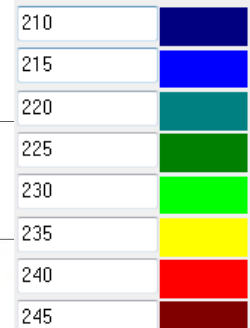


Réservoir Opinaca
Exutoire de l'eau souterraine

Zones blanches = cellules inactives
Zones grises = cellules sèches

Résultats du modèle calibrée couche 3

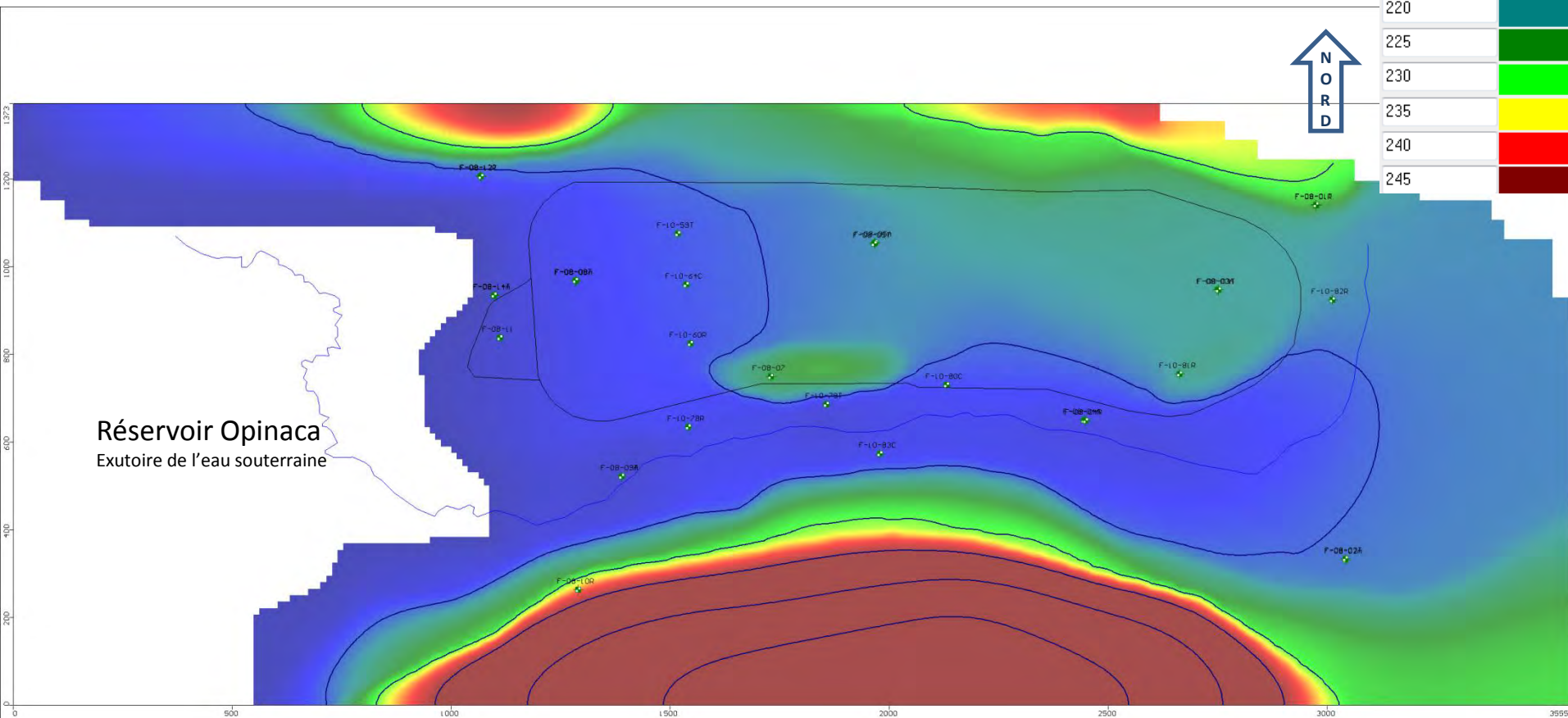
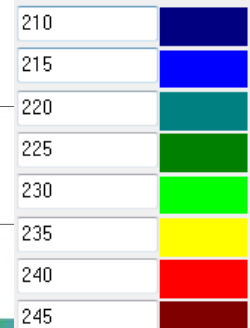
Charge hydraulique (m)



Zones blanches = cellules inactives
 Zones grises = cellules sèches

Résultats du modèle calibrée couche 4

Charge hydraulique (m)



Zones blanches = cellules inactives
 Zones grises = cellules sèches



SNC • LAVALIN

**Modélisation
 hydrogéologique
 et de transport**

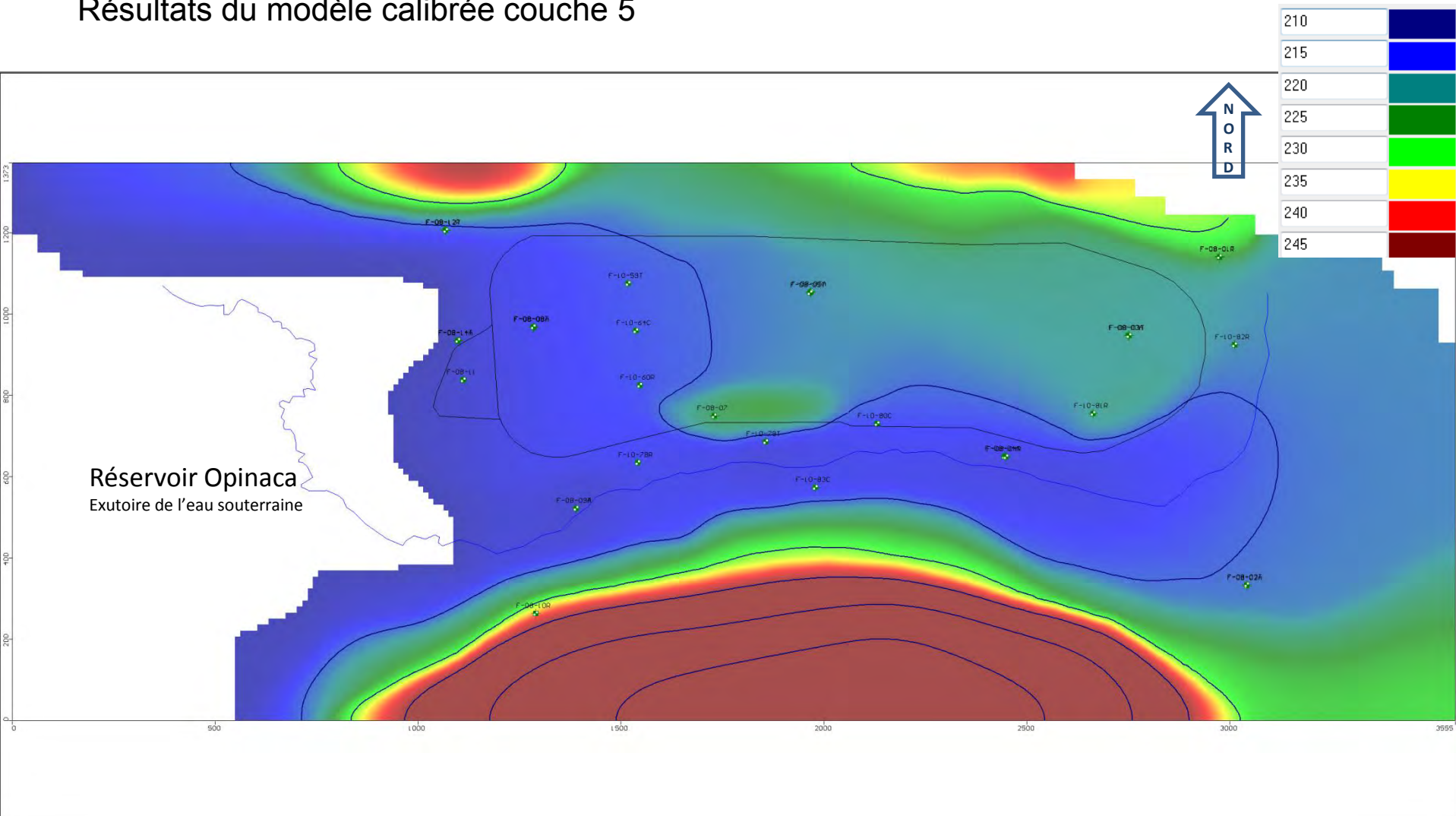
Demande de CA – Phase 2 – Mine Éléonore

Projet: 628178 - 4000

Figure: 21

Résultats du modèle calibrée couche 5

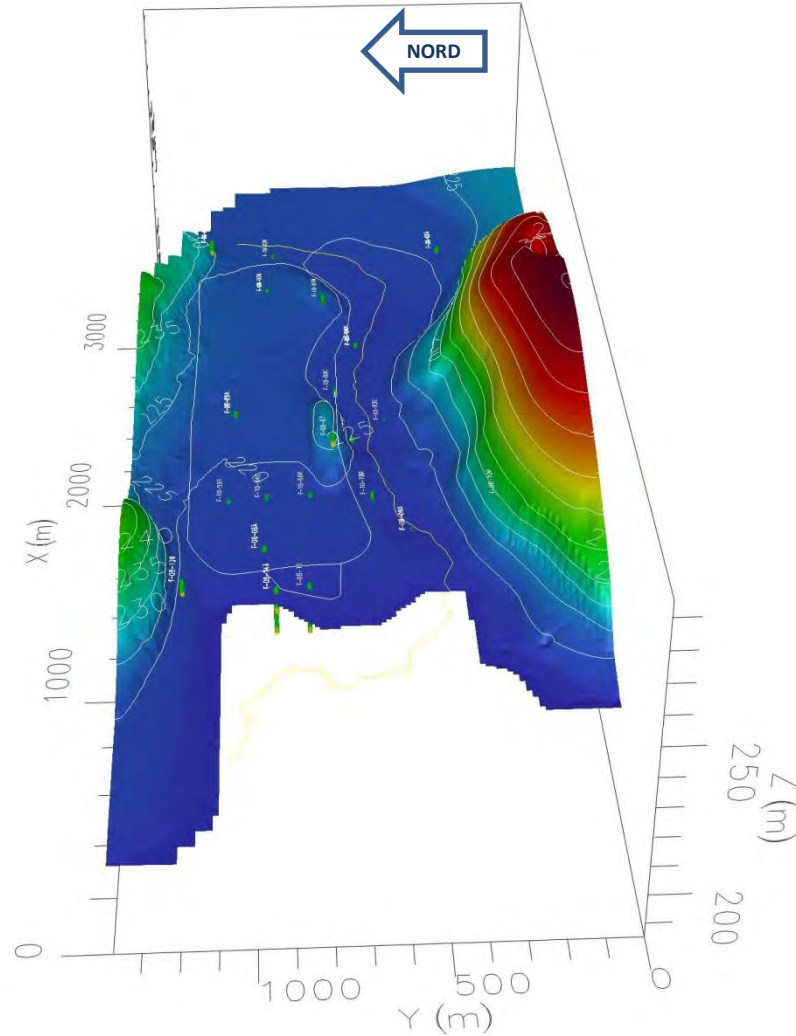
Charge hydraulique (m)



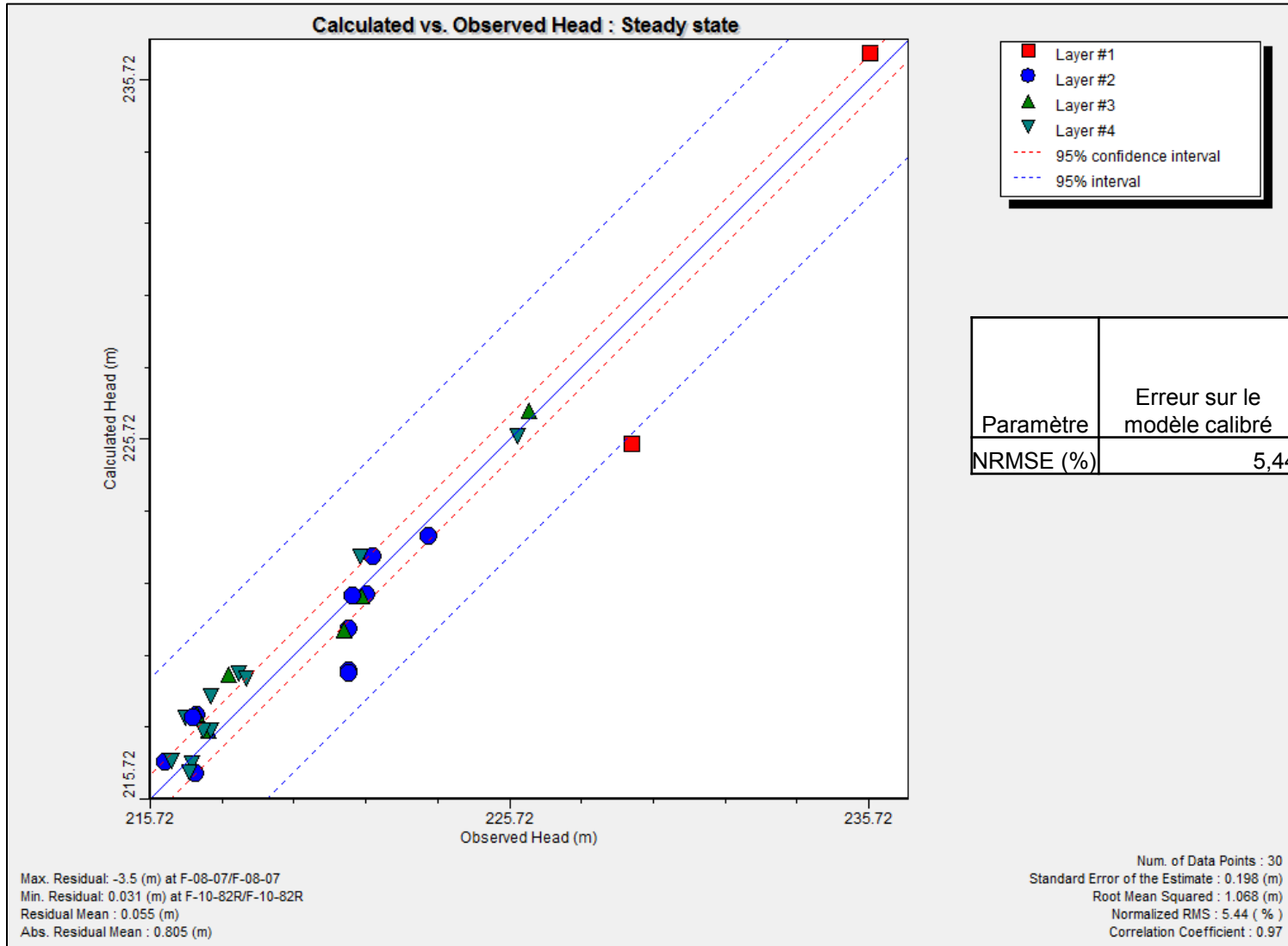
Zones blanches = cellules inactives
Zones grises = cellules sèches

Nappe piézométrique 3D calibrée avec localisation des points d'observations

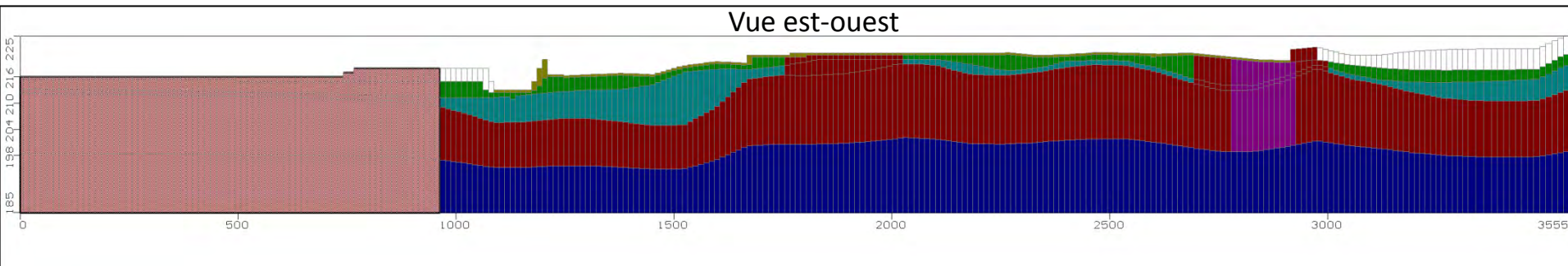
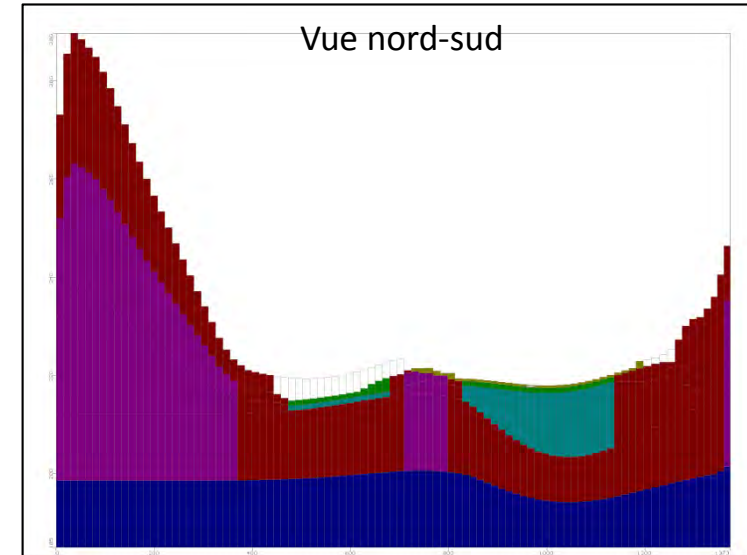
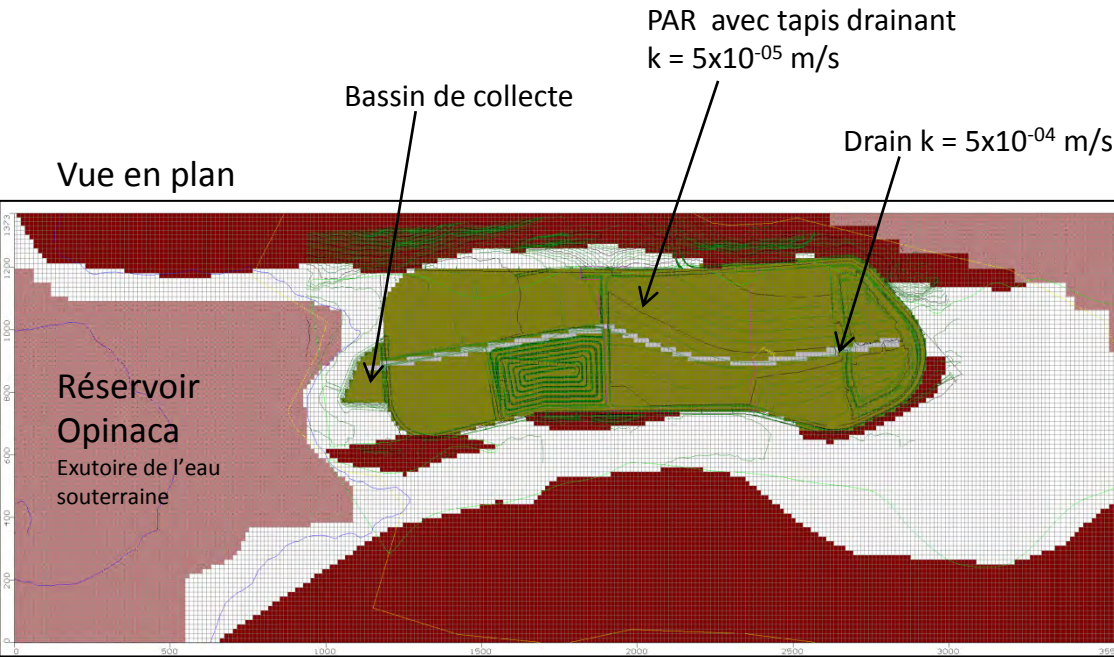
Charge hydraulique (m)



Courbe de calibration du modèle numérique d'écoulement souterrain



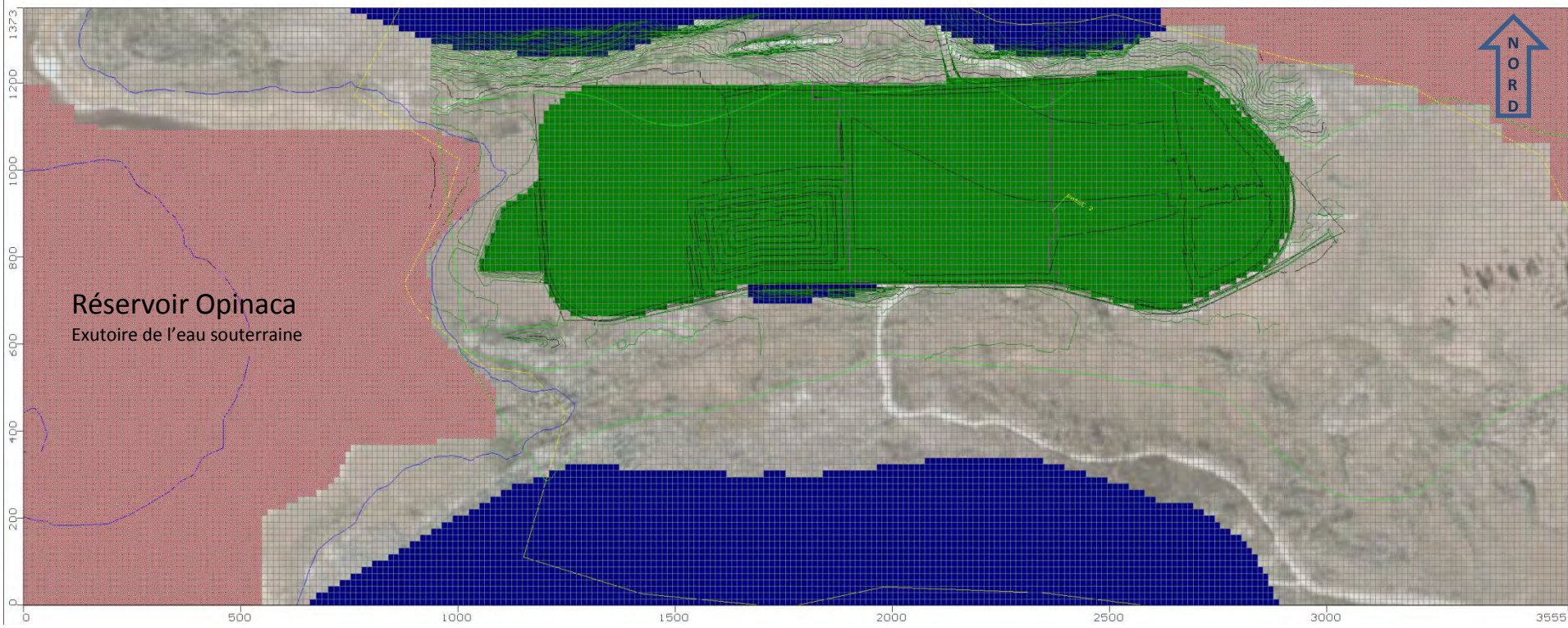
Vue en plan et coupes du modèle hydrogéologique incluant le PAR



Zones roses = cellules inactives

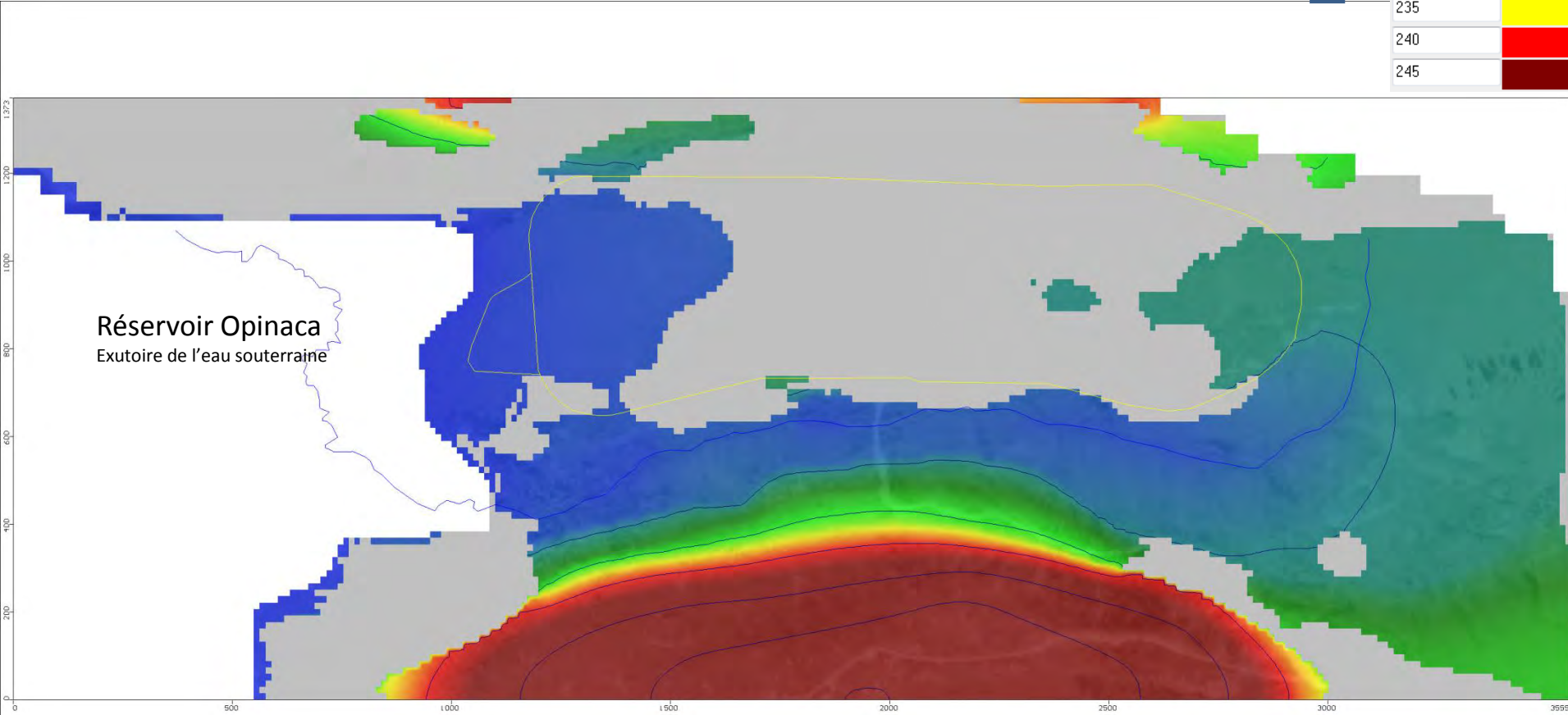
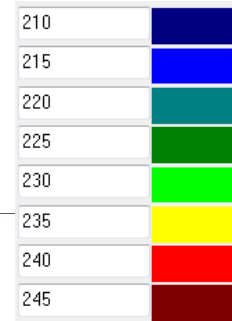
Recharge appliquée sur le modèle avec zone plus faible pour représenter le PAR

Bleu = 20 mm/an
Vert = 1.4 mm/an
Transparent = 8 mm/an



Zones roses = cellules inactives

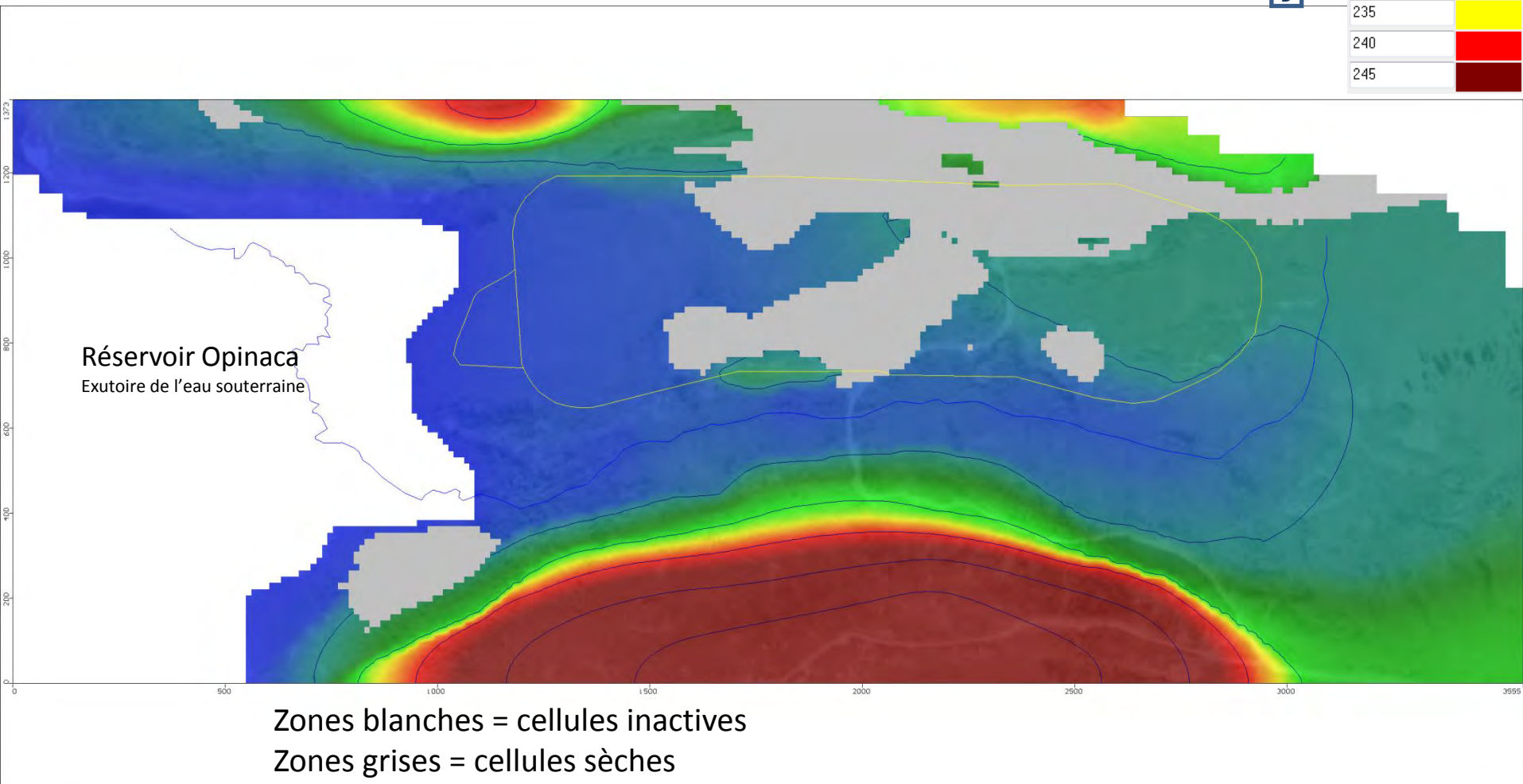
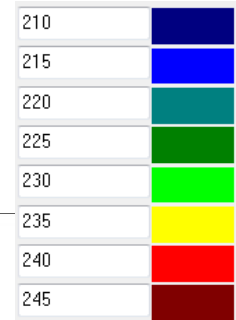
Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 1



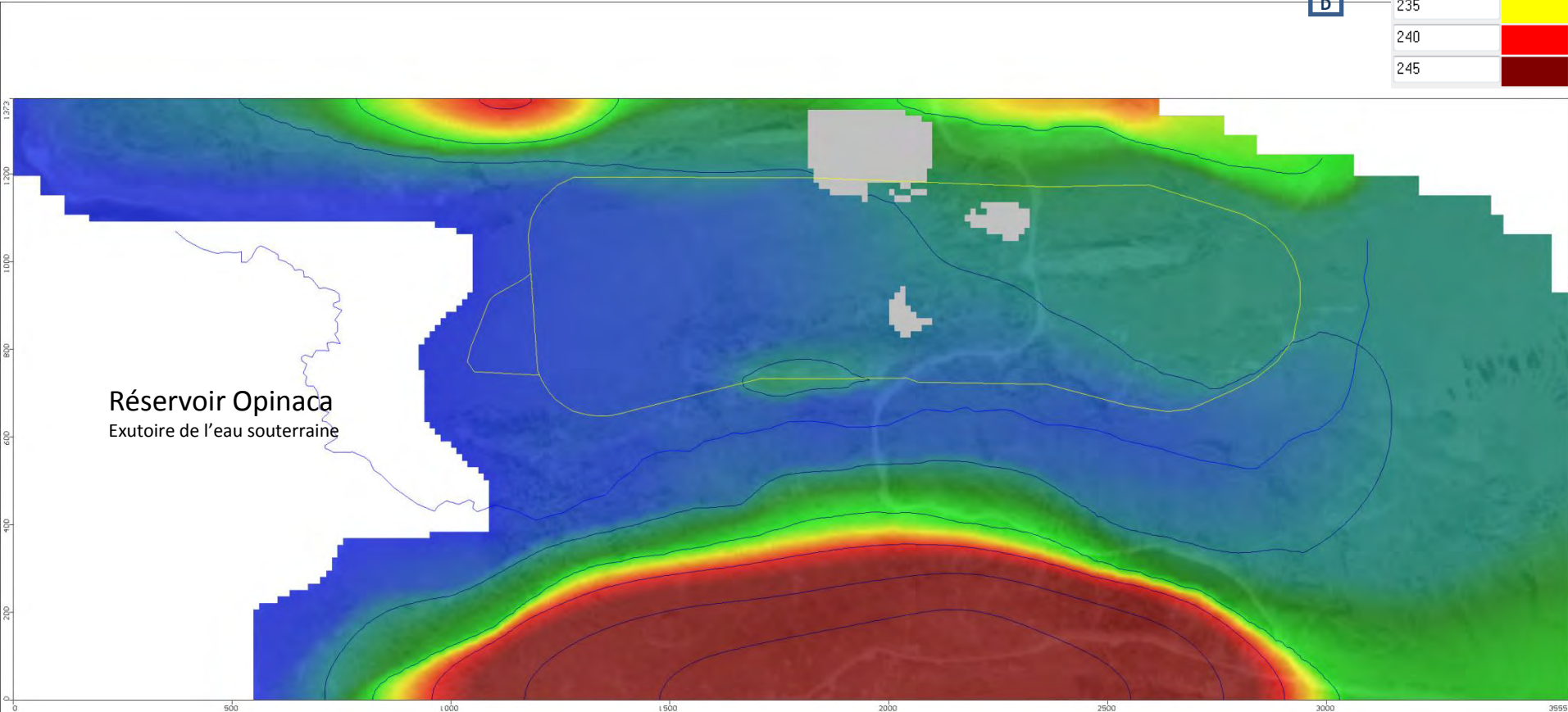
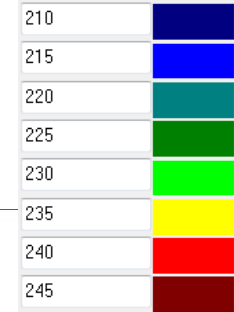
Réservoir Opinaca
Exutoire de l'eau souterraine

Zones blanches = cellules inactives
Zones grises = cellules sèches

Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 2



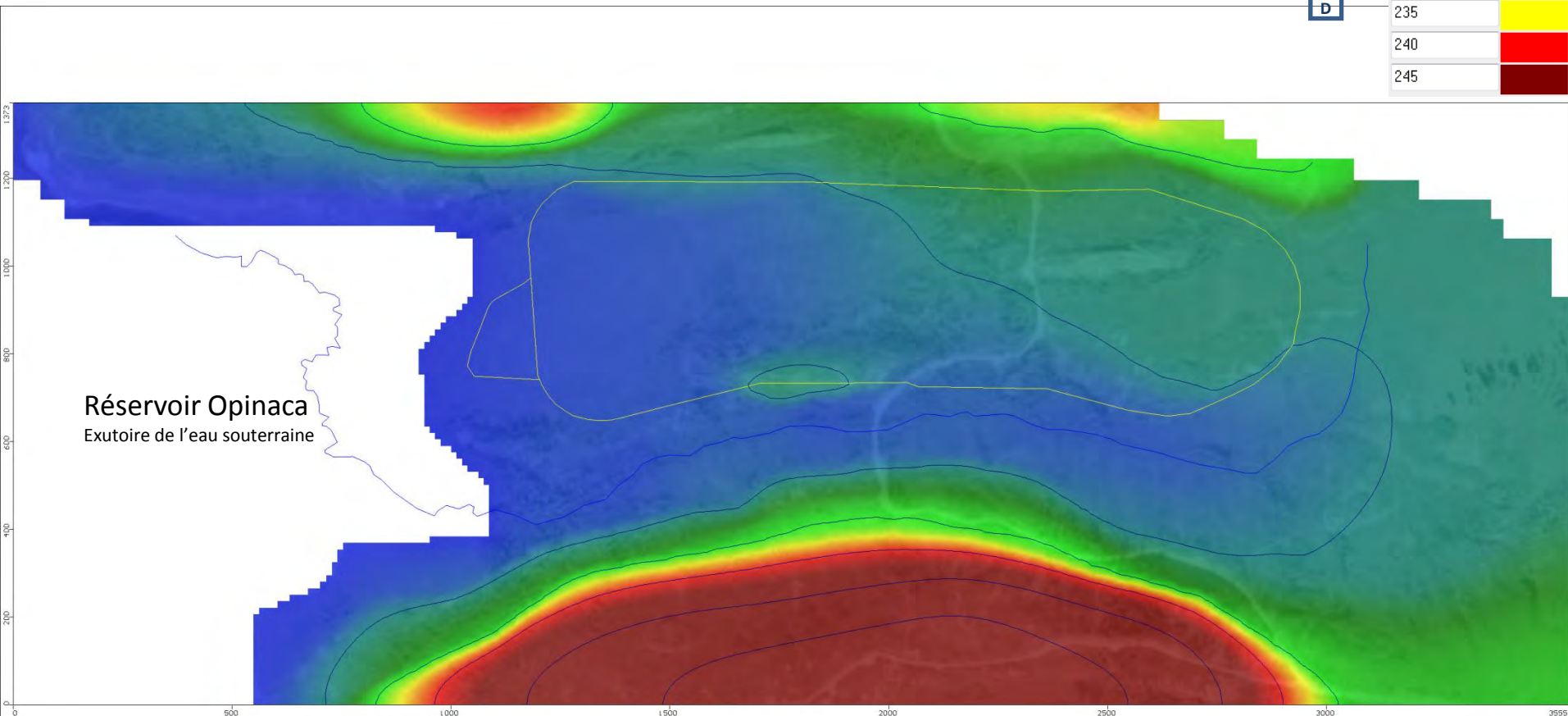
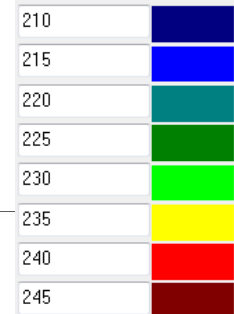
Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 3



Réservoir Opinaca
Exutoire de l'eau souterraine

Zones blanches = cellules inactives
Zones grises = cellules sèches

Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 4



Réservoir Opinaca
Exutoire de l'eau souterraine

Zones blanches = cellules inactives
Zones grises = cellules sèches



SNC • LAVALIN

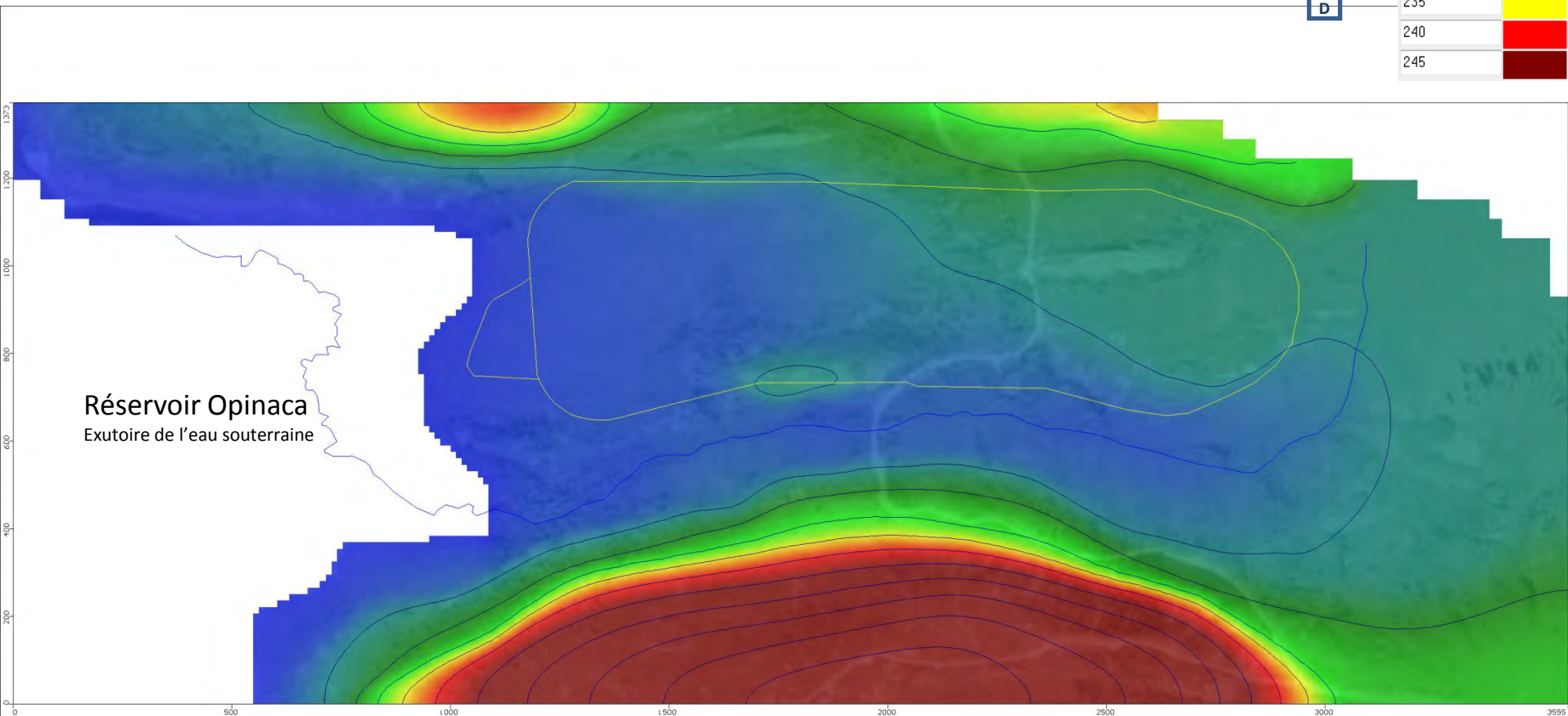
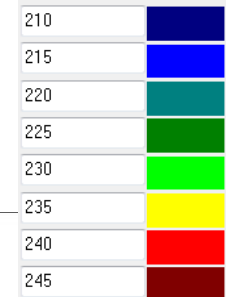
Modélisation
hydrogéologique
et de transport

Demande de CA – Phase 2 – Mine Éléonore

Projet: 628178 - 4000

Figure: 30

Charge hydraulique du parc à résidus à la fermeture pour la couche 5



Réservoir Opinaca
Exutoire de l'eau souterraine

Zones blanches = cellules inactives
Zones grises = cellules sèches



SNC • LAVALIN

Modélisation
hydrogéologique
et de transport

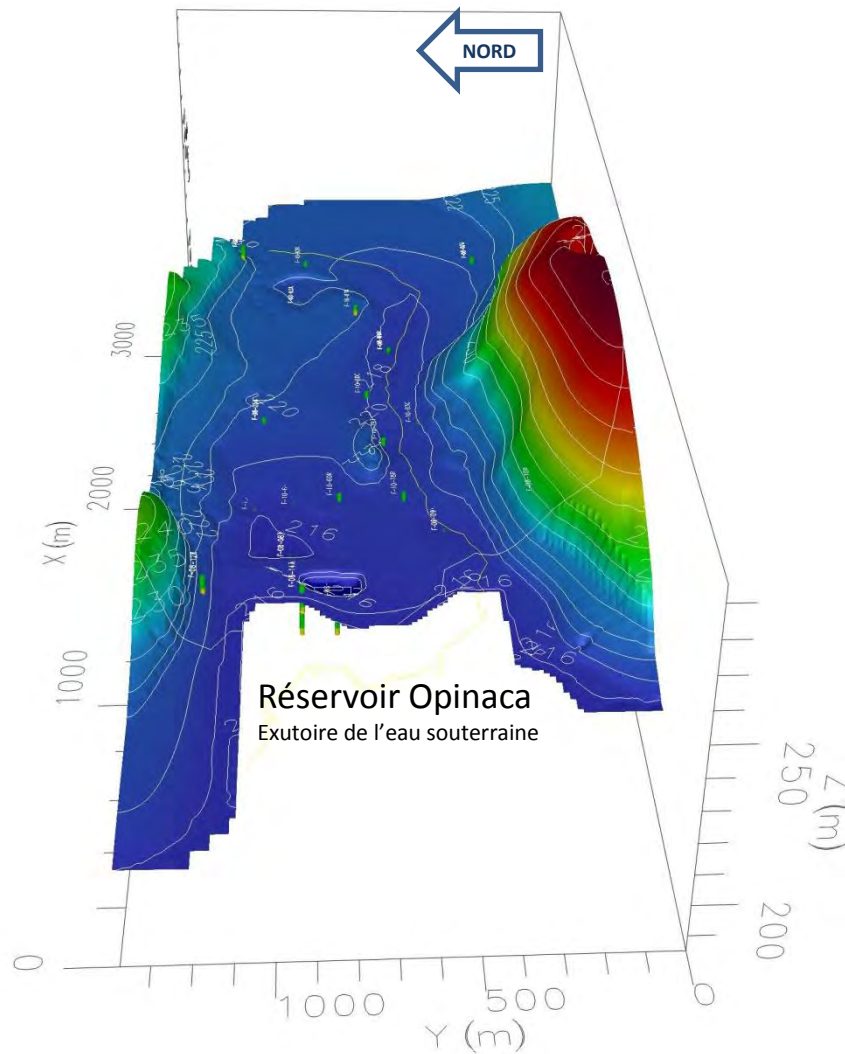
Demande de CA – Phase 2 – Mine Éléonore

Projet: 628178 - 4000

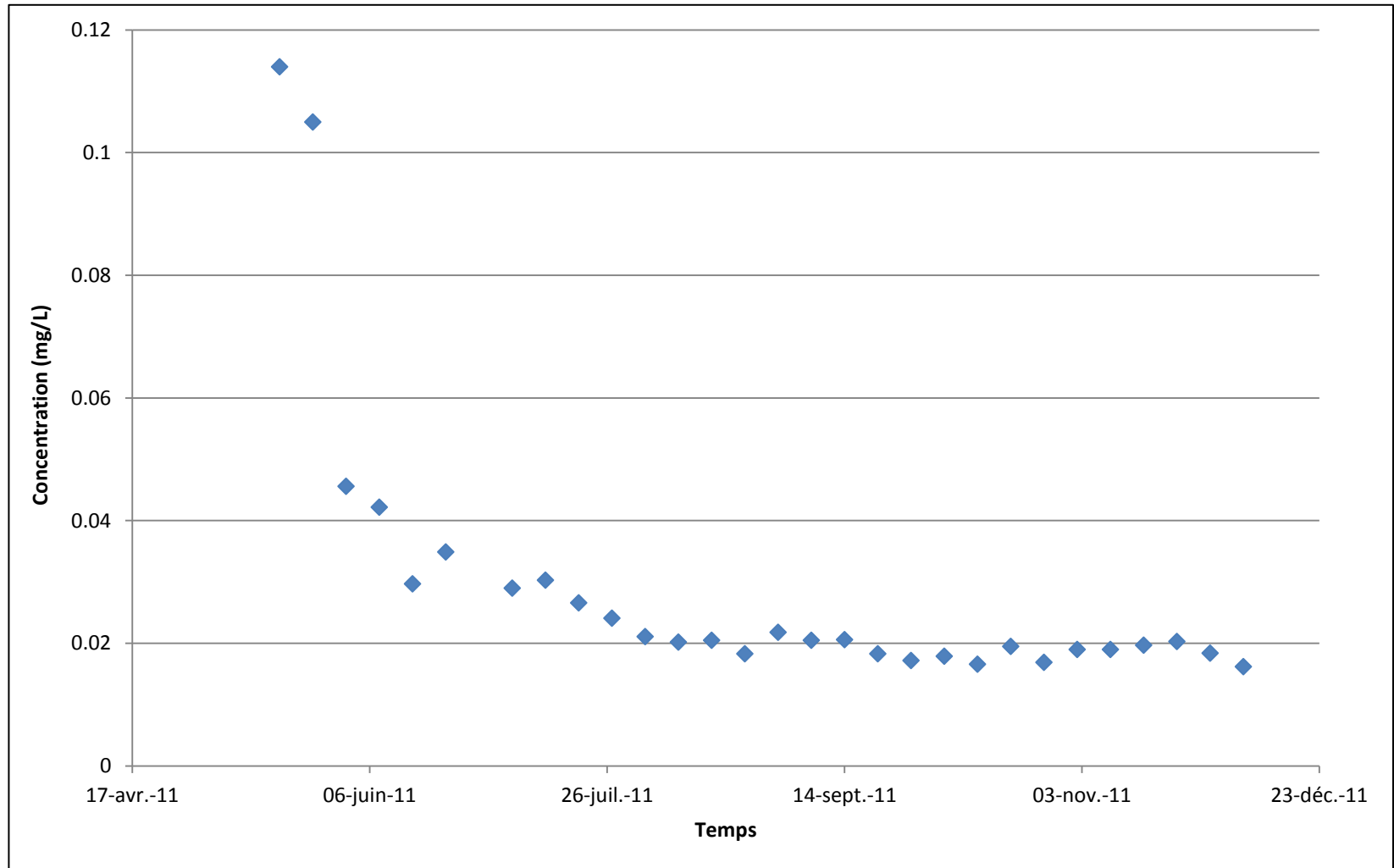
Figure: 31

Nappe piézométrique 3D avec le PAR et le bassin de collecte

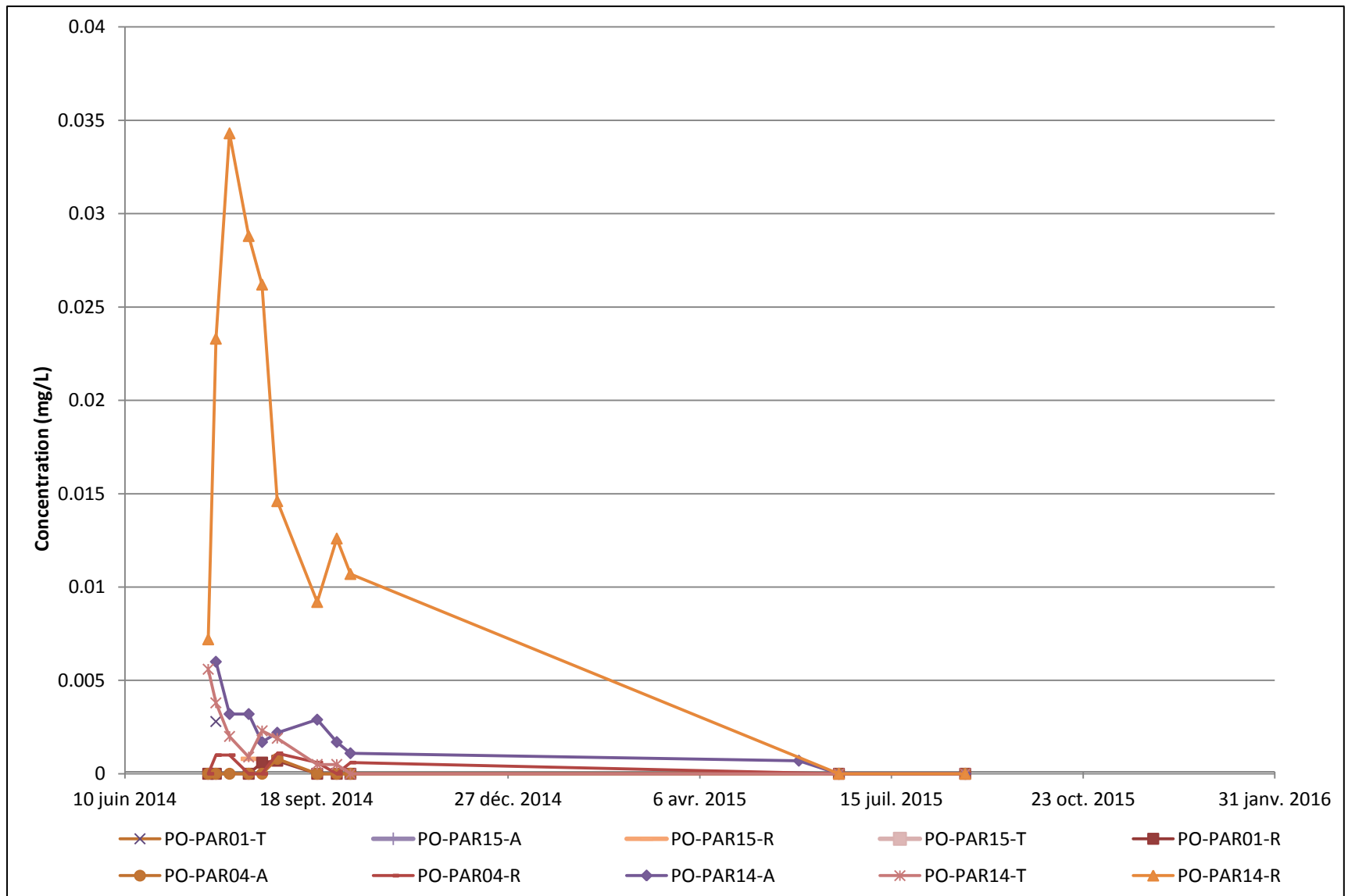
Charge hydraulique (m)



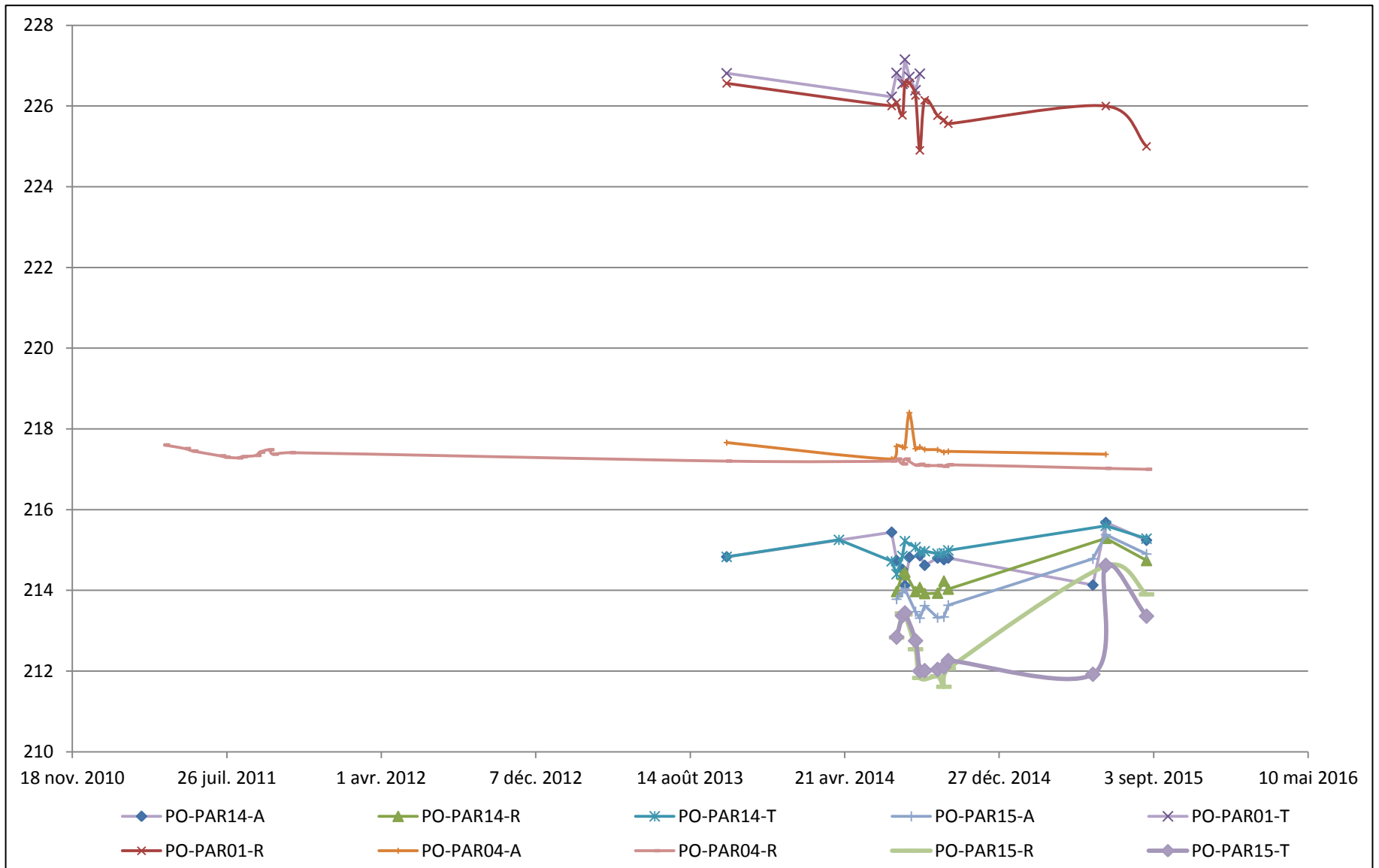
Évolution de la concentration en arsenic lors de l'essai en cellule humide (30 cycles de mouillage/séchage)



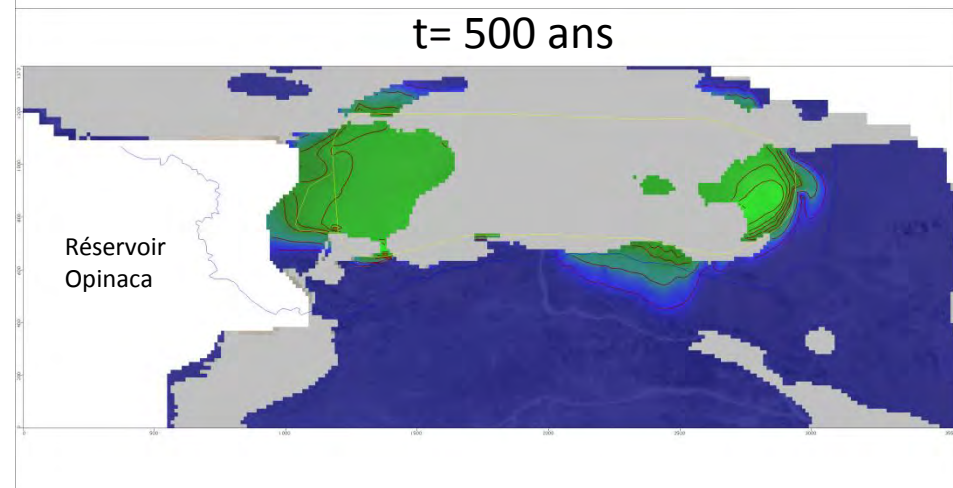
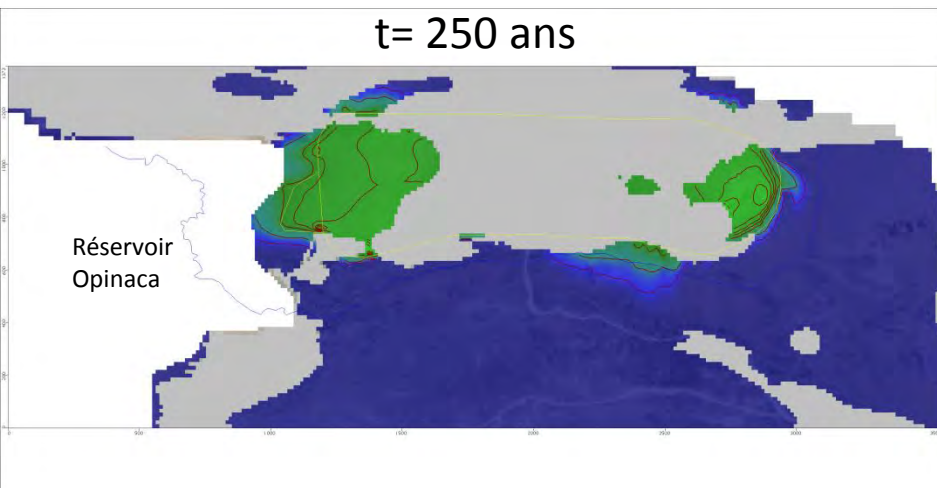
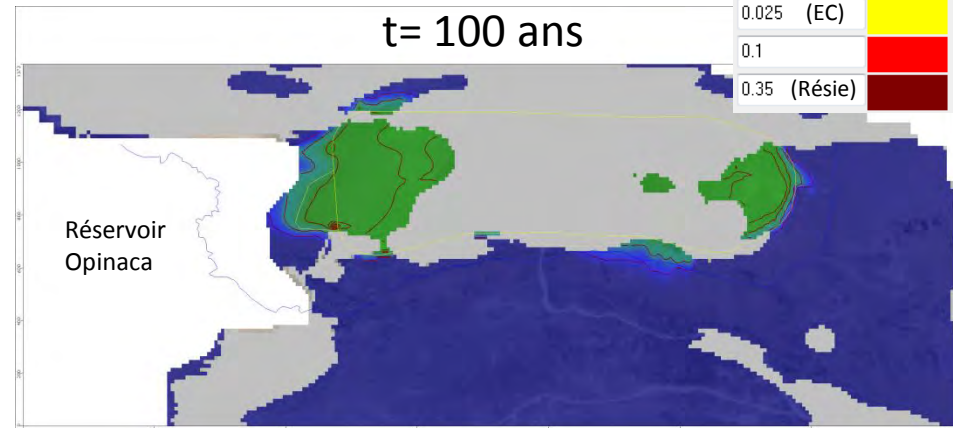
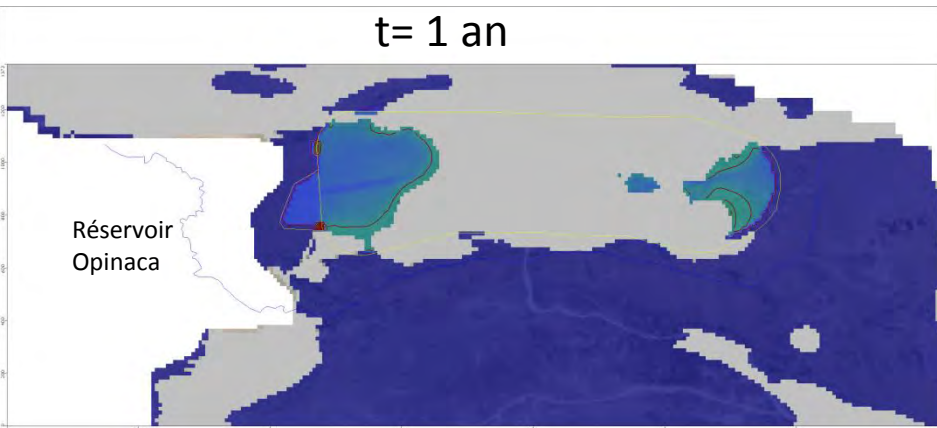
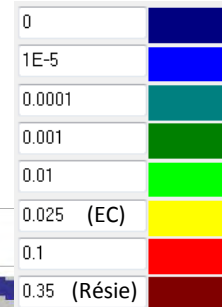
Évolution de la concentration en arsenic dans les piézomètres de suivi



Évolution du niveau piézométrique dans les piézomètres de suivi

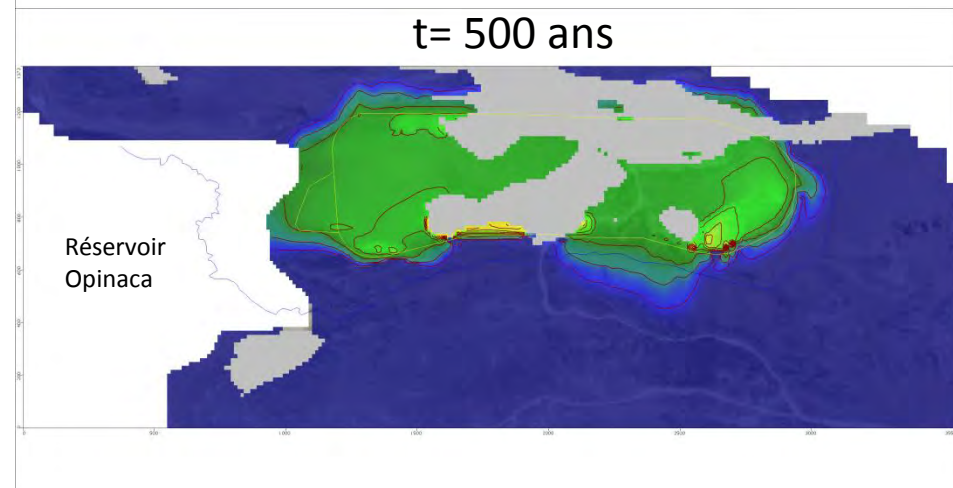
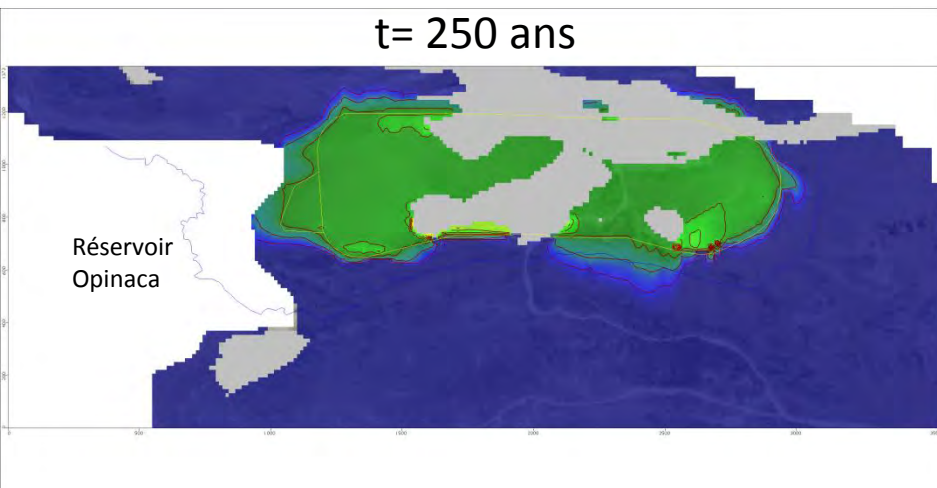
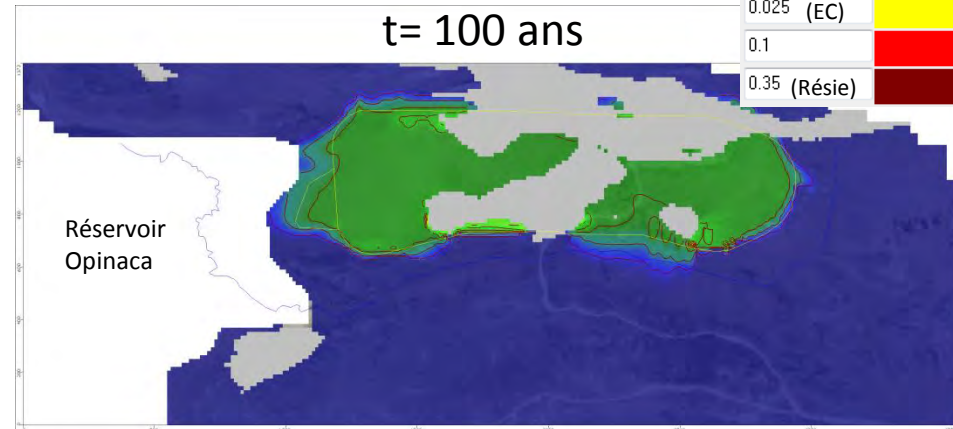
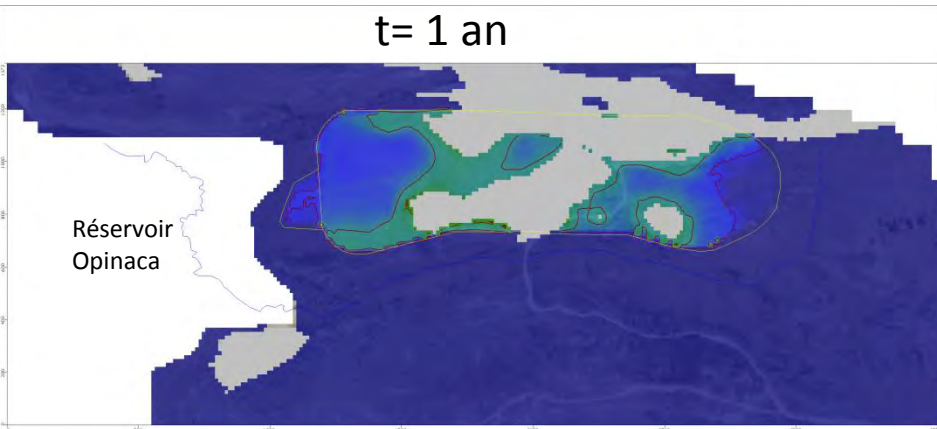
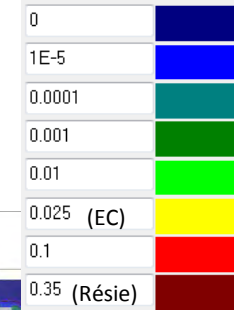


$C_{source} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 1



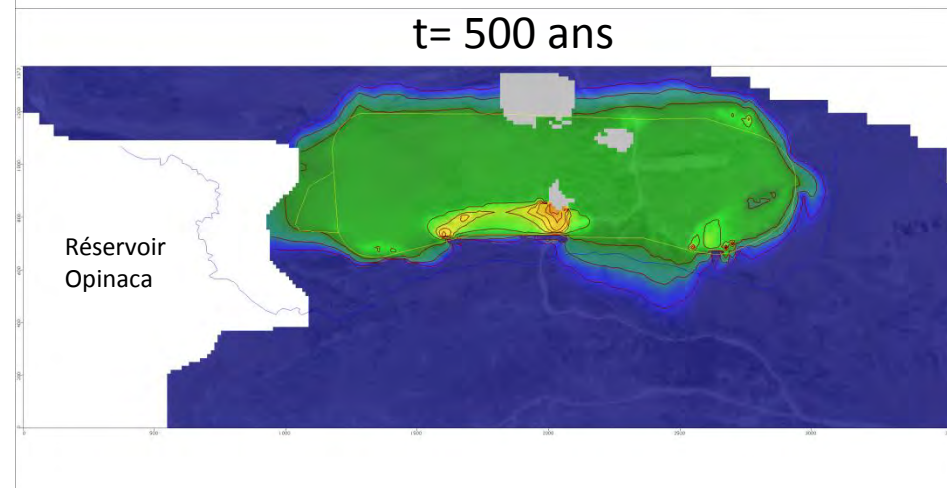
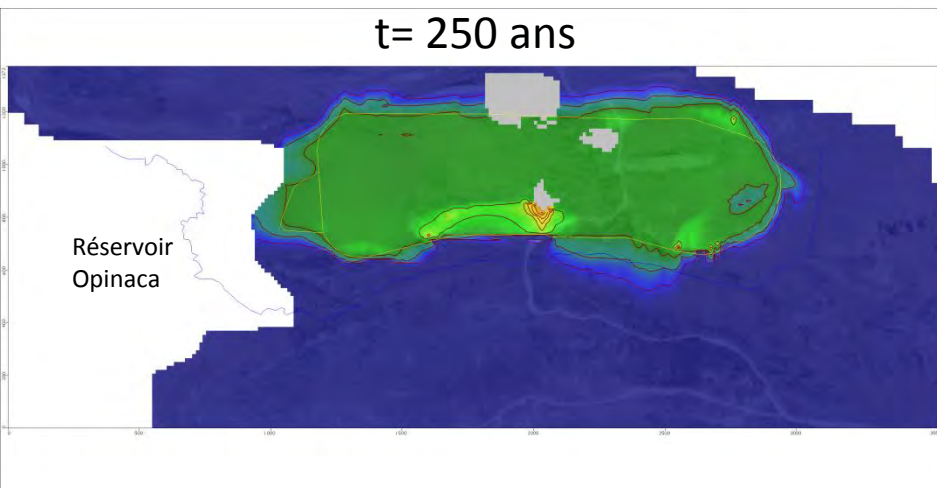
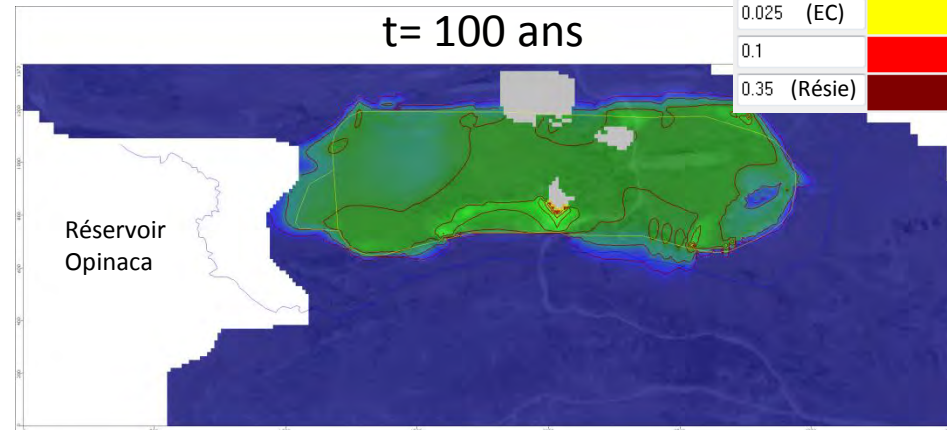
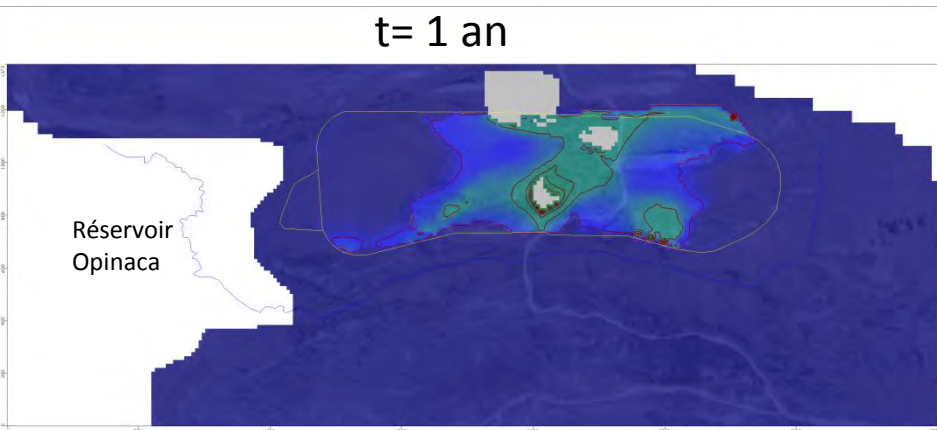
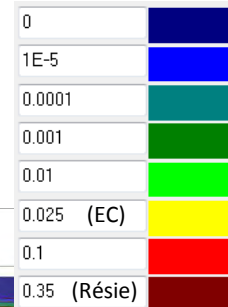
Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches

$C_{\text{source}} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 2



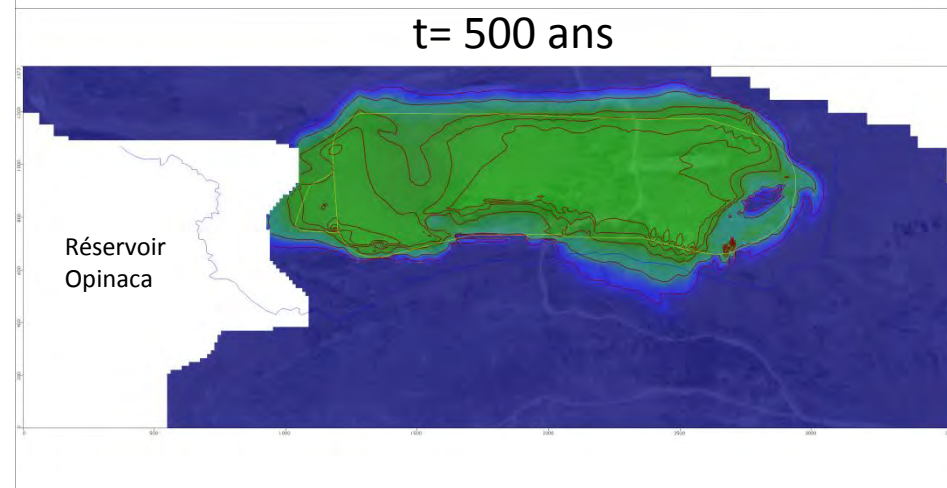
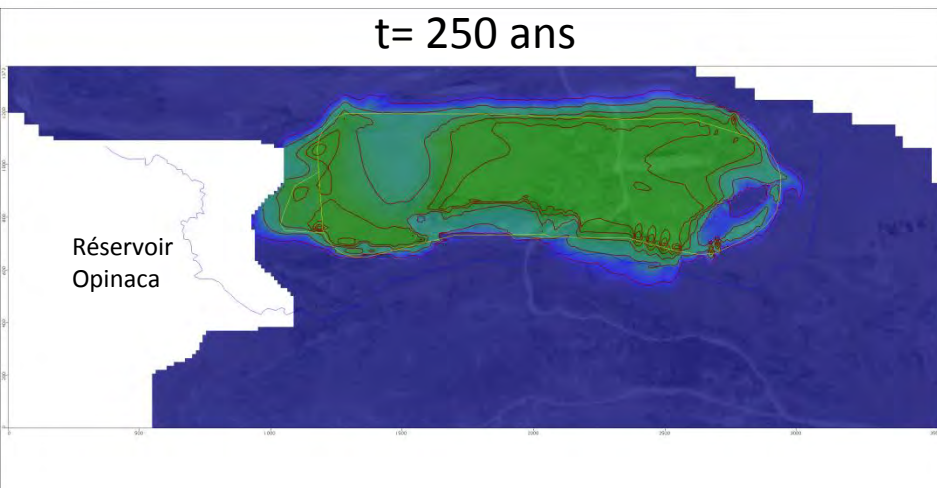
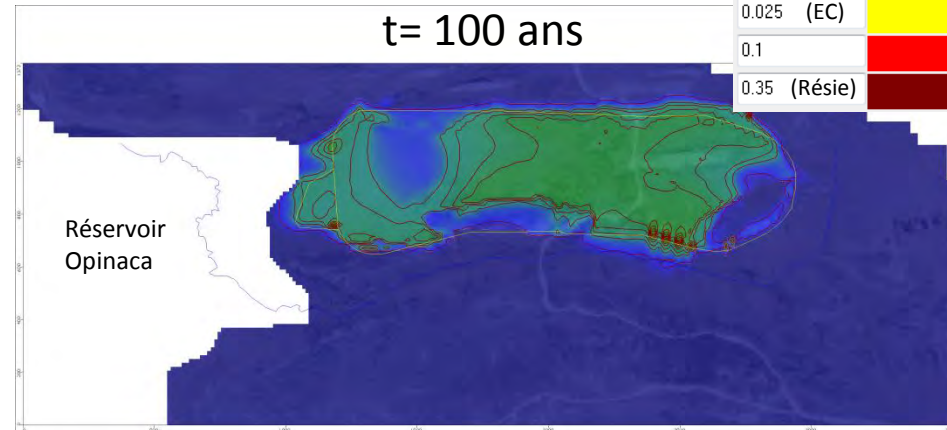
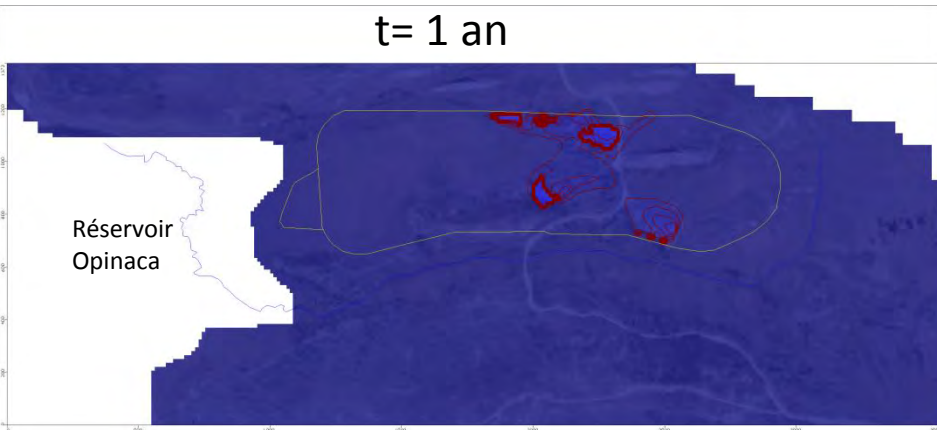
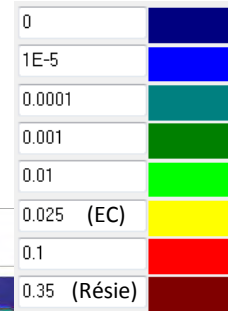
Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches

$C_{source} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 3



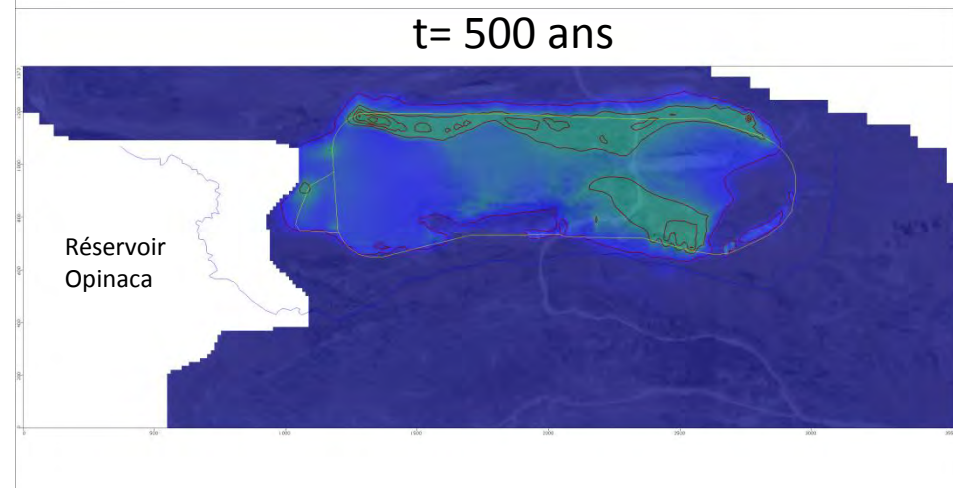
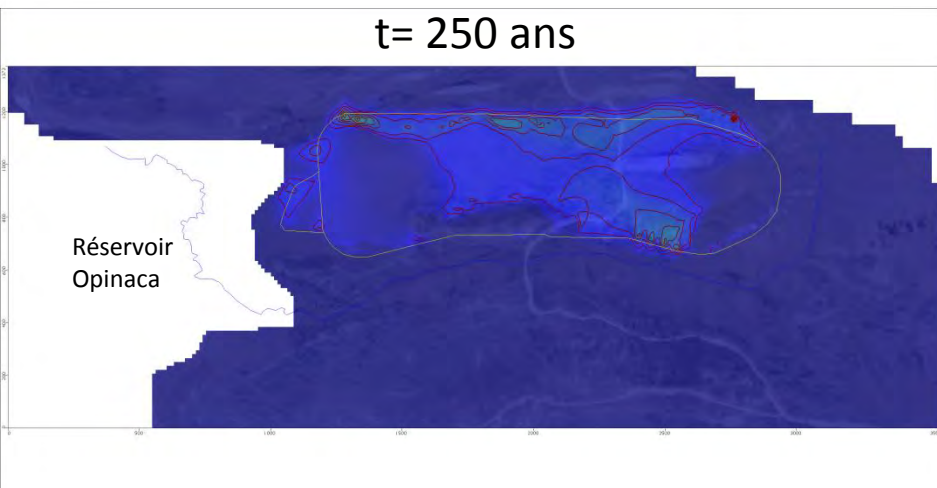
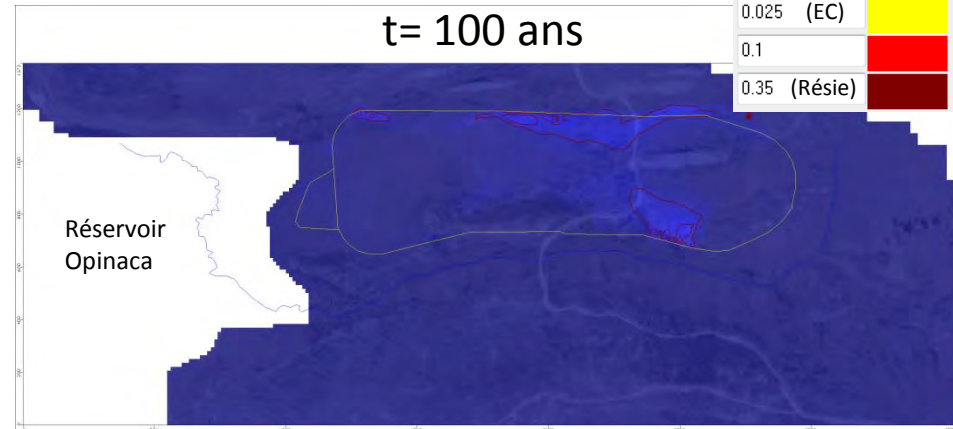
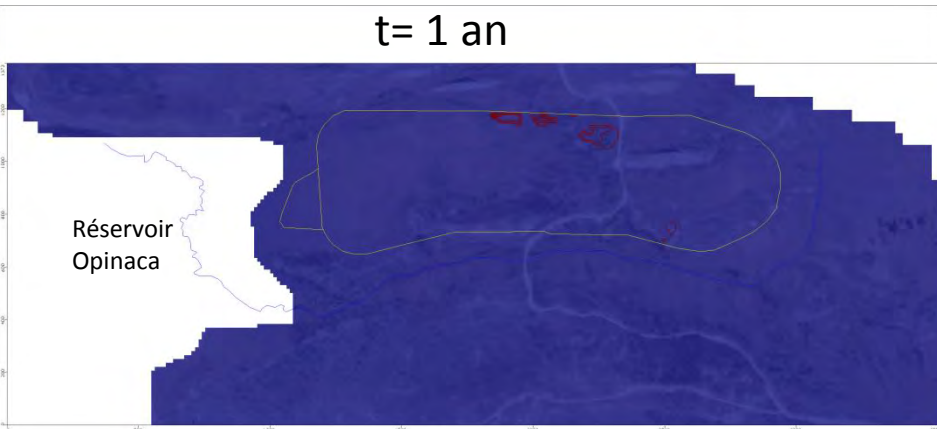
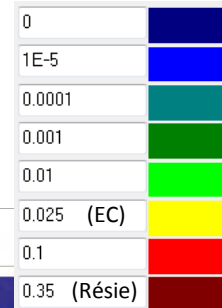
Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches

$C_{source} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 4

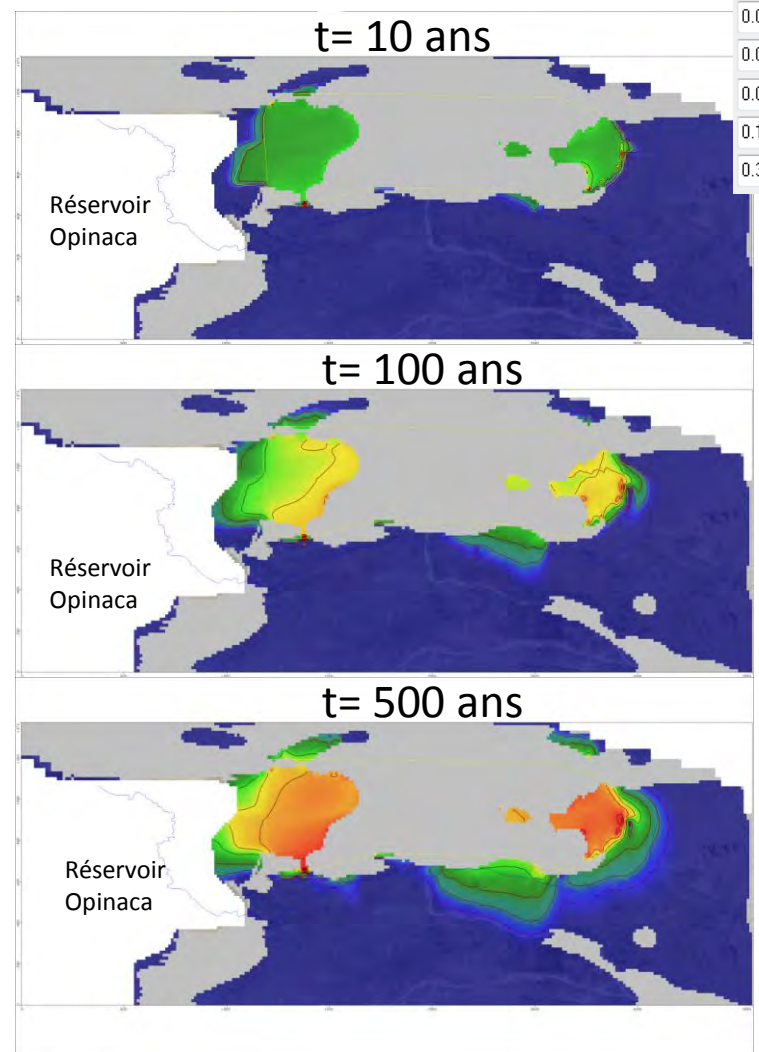
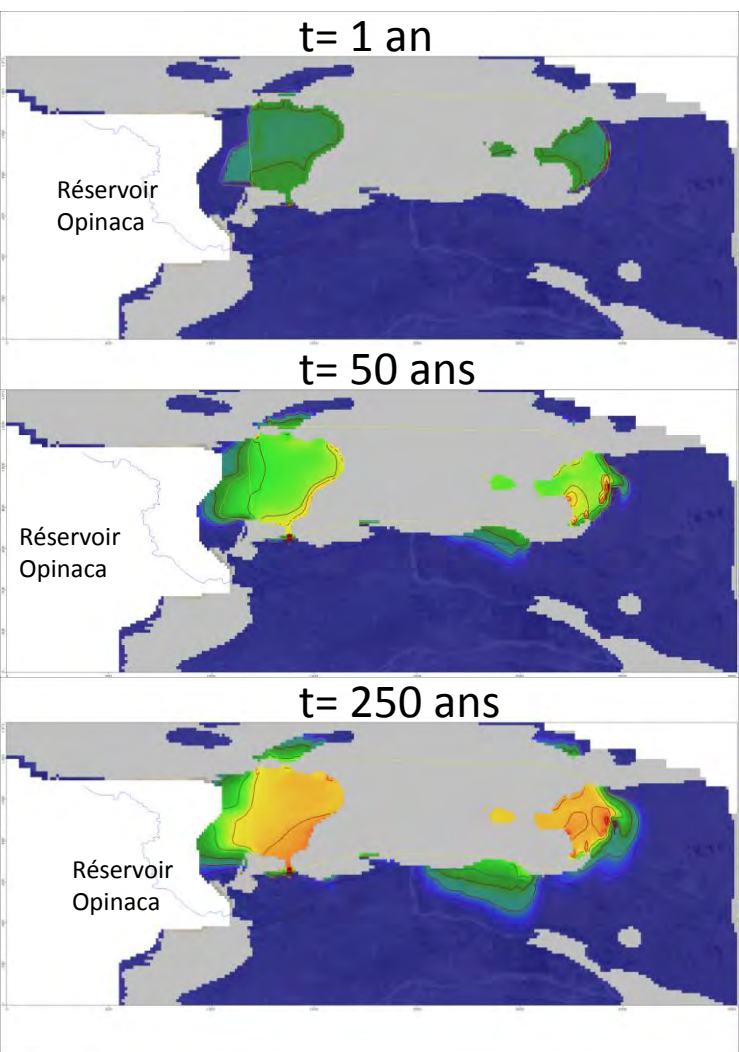
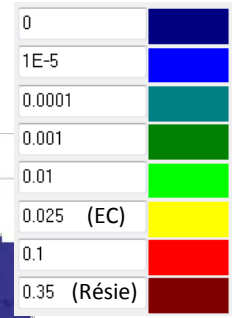


Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches

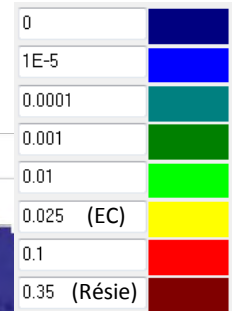
$C_{source} = 0,46 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 5



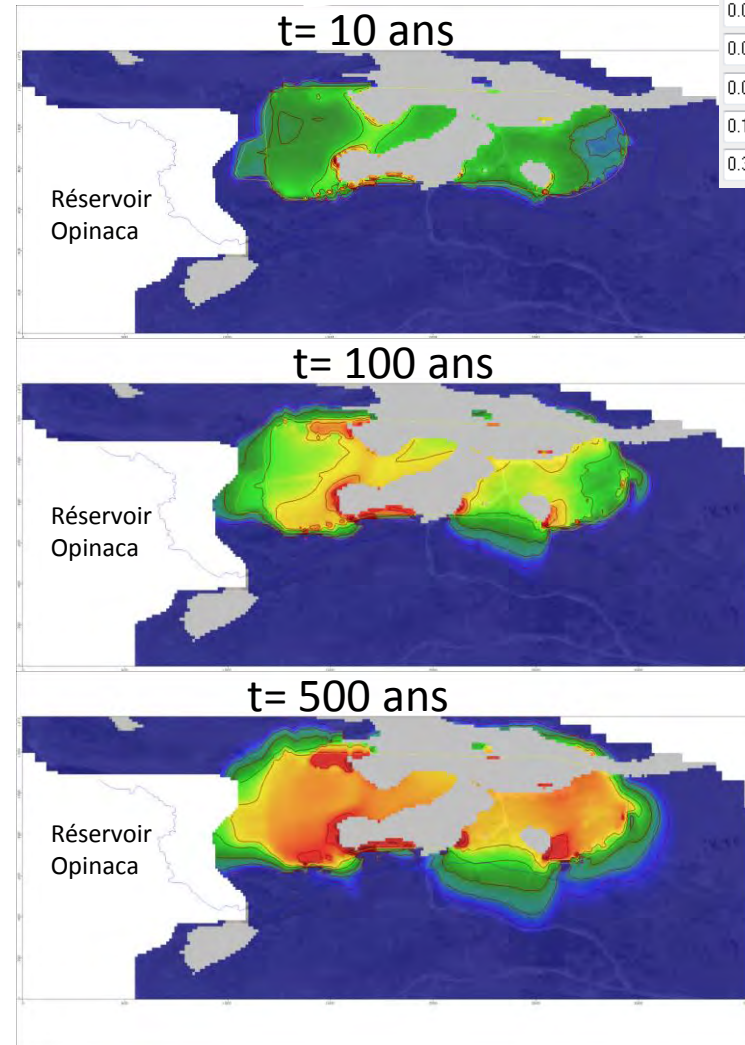
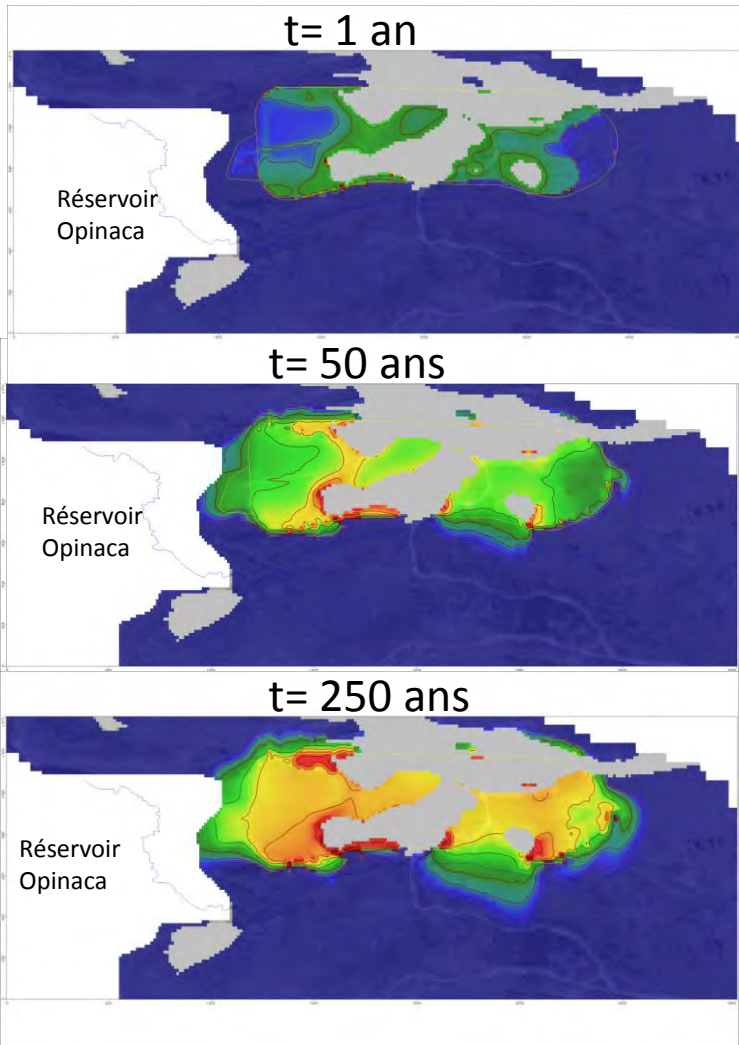
Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches



Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches

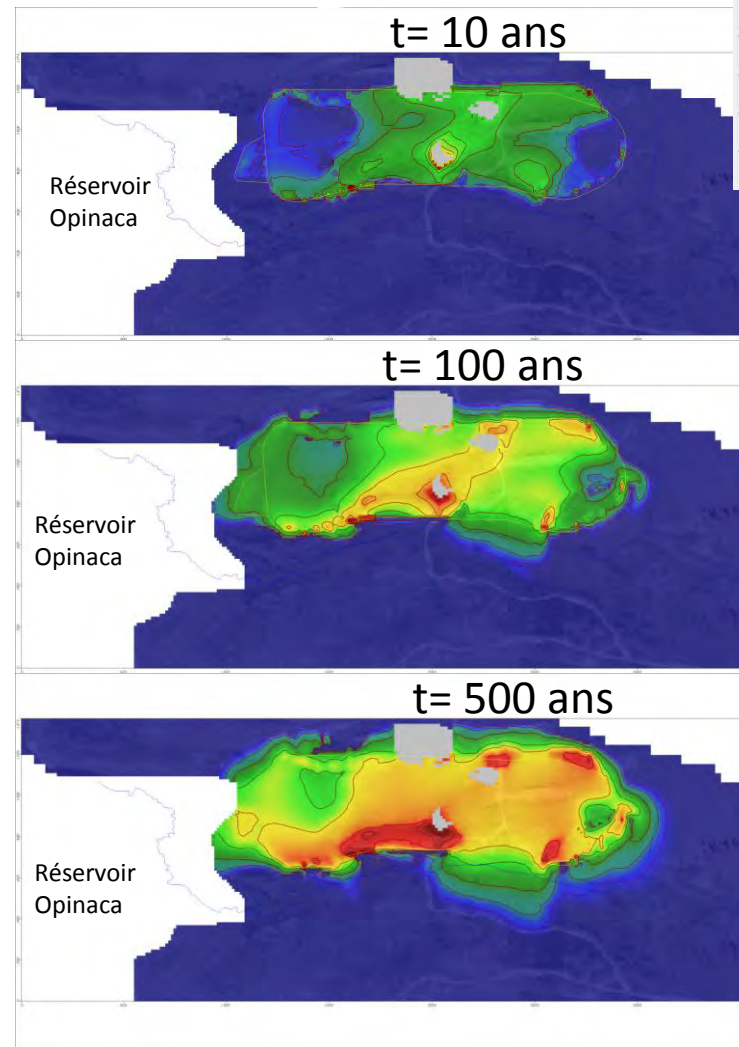
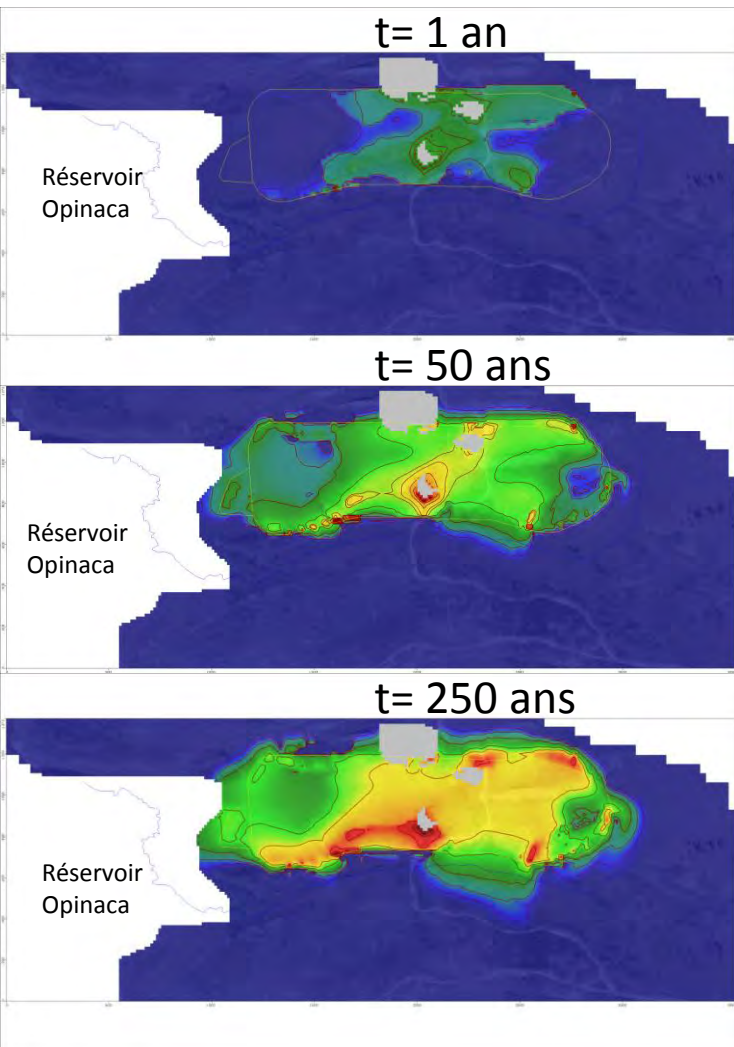
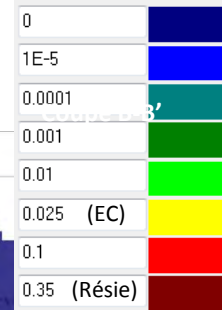


$C_{source} = 2,8 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 2



Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches

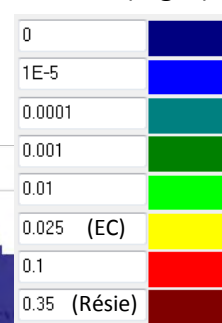
$C_{source} = 2,8 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 3



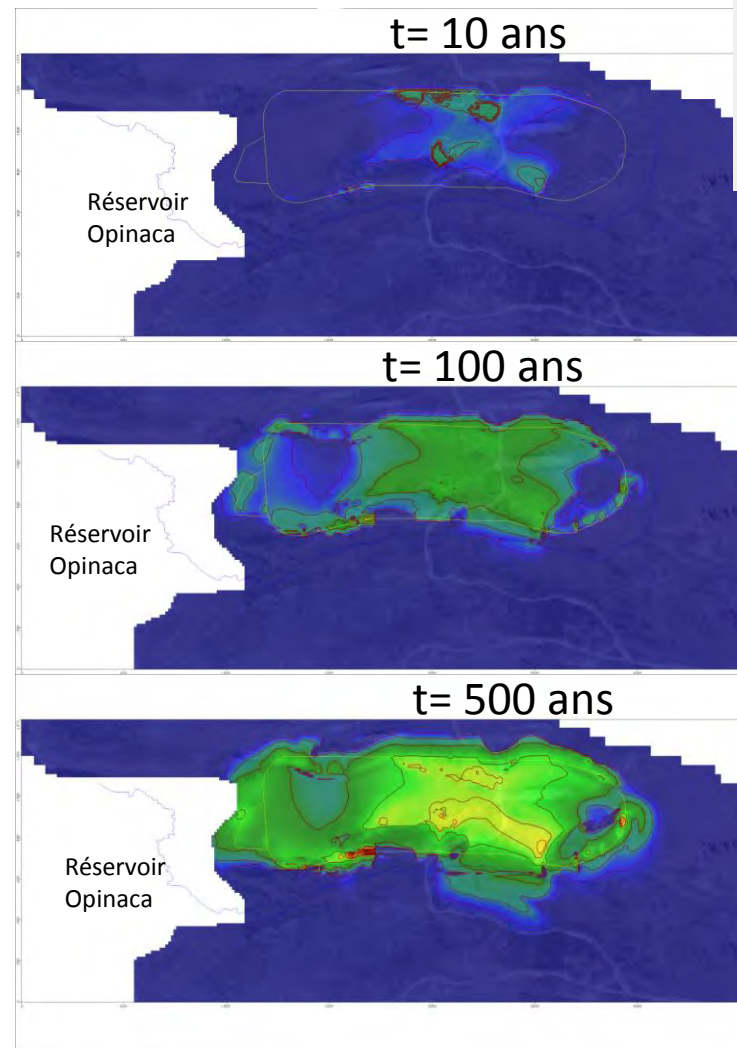
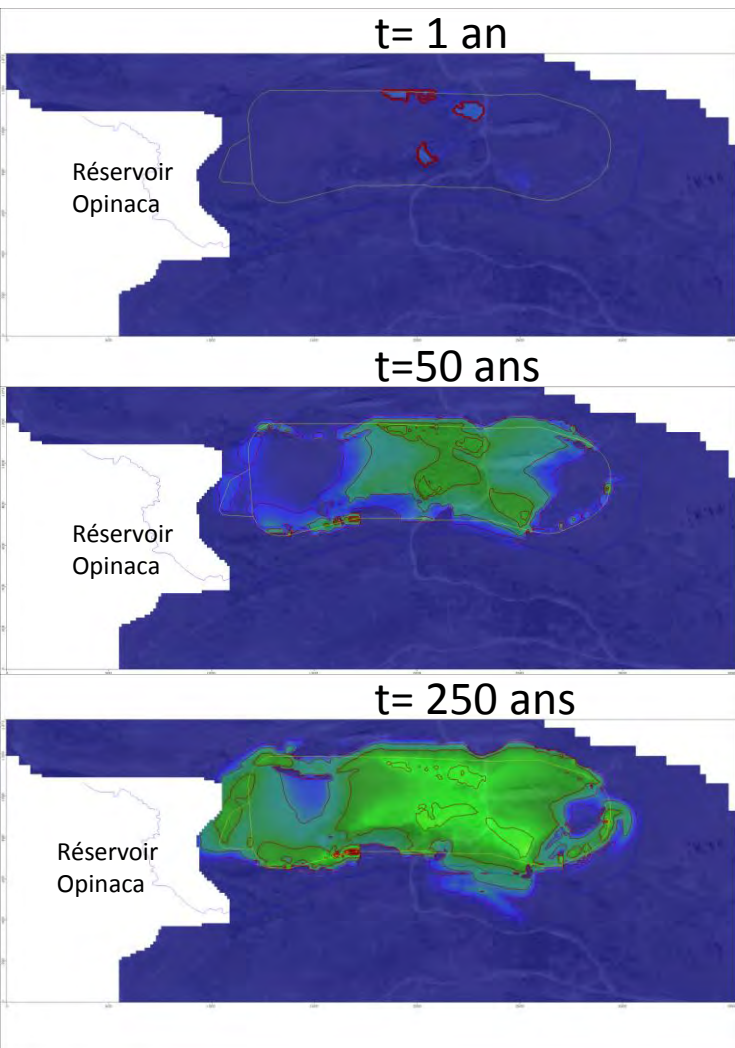
Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches



Concentration [As] (mg/L) :



$C_{source} = 2,8 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 4



Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches



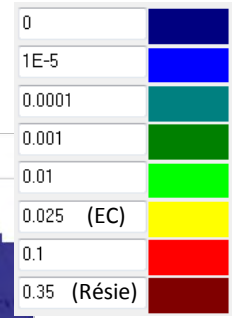
SNC • LAVALIN

**Modélisation
hydrogéologique
et de transport**

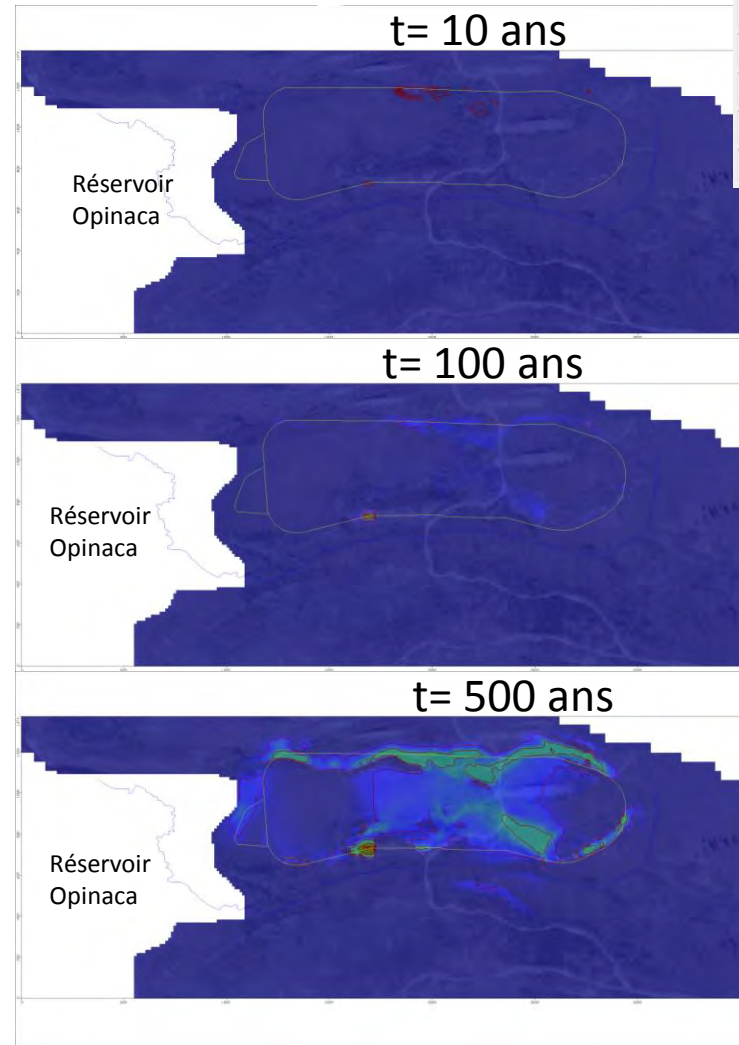
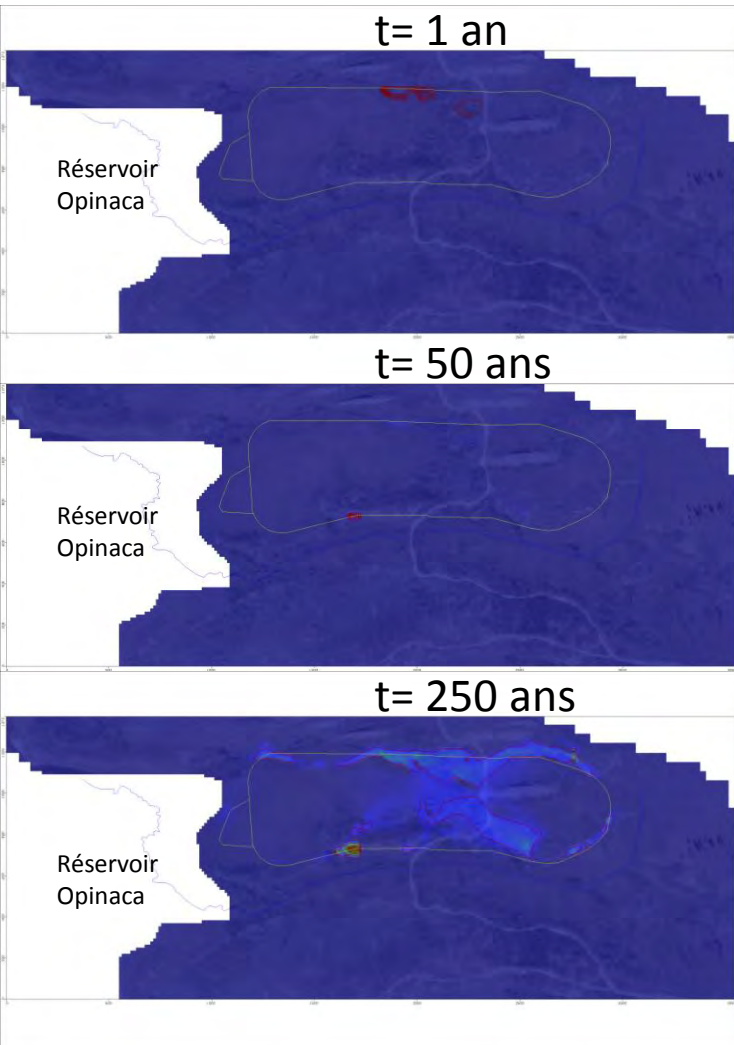
Demande de CA – Phase 2 – Mine Éléonore

Projet: 628178 - 4000

Figure: 44




$C_{source} = 2,8 \text{ mg/L}$: Suivi de la concentration en arsenic – Couche 5



Zones blanches = cellules inactives Zones grises = cellules sèches

ANNEXE B

Calcul de Giroud

	Notes de calcul/Design Brief	N. de projet Project No.	Subdivision Phase	Element Element
SNC-LAVALIN	<u>ÉLÉMENT/ELEMENT</u>	628178		
	Débit au travers de perforations d'une géomembrane	Date:13/05/05	Page 1	
	Ingénierie détaillée Phase II Éléonore	Préparé par	G.Cosset	29 février 2016
		Prepared by	C.Bélanger	Date

Equation de Giroud :

Equation (2)

$$Q_{GM} = C [1 + 0.1(h_w/t)^{0.95}] a^{0.1} h_w^{0.9375}$$

[For $h_w \geq 3$ m, and defect diameter $a \leq 5 \times 10^{-4}$ m² (25 mm dia.)]

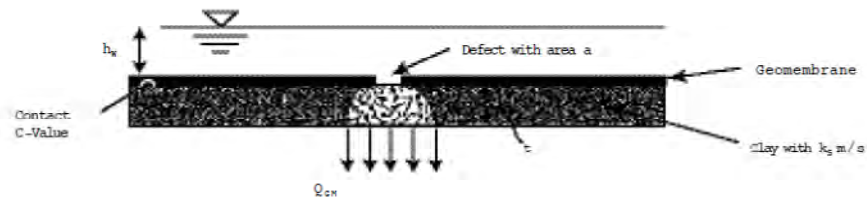
where Q_{GM} = rate of leakage through a defect (m³/s), C = a constant related to the quality of the intimate contact between the geomembrane and its underlying clay liner, h_w = head of liquid on top of the geomembrane (m), t = thickness of the soil component of the composite liner (m), a = area of defect in geomembrane (m²), and k_s = hydraulic conductivity of the underlying clay liner (m/s)

Hypothèse de travail utilisé:
Défectuosité circulaire
Aire = 1 cm²
2,5 défectuosité par hectares

C	0.01		
a	1.00E-04	m ²	1800
ks	2.70E-08	m/s	
h	33.00	m	

Débits Calcul de Giroud							
Infiltration	K	Nappe moyenne	Δh	Par trou	Moyenne		
	m/s	m	m	m ³ /s	m ³ /m ² /s	l/m ² /jr	mm/an
2%	2.70E-08	235.7	15.7	1.45E-07	3.63E-11	0.0031	1.1442
8%	2.70E-08	238.9	18.9	1.73E-07	4.32E-11	0.0037	1.3615

Figure 5: Drawing illustrating the factors taken into account by the "Giroud equation" for estimating leakage through a hole in the geomembrane part of a composite liner.



Montréal, le 8 février 2018

Monsieur Jean-François Painchaud
Coordonnateur Parc à résidus et Arpentage
Goldcorp, Mine Éléonore
333, 3^{ème} Rue, Bureau 2
Chibougamau (Québec)
G8P 1N4

Par courriel : jf.painchaud@goldcorp.com

Objet : Zones drainantes, Parc à résidus – Mine Éléonore
Notre dossier : 625664-2018-0002

Monsieur,

Pour faire suite aux discussions qui ont eu lieu l'été passé entre M. Jean-François Painchaud de Goldcorp et M. Philip Gomes de SNC-Lavalin pendant l'inspection du parc à résidus (PAR), et à la réception de votre figure 20 (jointe à cette lettre) le 30 janvier 2018, cette lettre présente nos avis sur les zones drainantes proposées dans le PAR.

Pour aider le drainage de surface au PAR et le roulement des camions pendant les périodes de pluie, Goldcorp a proposé de construire des routes avec des stériles miniers et de les connecter à un drain central. Ces travaux ont déjà commencé. Les détails des routes et le drain central sont présentés sur la figure 20.

SNC-Lavalin est d'accord avec le concept du drainage qui est conçu pour aider l'évacuation de l'eau de surface et celle générée par la consolidation des boues. Comme il n'y a pas de zone de transition entre les résidus et les stériles miniers telle qu'un géotextile, les vides des stériles seront ultimement remplis au moins partiellement de résidus. Cela n'aura pas d'impact sur le concept étant donné parce que les zones drainantes ne sont pas conçues pour aider le drainage jusqu'au fond de la pile à long terme. Aussi, il est important de mettre 2 m de résidus pour protéger la géomembrane avant de placer les stériles.

Le concept des zones drainantes (routes et drain central) est faisable. Le seul désavantage est que les stériles vont réduire un peu la capacité du PAR.

Espérant le tout à votre entière satisfaction, nous demeurons à votre disposition pour tout renseignement supplémentaire.

SNC-LAVALIN INC.



Philip S. Gomes, ing.
Directeur de projet
Mines et Métallurgie