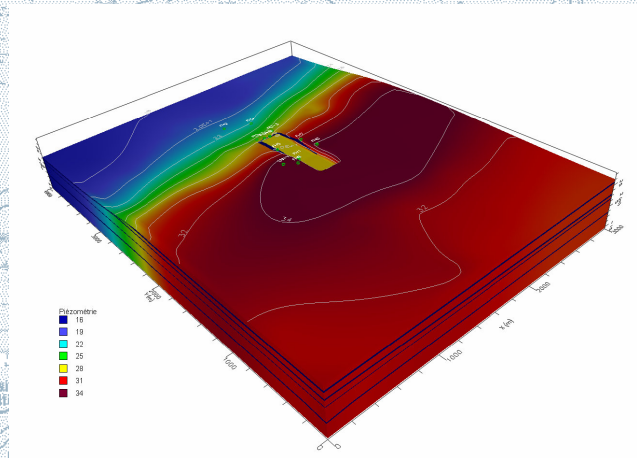


CARRIÈRE RIVE-SUD
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN



Pour
GENIVAR Société en Commandite
2405 boul. Fernand-Lafontaine, bureau 101
Longueuil, (Québec)
J4N 1N7

Par
Richelieu Hydrogéologie Inc.
219, 15^{ième} avenue, Richelieu (Québec)
J3L 3V7

Avril 2009

Richelieu, le 30 avril 2009

GENIVAR Société en Commandite
2405 boul. Fernand-Lafontaine, bureau 101
Longueuil, (Québec)
J4N 1N7

À l'attention de M. Paul Boissonnault M. Sc., directeur de projets

Objet : Carrière Rive-Sud
Modélisation de l'écoulement souterrain

Monsieur,

J'ai le plaisir de vous faire parvenir les résultats de l'étude visant à simuler l'écoulement de l'eau souterraine autour de la carrière Landreville, afin de déterminer son débit d'assèchement projeté.

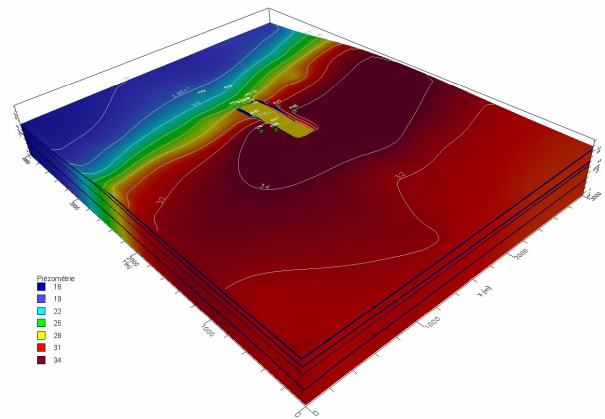
À l'aide des travaux et de la documentation fournis par Génivar, un modèle conceptuel hydrogéologique a été formulé, puis numérisé à l'aide du logiciel Visual MODFLOW Pro. Le modèle numérique a été calibré et validé sur des mesures de niveau d'eau et de débit, puis utilisé pour faire des simulations prédictives.

Les résultats obtenus démontrent que le débit d'infiltration calculé en régime permanent serait de l'ordre de 30 m³/jour, ce qui, réparti sur la superficie de la carrière, correspond à un débit d'infiltration moyen de $1,7 \times 10^{-4}$ m³/jour d'eau par mètre carré. La méthode et le détail des calculs effectués sont présentés dans ce document.

En espérant que le tout vous conviendra, veuillez agréer, Monsieur Boissonnault, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Yves Leblanc, ing. géo.
M.Sc. Hydrogéologue

CARRIÈRE RIVE-SUD
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN



Pour
GENIVAR Société en Commandite
2405 boul. Fernand-Lafontaine, bureau 101
Longueuil, (Québec)
J4N 1N7

Par
Richelieu Hydrogéologie Inc.
219, 15^{ième} avenue, Richelieu (Québec)
J3L 3V7

Avril 2009

TABLE DES MATIÈRES

1.	Introduction.....	3
1.1.	Mandat et objectifs.....	3
1.2.	Justification de l'utilisation de la méthode numérique.....	3
1.3.	Contexte hydrogéologique	4
2.	Méthodologie	5
3.	Modèle hydrogéologique conceptuel.....	7
3.1.	Unités hydrostratigraphiques.....	7
3.2.	Propriétés hydrogéologiques.....	8
3.3.	Piézométrie	10
3.4.	Recharge de l'aquifère	11
3.5.	Vidange de l'aquifère	11
4.	Modèle numérique.....	12
4.1.	Code numérique utilisé	12
4.2.	Grille du modèle numérique	12
4.3.	Conditions limites.....	13
4.4.	Propriétés hydrogéologiques.....	15
5.	Calibrage et validation du Modèle	16
6.	Description des résultats.....	18
7.	Analyse de sensibilité des paramètres du modèle	19
8.	Conclusions et recommandations	21

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Carte de localisation de la propriété à l'étude
Figure 2 : Carte topographique à l'échelle 1 : 20 000
Figure 3 : Extrait de la carte géologique
Figure 4 : Extrait de la carte des dépôts meubles
Figure 5 : Description du modèle numérique
Figure 6 : Piézométrie modélisée sous les conditions actuelles d'écoulement
Figure 7 : Piézométrie modélisée lorsque la carrière est en condition de pompage

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs de conductivité hydraulique obtenues en 1983 (hydrogéologie-Canada)	8
Tableau 2: Valeurs de conductivité hydraulique obtenues en 2005 (Solmers)	9
Tableau 3: Charges hydrauliques mesurées lorsque la carrière était en opération (1981-1983)	10
Tableau 4: Charges hydrauliques mesurées après l'abandon de la carrière (2005-2006)	11
Tableau 5: Statistiques de calibrage du modèle numérique	16
Tableau 6: Analyse de sensibilité des paramètres du modèle	20

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1: Figures

1. INTRODUCTION

1.1. Mandat et objectifs

Dans le cadre d'un projet de mise en valeur de l'ancienne carrière Landreville, située à Boucherville, il est projeté d'y enfouir des matériaux secs et de recouvrir ceux-ci afin de combler l'excavation à ciel ouvert. Ce projet est soumis au « *Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles* » qui stipule à l'article 24 que le débit moyen quotidien des infiltrations d'eau souterraine, calculé sur une base annuelle, doit être égal ou inférieur à 5×10^{-4} m³ d'eau par mètre carré que comprend la surface des parois de la carrière ou de la mine située sous le niveau de ces eaux.

Dans ce contexte, *Génivar* a mandaté *Richelieu Hydrogéologie* afin de modéliser l'écoulement souterrain du secteur de la carrière, afin d'évaluer le débit d'infiltration projeté lorsque celle-ci sera vidangée de l'eau qui l'inonde actuellement. La présente étude vise donc à faire la synthèse des données existantes, concevoir un modèle conceptuel, en faire la numérisation à l'aide d'un logiciel approprié, puis calibrer et valider ce modèle afin de réaliser des simulations prédictives.

Ce document fait la description du modèle hydrogéologique conceptuel ainsi que de la grille, des conditions limites et des propriétés hydrogéologiques du modèle numérique, puis, des résultats de calibrage et de validation du modèle, et enfin, des résultats des analyses prédictives effectuées.

1.2. Justification de l'utilisation de la méthode numérique

La méthode numérique a été retenue en raison des avantages qu'elle offre par rapport aux autres solutions possibles afin de déterminer le débit d'infiltration dans la carrière. En effet, la méthode numérique permet de simuler un ouvrage drainant de forme complexe à l'intérieur d'un aquifère non-homogène. De surcroît, l'utilisation d'un modèle numérique permet de cartographier la piézométrie et les rabattements projetés selon divers scénarios, afin de simuler des scénarios de mesure de mitigation et de faire la gestion de l'aquifère et des activités de surface. Enfin, il s'agit d'une solution qui permet d'éviter la mise en marche et l'opération d'une unité de pompage et de traitement d'eau qui devrait fonctionner pendant plusieurs mois, voire quelques années afin d'obtenir un régime permanent d'écoulement, dans la mesure où l'on voudrait mesurer de façon directe le débit d'infiltration dans la carrière.

1.3. Contexte hydrogéologique

La figure 1 de l'annexe 1 présente une carte de localisation du site à l'étude. Celui-ci est situé dans la région physiographique des Basses-Terres-du-Saint-Laurent, à environ trois kilomètres à l'est du centre-ville de Boucherville.

La figure 2 présente un extrait de la carte topographique 31H11-101 à l'échelle 1 : 20 000. La topographie des lieux est caractérisée par un plateau d'environ 35 mètres d'élévation, allongé dans la direction nord-est / sud-ouest. Ce plateau est drainé en direction sud-est par le ruisseau de La Grande Décharge, lequel s'écoule en direction nord, puis bifurque vers le fleuve St-Laurent à la hauteur de Varennes. En direction nord-ouest, le drainage s'effectue via la rivière La Sabrevois qui s'écoule en direction sud-ouest, jusqu'au fleuve St-Laurent.

La figure 3 présente un extrait de la carte géologique tirée du document MM-8403 du ministère des ressources naturelles du Québec (Globensky, 1985). Il est possible d'y observer que le socle rocheux est constitué de shale du Groupe d'Utica, d'âge Ordovicien. Cette formation géologique sédimentaire est injectée de filons-couches associés aux collines Montérégiennes, d'âge Crétacé. Les dépôts meubles qui surmontent le socle rocheux sont constitués d'argile, de limon, de sable, de gravier et de blocs, d'origine glaciaire (Dion, 1977). Dans les environs du site à l'étude, les dépôts meubles possèdent une épaisseur inférieure à trois mètres. La figure 4 présente un extrait de la carte des dépôts meubles tirée du document DPV-499, du MRNQ.

La carrière Landreville a été exploitée comme source de gravier concassé à partir de 1966, puis remblayée partiellement avec des matières résiduelles entre 1973 et 1981 et enfin, restaurée en 1984. Un système de pompage permettant de maintenir l'excavation à sec aurait capté environ 10 à 20 m³/jour d'eau souterraine et 180 à 190 m³/jour d'eau provenant des précipitations, lorsque la carrière était en opération (Poulin, 1981). Depuis l'abandon des activités de pompage d'eau, des contaminants dissous ont amorcé un processus de migration souterraine en direction nord-ouest, sans toutefois atteindre, en date de mai 2004, les puits résidentiels environnants (Forget et Stapinsky, 2004).

Les relevés hydrogéologiques effectués par le passé (Poulin, 1981) permettent d'observer que le niveau de la nappe d'eau souterraine correspond à un mètre près, à l'élévation du sol. Les principaux horizons aquifères seraient formés par la présence de réseaux de fissures développés dans les filons-couches. Néanmoins, il s'agit d'un aquifère peu productif, puisque des valeurs de conductivité hydraulique de l'ordre de 1×10^{-7} à 1×10^{-8} m/s sont reportées.

2. MÉTHODOLOGIE

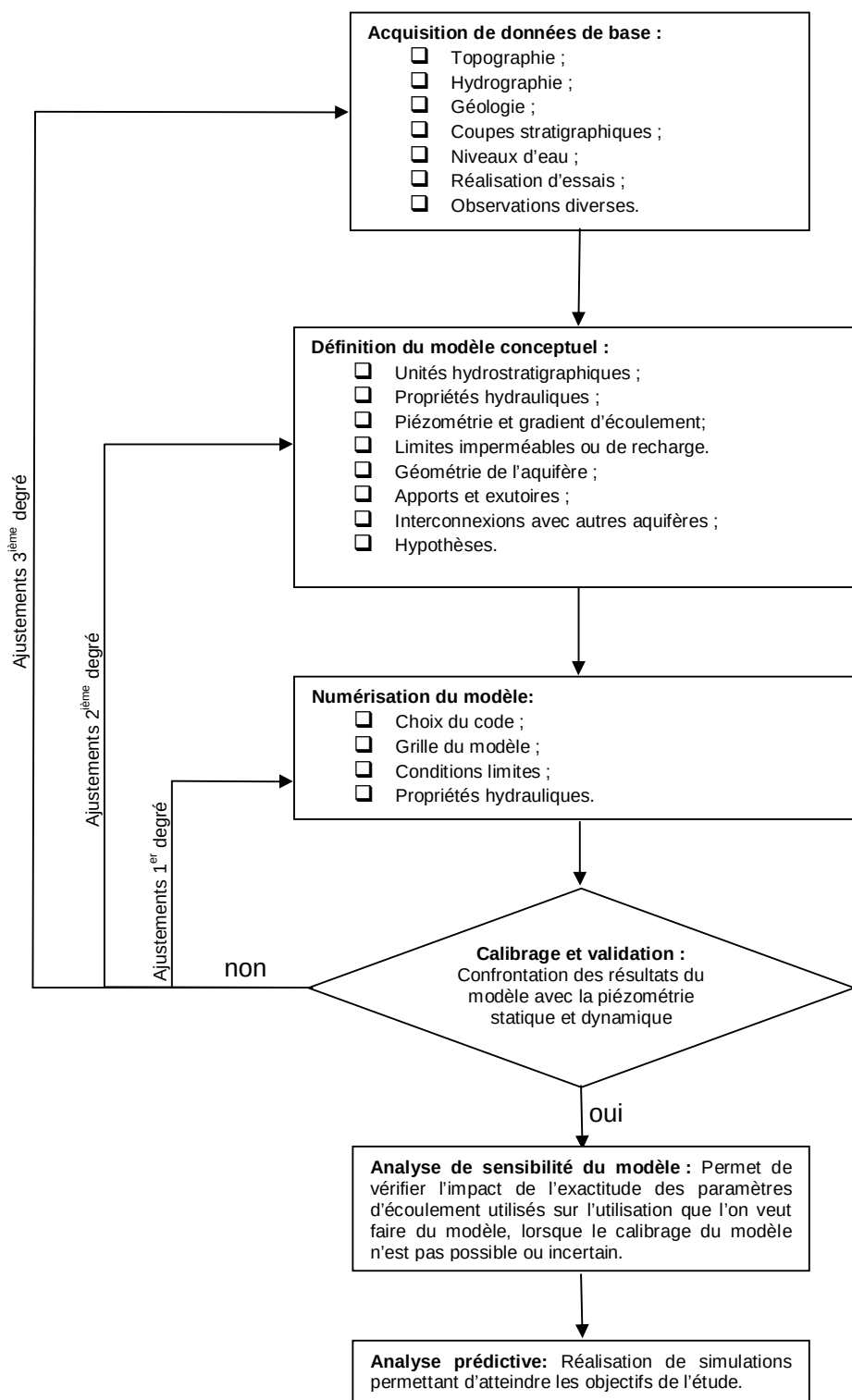
La méthodologie généralement admise pour la réalisation de travaux de modélisation numérique est décrite dans Anderson et Woessner (1992). Celle-ci est représentée de façon simplifiée sur le graphique 1. Il s'agit d'un processus au cours duquel des données de base sont acquises, soit par des travaux de terrain, soit par une revue de littérature. Par la suite, ces données sont interprétées afin de faire la définition du modèle conceptuel qui doit représenter de façon simplifiée la compréhension des processus d'écoulement souterrain, par rapport aux objectifs précis de l'étude. Ensuite, un code numérique est choisi, puis utilisé pour numériser sous forme d'équations mathématiques le maillage des couches du modèle, les conditions limites et les propriétés hydrauliques des unités hydrostratigraphiques.

À ce stade du processus de modélisation, certaines des données, telles que la conductivité hydraulique, sont relativement bien définies, tandis que d'autres, telles que les charges aux conditions limites ou le flux de recharge doivent être estimées à l'intérieur de valeurs probables. Le modèle ainsi conçu doit, par la suite, être calibré en comparant les charges et débits calculés aux observations de terrain et, si possible, validé avec des données représentatives de conditions hydrogéologiques différentes (par exemple, calibrage en condition hydrostatique et validation en condition hydrodynamique). Ce processus permet au modélisateur de faire des ajustements qui peuvent toucher uniquement les paramètres du modèle (ajustement du 1^{er} degré), qui peuvent l'amener à revoir le modèle conceptuel (ajustement du 2^{ième} degré) et même, à retourner sur le terrain pour faire l'acquisition de données additionnelles (ajustement du 3^{ième} degré). Au terme de l'exercice, les propriétés du modèle sont ajustées de façon à ce que le modèle possède la meilleure représentativité possible. Elles doivent ressembler aux données initiales, sans s'y conformer totalement (Anderson et Woessner, 1992).

Si le modèle est utilisé en mode prédictif, sans possibilité de le valider sur des charges mesurées, alors, une analyse de sensibilité des paramètres est réalisée pour évaluer le degré de précision du modèle et la fourchette de résultats possibles. Une discussion sur le modèle est habituellement fournie à ce moment.

Enfin seulement, le modèle peut être utilisé pour fins de réalisation de simulations qui permettent d'atteindre les objectifs recherchés. Les logiciels équipés de pré-processeur et de post-processeur permettent alors de faire les représentations graphiques nécessaires pour bien faire ressortir les éléments de réponses requis par le mandat.

Graphique 1 : Processus de réalisation d'un modèle numérique



3. MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE CONCEPTUEL

Le modèle conceptuel représente de façon simplifiée la compréhension du système hydrogéologique à l'étude. Il s'appuie sur les données tirées des travaux de caractérisation hydrogéologique effectués par le passé (Solmers, 2005 et 2006, SNC Lavalin Environnement, 2004, Ministère de l'environnement, 1986, Hydrogéologie Canada, 1983 et Foratek International, 1981)

Les sections qui suivent décrivent les données qui ont mené à la formulation du modèle conceptuel.

3.1. Unités hydrostratigraphiques

Les unités hydrostratigraphiques qui sont identifiées dans le secteur de la carrière Landreville sont les suivantes :

- ❑ Un till constitué de silt, d'argile et de blocs est généralement recoupé en surface sur une épaisseur inférieure à deux mètres. Ce dépôt, faiblement perméable et partiellement saturé, influence très peu le système d'écoulement souterrain. L'écoulement s'y effectuerait verticalement afin de permettre la recharge de l'aquifère;
- ❑ La roche encaissante, un shale micacé noir, appartenant au groupe d'Utica (Globensky, 1985) dont la stratification possède une direction de 55° et un pendage de 0,5° vers le SE ;
- ❑ Un système de filon-couche constitué de roche intrusive est également présent dans la stratigraphie. L'un d'entre eux, d'une épaisseur de 70 cm, est observable sur les parois de la carrière. Le forage FH-2 a recoupé un filon-couche dont l'épaisseur maximale observée est de 2,2 mètres. Le recoupement d'information provenant des divers forages effectués démontre que ceux-ci ne sont pas tous continus;
- ❑ Enfin, un remblai constitué de matières résiduelles est localisé dans la zone sud-est de la carrière.

Le modèle hydrogéologique conceptuel ne tient pas compte directement des dépôts meubles superficiels et du remblai constitué de matières résiduelles. En effet, la première est mince et l'écoulement s'y effectue surtout verticalement, tandis que la seconde est située à l'intérieur des parois de la carrière.

3.2. Propriétés hydrogéologiques

Les études antérieures démontrent que le socle rocheux du secteur possède des propriétés hydrogéologiques hétérogènes. Le tableau 1 présente les résultats d'essais de perméabilité réalisés entre obturateurs en 1983 (Hydrogéo Canada), tandis que le tableau 2 présente les résultats d'essais de perméabilité réalisés entre obturateurs en 2005 (Solmers). Ces deux tableaux permettent de faire les interprétations suivantes :

- Deux zones de perméabilité différente sont répertoriées, soit la roche encaissante et les intrusions de roches ignées qui la recoupent;
- Les forages situés à proximité (10-15 m) de la carrière recoupent une roche probablement un peu plus fracturée en raison des activités d'exploitation, ce qui augmente la conductivité hydraulique mesurée par rapport au reste du territoire;
- La conductivité hydraulique est calculée entre $7,25 \times 10^{-8}$ et $1,56 \times 10^{-5}$ m/s pour les filons couche, avec une moyenne géométrique de $9,50 \times 10^{-7}$ m/s;
- La conductivité hydraulique est calculée entre $<8,91 \times 10^{-9}$ et $4,45 \times 10^{-6}$ m/s pour la formation de shale, avec une moyenne géométrique de $2,27 \times 10^{-7}$ m/s.

Les propriétés d'emmagasinement de l'aquifère sont, quant à elles, définies selon la littérature. Ainsi, pour l'ensemble de l'aquifère, la porosité serait de 0,05 (Morris et Johnson) et l'emmagasinement spécifique, de $6,1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ (Meiri et al., 1990).

Tableau 1: Valeurs de conductivité hydraulique obtenues en 1983 (hydrogéo-Canada)

Forage	Profondeur (m)	Conductivité hydraulique (m/seconde)	Formation recoupée
LN-1 (1983)	2,5 – 5,5	4,45E-06	Shale d'Utica
	9,5 – 12,5	2,48E-06	Filon-couche
	19,5 – 22,5	2,68E-08	Shale d'Utica
LN-5 (1983)	2,0 – 5,0	9,67E-08	Shale d'Utica
	11,0 – 14,0	5,08E-08	Shale d'Utica
	21,0 – 24,0	2,32E-08	Shale d'Utica
LN-6 (1983)	4,0 – 7,0	1,56E-05	Filon-couche
	16,5 – 19,5	7,25E-08	Filon-couche
	27,0 – 30,0	1,61E-08	Shale d'Utica
P-1 (1983)	3,5 – 6,5	8,70E-07	Shale d'Utica
	15,0 – 18,0	6,28E-08	Shale d'Utica
	18,5 – 21,5	3,48E-07	Shale d'Utica
P-2 (1983)	2,5 – 5,5	1,16E-06	Filon-couche
	6,5 – 9,5	2,48E-07	Shale d'Utica
	9,5 – 12,5	1,45E-07	Shale d'Utica

Tableau 2: Valeurs de conductivité hydraulique obtenues en 2005 (Solmers)

Forage	Profondeur (m)	Conductivité hydraulique (m/seconde)	Formation recoupée
FH-1 (2005)	8,6 @ 12 m	9,59E-08	Shale d'Utica
	11,5 @ 14,9 m	5,78E-07	Shale d'Utica
	14,5 @ 17,8 m	2,06E-06	Filon-couche
	17,4 @ 20,7 m	1,37E-06	Filon-couche
	20,3 @ 23,7 m	1,10E-06	Shale d'Utica
	23,2 @ 26,6 m	6,60E-07	Shale d'Utica
	26,15 @ 29,5 m	3,63E-08	Shale d'Utica
FH-2 (2005)	2,9 @ 6,2 m	5,86E-07	Filon-couche
	5,16 @ 8,44 m	4,99E-07	Shale d'Utica
	8,16 @ 11,44 m	5,19E-07	Filon-couche
	11,16 @ 14,44 m	5,98E-07	Shale d'Utica
	14,16 @ 17,44 m	9,57E-07	Filon-couche
	17,16 @ 20,44 m	8,23E-07	Filon-couche
	20,16 @ 23,44 m	6,72E-07	Filon-couche
	23,16 @ 26,44 m	5,94E-07	Shale d'Utica
FH-3 (2005)	26,16 @ 29,44 m	3,70E-08	Shale d'Utica
	4,4 @ 7,7 m	9,64E-07	Shale d'Utica
	5,4 @ 8,7 m	7,23E-07	Shale d'Utica
	8,4 @ 11,7 m	3,06E-07	Shale d'Utica
	11,4 @ 14,7 m	2,68E-07	Shale d'Utica
	14,4 @ 17,7 m	< 9,84E-09	Shale d'Utica
	17,4 @ 20,7 m	< 8,91E-09	Shale d'Utica
	20,4 @ 23,7 m	1,50E-07	Filon-couche
FH-4 (2005)	23,4 @ 26,7 m	1,12E-06	Filon-couche
	26,4 @ 29,7 m	5,50E-08	Shale d'Utica
	4,35 @ 7,65 m	2,73E-06	Shale d'Utica
	5,5 @ 8,8 m	3,17E-06	Shale d'Utica
	8,5 @ 11,8 m	1,97E-06	Filon-couche
	11,5 @ 14,8 m	1,09E-06	Shale d'Utica
	14,5 @ 17,8 m	5,56E-07	Shale d'Utica
	17,5 @ 20,8 m	4,00E-07	Shale d'Utica
	20,5 @ 23,8 m	6,86E-07	Shale d'Utica
	22,2 @ 25,5 m	3,84E-07	Shale d'Utica
	23 @ 31 m	1,36E-07	Shale d'Utica

3.3. Piézométrie

Le tableau 3 présente les charges mesurées en 1981 et en 1983 lorsque la carrière Landreville était en opération et maintenue à sec à l'aide de pompes, tandis que le tableau 4 présente les charges mesurées en 2004 et 2006, la carrière étant abandonnée et remplie d'eau.

Tableau 3: Charges hydrauliques mesurées lorsque la carrière était en opération (1981-1983)

Forage	Coordonnées		Sol (m)	Tubage (m)	Élévation eau (m)	
	X (m)	Y (m)			1981	1983
LN-1	312184,60	5050351,60	36,55	37,15	29,05	34,66
LN-2	312800,40	5050394,90	35,90	36,55	35,01	-
LN-4	312499,30	5050736,30	34,85	35,30	31,60	-
LN-5	312148,70	5051077,67	29,30	29,80	27,95	27,78
LN-6	312337,40	5050790,20	33,70	34,45	31,86	31,71
PR-2	312391,40	5051446,02	28,10	28,10	27,45	-
PR-4	311883,50	5050893,50	27,20	27,20	26,35	-
PR-8	311627,30	5050920,50	24,55	24,55	23,05	-
PR-11	311640,80	5050740,80	27,65	27,80	26,65	-
PR-13	311789,10	5050574,60	29,20	29,20	28,45	-
PR-14	311681,20	5050484,70	28,75	28,75	28,45	-
PR-16	311055,20	5049404,00	29,80	29,80	28,45	-
PR-19	313152,20	5049692,00	32,85	32,85	31,55	-
PR-27	313492,60	5050138,80	33,30	33,30	31,80	-
PR-34	312827,40	5049509,96	33,65	33,65	33,00	-
PR-35	312733,00	5049590,80	33,90	33,90	33,30	-
PR-36	312703,00	5049667,00	34,45	34,45	32,90	-
PR-37	312647,60	5049712,10	34,80	34,80	33,90	-
P-1	311703,80	5050733,60	27,76	28,36	-	26,29
P-2	311904,80	5050934,50	26,47	27,07	-	25,68

Note : PR = puits résidentiel

Tableau 4: Charges hydrauliques mesurées après l'abandon de la carrière (2005-2006)

Forage	Coordonnées		Sol (m)	Tubage (m)	Élévation eau (m)	
	X (m)	Y (m)			2004	2006
Po-1	311900,79	5050935,31	27,87	28,47	26,16	-
Po-2	311970,99	5050929,67	29,53	30,13	27,89	-
Po-3	312028,14	5051073,18	27,81	28,41	26,23	-
LN-1	312184,60	5050351,60	36,55	37,15	-	34,52
FH1	312305,10	5050452,55	36,91	37,63	-	28,40
FH2	311551,39	5051277,28	21,80	22,49	-	19,86
FH3	311803,05	5051334,32	22,80	23,51	-	21,83
FH4	312016,29	5050957,57	28,93	29,67	-	28,23
FH5	312113,25	5050698,54	30,16	31,07	-	28,42
FH6	312453,84	5050677,65	35,03	35,94	-	31,23
FH7	312308,28	5050804,82	33,47	34,12	-	29,85
FH8	312305,75	5050356,87	36,34	37,02	-	35,45
FD1	312455,75	5050521,31	33,57	34,27	-	28,44
FD2	312493,73	5050409,39	38,03	38,93	-	28,48
FD3	312517,59	5050280,71	37,59	38,38	-	29,37
FD4	312628,85	5050414,72	38,26	39,18	-	35,10
FD5	312574,84	5050466,75	38,79	39,91	-	28,50
FD6	312576,67	5050352,71	39,34	40,24	-	31,36
FD7	312454,64	5050351,04	36,29	37,24	-	28,82
FD8	312422,21	5050433,65	36,32	37,25	-	28,47
FD9	312365,09	5050479,74	35,35	36,26	-	28,34

Note : les forages de la série FD recoupent essentiellement le remblai de matières résiduelles

3.4. Recharge de l'aquifère

À l'endroit de la carrière Landreville, la recharge de l'aquifère s'effectue essentiellement par l'infiltration des précipitations dans les sédiments meubles superficiels. Le taux potentiel de recharge a été estimé par GENIVAR à 39 mm/an, à l'aide du logiciel HELP. Il s'agit toutefois d'un paramètre très difficile à quantifier qui doit être précisé lors du calibrage du modèle numérique.

3.5. Vidange de l'aquifère

Selon les données disponibles, la vidange de l'aquifère s'effectuerait en direction sud-est par le ruisseau de La Grande Décharge et en direction nord-ouest, par la rivière La Sabrevois. La carrière constitue également un exutoire local de la nappe d'eau souterraine. Selon les données citées dans les études antérieures, l'apport en eau souterraine vers la carrière a été évalué à 20 m³/jour (Poulin, 1981) et entre 5 à 10 m³/jour (Dufresne et al. 1983).

4. MODÈLE NUMÉRIQUE

La représentation numérique du modèle conceptuel décrit précédemment nécessite le choix d'un code numérique, la division du bloc géologique à modéliser en cellules auxquelles des conditions limites et des propriétés hydrogéologiques sont assignées. Les sous-sections qui suivent présentent la grille du modèle numérique, les conditions limites et les propriétés hydrogéologiques utilisées pour représenter de façon numérique le modèle conceptuel.

4.1. Code numérique utilisé

Le logiciel *Visual MODFLOW 2009* a été choisi pour modéliser l'écoulement souterrain afin d'atteindre les objectifs de l'étude. Ce logiciel utilise le code *MODFLOW* qui 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 *MODFLOW* a été développé par la Commission Géologique des Etats-Unis (USGS) et son utilisation est largement répandue au Canada et aux Etats-Unis. De plus, il est reconnu par les instances gouvernementales. Les équations qui gouvernent le modèle sont présentées dans le manuel de référence du modèle (Harbaugh et Mc Donald, 1998).

4.2. Grille du modèle numérique

Le domaine modélisé couvre une superficie de 12 km². Les dimensions du domaine modélisé sont de 3000 m par 4000 m par 50 m. Le maillage est orienté à 42 degrés par rapport à l'axe de coordonnées géodésiques MTM nad 83, fuseau 8. L'origine du système de maillage est située aux coordonnées suivantes: 312 550 m Ouest; 5 048 000 m Nord.

Le domaine modélisé est subdivisé en 128 colonnes, 170 rangées et 9 couches. Quatre de ces couches représentent des filons-couches identifiés par des forages, tandis que cinq couches représentent la roche encaissante. Les colonnes et rangées possèdent la forme d'un carré dont l'arête varie de 12,5 à 25 mètres, le maillage ayant été raffiné au pourtour de la carrière. La surface délimitant le niveau du sol provient de la digitalisation de la carte topographique, tandis que les contacts supérieur et inférieur des filons-couches ont été obtenus par krigeage à partir des descriptions stratigraphiques des forages effectués lors d'études antérieures.

La figure 5 présente la grille du modèle numérique ainsi que les surfaces qui délimitent les unités hydrostratigraphiques.

4.3. Conditions limites

Les conditions limites suivantes ont été utilisées pour l'élaboration du modèle numérique:

- ☐ Limites de type « charge générale »;
- ☐ Limites de type « drain » ;
- ☐ Limites de type « recharge » ;
- ☐ Limites de type « évapotranspiration ».

Les limites de type « charge générale » et les limites de type « drain » sont montrées sur la figure 5. Les sections suivantes présentent les conditions limites utilisées.

Limites de type « charge générale »

Des limites de type « charge générale » ont été placées au pourtour du domaine modélisé afin de créer un champ d'écoulement. Ce type de condition limite permet d'imposer une charge dans une ou plusieurs mailles de modèle. Un flux est ensuite calculé par différence de charge avec les mailles voisines en fonction des propriétés hydrogéologiques des mailles concernées. La charge de cette même maille peut elle-même varier en fonction des charges voisines. Lorsque la charge imposée est supérieure aux charges voisines, le flux est alors positif. À l'inverse, le flux est négatif, ce qui permet de simuler les interactions du bloc géologique modélisé avec l'extérieur (apports et pertes du modèle).

Les limites de type « charge générale » sont imposées sur l'ensemble des 9 couches du modèle. Elles sont suffisamment éloignées de la carrière pour ne pas influencer l'écoulement en direction de celle-ci. Les charges imposées à ces limites varient en fonction de la topographie. Elles correspondent à 1 mètre sous le niveau du sol, soit des élévations qui varient de 16,5 à 34,1 m.

Limites de type « drain »

Des limites de type drain ont été assignées au modèle afin de simuler le drainage provoqué par la carrière. Ce type de condition limite permet d'imposer une charge dans une ou plusieurs mailles de modèle. Si la charge imposée est inférieure aux charges des mailles voisines, alors un flux est calculé par différence de charge avec les mailles voisines, en fonction d'un coefficient de conductance verticale, lequel crée une restriction à l'écoulement. Par contre, lorsque la charge imposée est supérieure aux charges des mailles voisines, alors aucun flux n'est calculé, à l'instar du fonctionnement d'un drain dans un sol.

Dans le cas des simulations représentant la carrière inondée, les charges imposées par les limites de type « drain » sur les parois et au fond de la carrière sont égales à 28,3 mètres.

Leur conductance verticale est élevée, de manière à ne créer aucune restriction à l'écoulement.

Afin de représenter l'écoulement autour de la carrière lorsqu'elle est maintenue à sec, les charges des limites de type « drain » ont été imposées à l'élévation correspondant au sommet de la surface de suintement théorique développée sur ses parois. La solution analytique d'Ibrahim et Brutsaert (1965) permet d'estimer la hauteur de cette surface en régime transitoire et en l'absence de recharge. Toutefois, au Québec méridional, où les aquifères bénéficient généralement d'une recharge, le régime permanent peut être atteint pour une surface de suintement correspondant environ au deux-tiers de la hauteur d'eau initiale. Cette observation a été faite par le soussigné lors d'études similaires à l'intérieur d'autres carrières situées dans la région de Montréal. À l'aide de cette « règle du pouce », l'élévation de la surface de suintement représentée par des conditions limites de type « drain » a été fixée à 25 mètres d'élévation pour représenter l'écoulement autour de la carrière lorsque celle-ci est maintenue à sec.

Les mailles du modèle qui sont situées à l'intérieur de la carrière ont été désactivées, puisque aucun écoulement n'a lieu à l'intérieur de celle-ci.

Limites de type « recharge » et « évapotranspiration »

Des limites à flux imposé de type « recharge » ont été imposées sur l'ensemble de la surface du modèle afin de représenter un apport d'eau provenant des précipitations. Seule la superficie de la carrière n'a pas été soumise à un flux de recharge. Un flux de 50 mm/an a été utilisé, suite à des ajustements en cours de calibrage.

Afin d'évacuer le trop-plein d'eau dans l'aquifère, des limites mixtes de type « évapotranspiration » ont aussi été imposées sur l'ensemble du territoire modélisé. Ces limites imposent un flux maximal de 200 mm/an en surface et ce flux diminue progressivement jusqu'à 1,0 m de la surface du sol.

4.4. Propriétés hydrogéologiques

Les propriétés hydrogéologiques assignées au modèle numérique sont la conductivité hydraulique (K_x , K_y et K_z), ainsi que les paramètres d'emménagement (emménagement spécifique, porosité de drainage, porosité effective et porosité totale).

La conductivité hydraulique assignée aux couches du modèle a été subdivisée en deux unités représentatives de la roche encaissante et des filons-couches. Afin de représenter le litage sub-horizontale de l'aquifère, la conductivité hydraulique verticale a été affectée d'un coefficient d'anisotropie de 10. Ainsi, $K_x = K_y = 10 K_z$. Les conductivités hydrauliques représentatives des unités hydrostratigraphiques sont les suivantes :

- Filons-couches : $2,375 \times 10^{-7}$ m/s;
- Shale : $5,750 \times 10^{-8}$ m/s.

Ces valeurs ont été obtenues suite au calibrage et à la validation du modèle. Elles correspondent aux plages de conductivité hydraulique interprétées lors des travaux de caractérisation hydrogéologique dans le secteur de la carrière.

Les paramètres d'emménagement (S_s , S_y , n_e et n_t) ont, quant à eux, été estimés selon la littérature (voir section 3.2). Il s'agit de valeurs couramment utilisées pour ces matériaux aquifères. Par ailleurs, l'importance relative des paramètres d'emménagement est négligeable puisque les simulations prédictives visent à représenter l'écoulement projeté en régime permanent, où l'emménagement n'est pas considéré dans les équations qui régissent ce type d'écoulement.

5. CALIBRAGE ET VALIDATION DU MODÈLE

Le calibrage du modèle consiste à ajuster les paramètres et conditions limites de façon à reproduire la piézométrie observée pour une période donnée (tableaux 3 et 4 de la section 3.3). Lorsque le modèle est calibré sur des valeurs mesurées sur le terrain sous des conditions connues (idéalement, deux régimes d'écoulement distincts), il est alors possible d'effectuer des simulations prédictives pour d'autres conditions de pompage. Dans le cas présent, les simulations de calibrage visaient à reproduire les charges hydrauliques mesurées en 2004 et 2006, après l'abandon de la carrière, puis de valider le modèle à l'aide des charges hydrauliques mesurées en 1981 et 1983, lorsque la carrière était en opération.

Le calibrage a été considéré adéquat lorsqu'une combinaison de paramètres a permis de reproduire de façon satisfaisante les deux séries de charges mesurées, sans recourir à des conditions limites non identifiables physiquement ou par interprétation. Les statistiques de calibrage obtenues sont montrées au tableau 5.

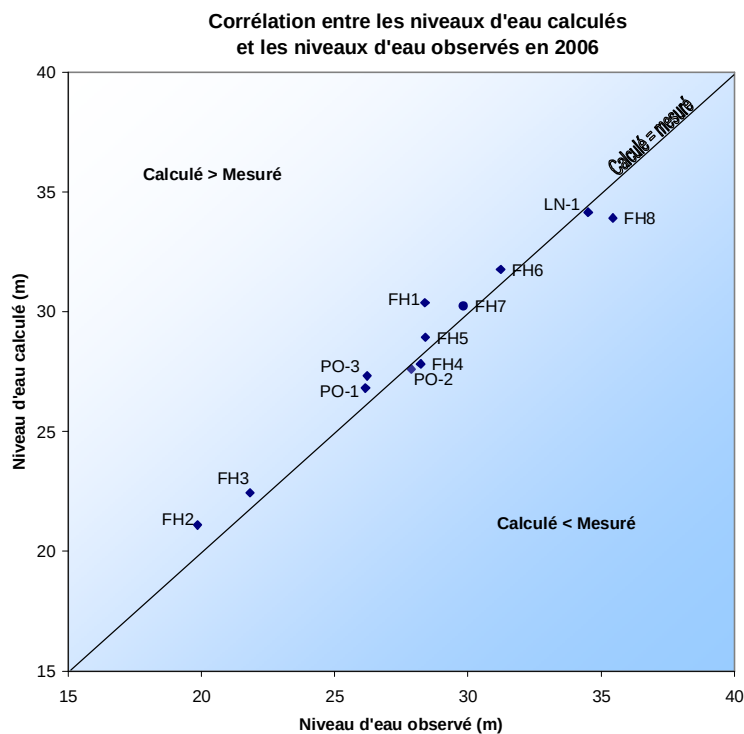
Tableau 5: Statistiques de calibrage du modèle numérique

Statistique	Simulation 2006	Simulation 1981
Nombre de points d'observation	12	19
Moyenne des écarts (m)	0,363	0,164
Moyenne des écarts absolus (m)	0,798	0,675
Écart-type des calculs (m)	0,264	0,209
Racine de la moyenne du carré des écarts (m)	0,948	0,904
Racine normalisée du carré des écarts (%)	6,084	7,555
Coefficient de corrélation	0,984	0,966

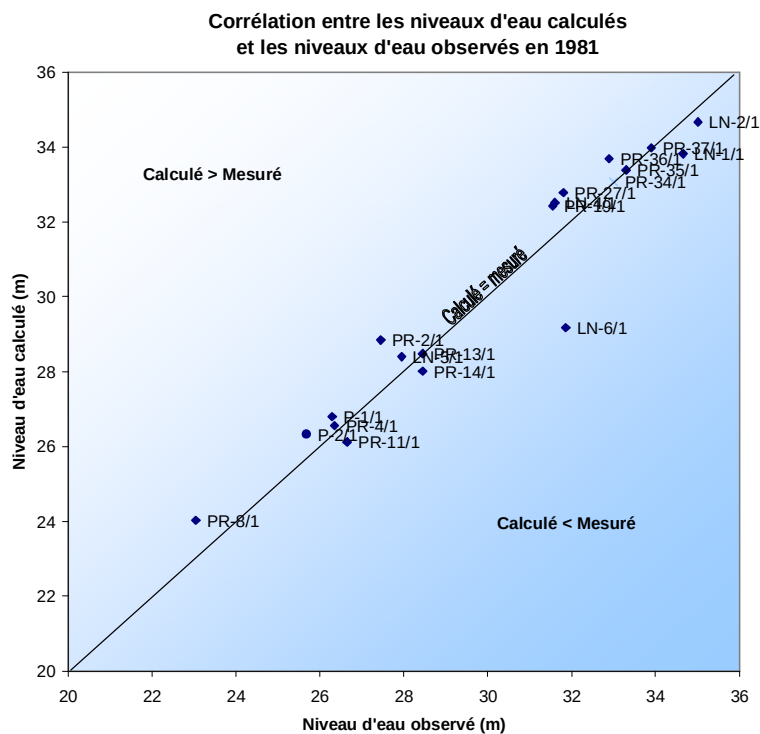
Les écarts entre les charges mesurées et les charges calculées sont explicables par plusieurs raisons dont les suivantes :

- ☐ Les charges n'ont pas toutes été mesurées en même temps et à par la même personne ;
- ☐ Les points de mesure des charges ne sont pas tous situés à la même profondeur, ce qui peut générer des écarts compte tenu de la présence de gradients verticaux ;
- ☐ Le milieu modélisé est très complexe par rapport à la vision « idéalisé » du modèle.

Graphique 2: Corrélation entre les charges calculées et les charges mesurées en 2004-2006



Graphique 3: Corrélation entre les charges calculées et les charges mesurées en 1981-1983



6. DESCRIPTION DES RÉSULTATS

Puisque l'objectif du mandat est de déterminer le débit d'infiltration d'eau dans la carrière, il a été jugé inutile d'effectuer des simulations prédictives additionnelles. En effet, la simulation de validation visant à reproduire les charges hydrauliques mesurées en 1981 et 1983, lorsque la carrière était en opération, permet de reproduire les conditions d'écoulement recherchées pour l'élaboration du projet. Seules des simulations de trajectoire de particules d'eau ont été réalisées à l'aide du module MODPATH afin de déterminer l'influence de la carrière sur un panache d'eau souterraine contaminée.

Les figures 6 et 7 présentent les cartes piézométriques résultant des simulations visant à représenter l'écoulement souterrain sous les conditions mesurées en 2004 et 2006, après l'abandon de la carrière, ainsi que l'écoulement sous les conditions mesurées en 1981 et 1983, lorsque la carrière était en condition de pompage. Il est possible d'observer sur ces figures le trajet simulé de particules virtuelles d'eau souterraines entre le chemin d'Anjou et la carrière. Ainsi, lorsque la carrière est en condition de pompage, les particules d'eau se dirigent vers celle-ci, tandis que lorsque la carrière se remplit d'eau jusqu'à l'élévation 28 m, les particules d'eau s'éloignent dans la direction opposée.

Sous les conditions de recharge et de conductivité hydrauliques mentionnées à la section 4, le bilan hydrique calculé par le module *Zone Budget* du logiciel permet d'évaluer le débit moyen d'infiltration provenant des parois et du fond de la carrière, lorsque celle-ci est pompée, telle qu'elle le serait si le projet était réalisé. Les résultats sont les suivants :

- Débit provenant des parois : 19,4 m³/jour ;
- Débit provenant du fond de l'excavation : 11,2 m³/jour.

Le débit d'infiltration total ainsi calculé serait de 30,6 m³/jour, soit environ le double des estimations faites en 1981 et 1983 (Poulin, 1981 et Dufresne et al. 1983).

Par ailleurs, la surface moyenne des parois de la carrière simulées par des conditions limites de type « drain » est de 16 600 m², tandis que la surface simulée du plancher de l'excavation est de 168 000 m². La surface totale d'infiltration simulée par les conditions limites de type « drain » est donc de 184 600 m². Le débit moyen quotidien des infiltrations d'eau souterraine, ainsi calculé sur une base annuelle, serait égal à $1,7 \times 10^{-4}$ m³/jour d'eau par mètre carré. Le débit ainsi calculé serait donc inférieur au critère de $5,0 \times 10^{-4}$ m³/jour par mètre carré, tiré de l'article 24 du REIMR.

7. ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES DU MODÈLE

Afin de vérifier de façon quantitative l'incertitude reliée à l'évaluation des paramètres du modèle, plusieurs simulations ont été effectuées en modifiant les paramètres de recharge et de conductivité hydraulique de façon à identifier, si possible, d'autres combinaisons de paramètres qui pourraient permettre de reproduire les charges mesurées lors des périodes de 1981-1983 et de 2004-2006.

Le tableau 6 présente les résultats de ces simulations. Il est possible d'y faire les observations suivantes :

- Pour chacun des taux de recharge simulés, la moyenne normalisée de la racine de la somme du carré des écarts a tendance à diminuer lorsque la conductivité hydraulique des unités hydrogéologiques est diminuée;
- Six autres combinaisons de paramètres permettent d'obtenir un modèle dont le NRMS est inférieur à 10% sous les deux régimes d'écoulement. Une seule de ces six combinaisons (simulation 1b) permettrait d'obtenir un débit d'infiltration par mètre carré supérieur au critère de l'article 24 du REIMR, soit $5,5 \times 10^{-4}$ m³/jour par mètre carré versus le critère de $5,0 \times 10^{-4}$ m³/jour par mètre carré;
- Une seule combinaison de paramètres permet d'obtenir un modèle mieux calibré sous les deux régimes d'écoulement que celui retenu : il s'agit de celui qui utilise la recharge et les conductivités hydrauliques les plus faibles (simulation 3d). Le débit d'infiltration dans la carrière correspond, pour cette simulation au débit estimé dans le cadre d'études antérieures.

La combinaison de paramètres retenue pour la détermination du débit d'infiltration dans la carrière n'est donc pas la meilleure représentation possible des conditions d'écoulement observées sous deux régimes distincts. Elle est à mi-chemin entre les extrêmes possibles à l'intérieur de la plage de valeurs probables de conductivité hydraulique et de recharge. La meilleure combinaison de paramètres comprend une très faible recharge et une très faible conductivité hydraulique.

Tableau 6: Analyse de sensibilité des paramètres du modèle

Simulation	Écoulement en 2004-2006			Écoulement en 1981-1983	
	Recharge (mm/an)	K (cm/s)	NRMS (%)	NRMS (%)	Débit (m³/jour)
1a	100	4,6E-7	8,84	10,703	163,9
		1,9E-6			
1b	100	2,3E-7	7,025	8,877	101,64
		9,5E-7			
1c	100	1,15E-7	6,59	8,305	62,66
		4,75E-7			
1d	100	5,75E-8	6,644	8,181	33,61
		2,375E-7			
2a	50	4,6E-7	10,634	13,417	124,9
		1,9E-6			
2b	50	2,3E-7	8,33	10,266	80,6
		9,5E-7			
2c	50	1,15E-7	6,62	8,231	49,76
		4,75E-7			
2d	50	5,75E-8	6,084	7,555	30,6
		2,375E-7			
3a	25	2,3E-7	10,553	13,328	61,96
		9,5E-7			
3b	25	1,15E-7	8,223	10,136	41,81
		4,75E-7			
3c	25	5,75E-8	6,414	8,022	24,59
		2,375E-7			
3d	25	2,287E-8	5,863	7,283	14,77
		1,12E-7			

K : conductivité hydraulique (1^{ère} ligne pour le shale et seconde ligne pour les filons-couches)

NRMS : moyenne normalisée de la racine de la somme du carré des écarts

8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le modèle numérique élaboré dans le cadre de ce mandat a permis d'évaluer, avec une bonne précision, le débit d'infiltration vers la carrière lorsque celle-ci est en condition de pompage, tel que déjà observé en 1981 et 1983.

Le débit d'infiltration total ainsi calculé serait de 30,6 m³/jour, soit environ le double des estimations faites en 1981 et 1983 (Poulin, 1981 et Dufresne et al. 1983). Le débit moyen des infiltrations d'eau souterraine par unité de surface serait égal à $1,7 \times 10^{-4}$ m³/jour d'eau par mètre carré. Le débit ainsi calculé serait donc inférieur au critère de $5,0 \times 10^{-4}$ m³/jour par mètre carré, tiré de l'article 24 du REIMR.

Les simulations de traçage de particules virtuelles d'eau souterraine ont permis de simuler l'influence de la carrière sur le panache d'eau souterraine contaminée qui a été identifié en 2004 entre la carrière et le chemin d'Anjou (Forget et Stapinsky, 2004). Ainsi, en condition de pompage, l'écoulement souterrain pourrait s'inverser à partir de la mi-distance entre le chemin d'Anjou et la carrière, permettant ainsi la création d'un piège hydraulique, ce qui n'est pas le cas dans les conditions actuelles où la carrière est à ciel ouvert et remplie d'eau. L'impact du projet, si le pompage d'eau est maintenu, pourrait donc être bénéfique sur la propagation des eaux souterraines contaminées au nord-ouest de la carrière.

RÉFÉRENCES

Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992, Applied Groundwater Modelling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press.

Dion, D.J., 1977, Levé géotechnique de la région de Boucherville-Tracy, rapport d'étude et cartes d'aptitude, Ministère des Richesses naturelles, document DPV 499.

Domenico, P.A. et Schwartz, F.W., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley and Sons Inc., p.26.

Dufresne, P., Béland, A. et Nielsen, G., janvier 1983. Expertises hydrogéologiques et étude environnementale de la carrière Landreville, Boucherville. Compagnie Hydrogé Canada Inc. Pour : Ministère de l'environnement du Québec.

Forget, D. et Stapinsky, M., 2004, Caractérisation complémentaire de l'ancienne carrière Landreville, rapport final présenté au Ministère de l'Environnement du Québec, dossier 603660, par SNC-Lavalin Environnement.

Globensky, Y., 1985, Géologie des régions de Saint-Jean (partie nord) et de Beloeil, Ministère de l'Énergie et des Ressources, document MM 84-03.

Harbaugh, A.W. et Mc Donald, M.G., 1996, User'Documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model, U.S. Geological Survey, Open-File Report 96-485

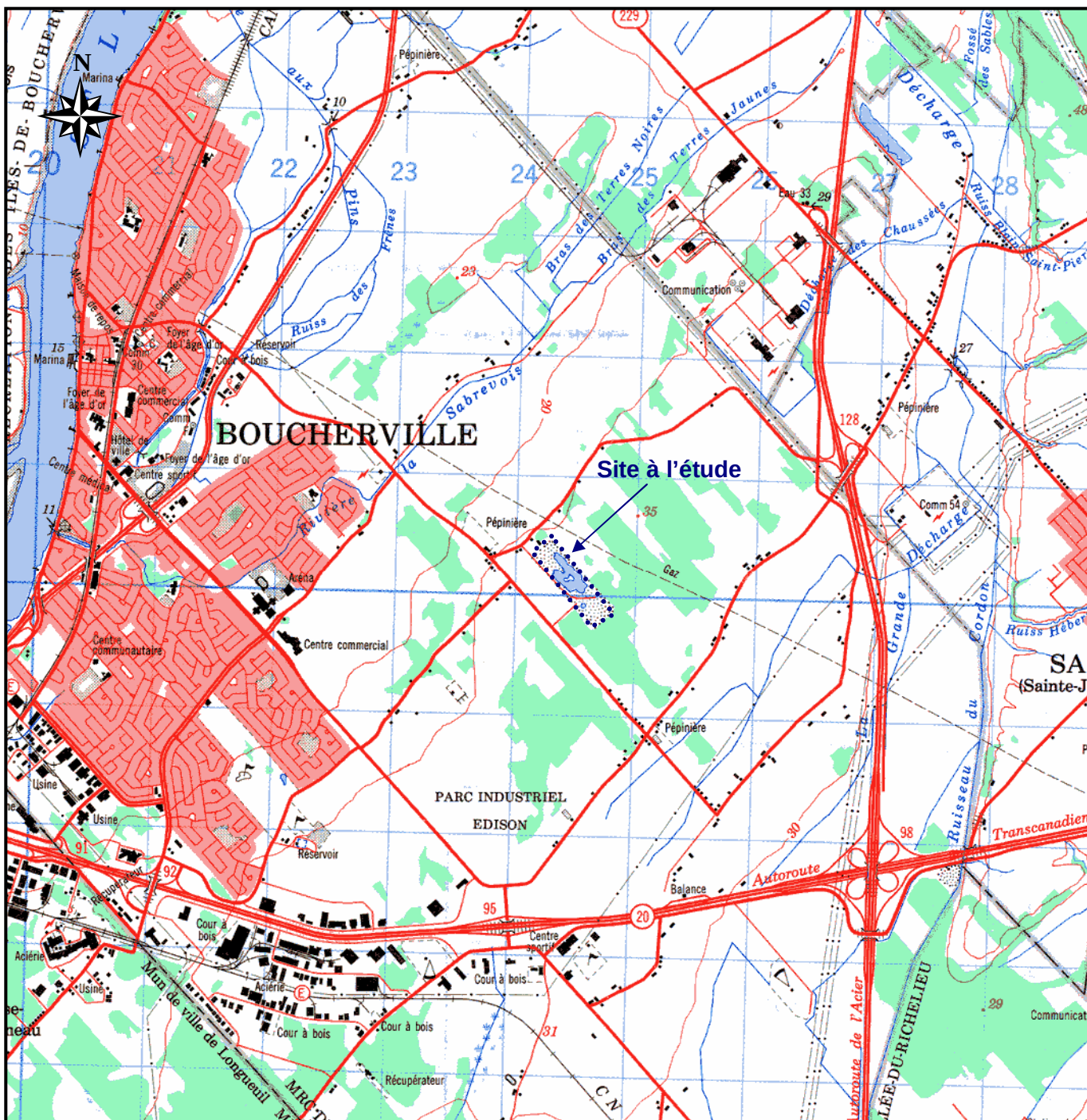
Ibrahim, H.A. and Brutsaert, Wilfried, 1965, Inflow hydrographs from large unconfined aquifers: American Society of Civil Engineers, Journal of Irrigation and Drainage Division, v. 91, no. IR 2, p. 21-38.

Meiri, D., M. Ghiasi, R.J. Patterson, N. Ramanujam and M.P. Tyson, 1990, Extraction of TCE-contaminated ground water by surface drains and pumping well, Ground Water, 28(1), 17-24.

Morris, D.A. and A.I. Johnson, 1967, Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analysed by the Hydrologic Laboratories of the U.S. Geological Survey 1948-1960. U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper, 1839-D, 42p.

Poulin, Martin, mai 1981. Étude hydrogéologique, Carrière Landreville, Boucherville. Compagnie Foratek International Inc. Pour : Ministère de l'environnement du Québec, Direction de la gestion des déchets et de la restauration du milieu terrestre. Projet no. FFG 81005, Rapport no. 459.

ANNEXE 1 : FIGURES



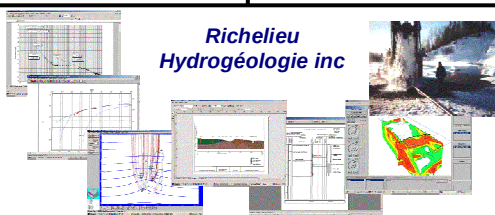
Dessin et interprétation : Yves Leblanc, ing. géo.
M.Sc., Hydrogéologue

Titre : FIGURE 1: CARTE DE LOCALISATION DE LA
PROPRIÉTÉ    L'ÉTUDE

Date : 27 avril 2009

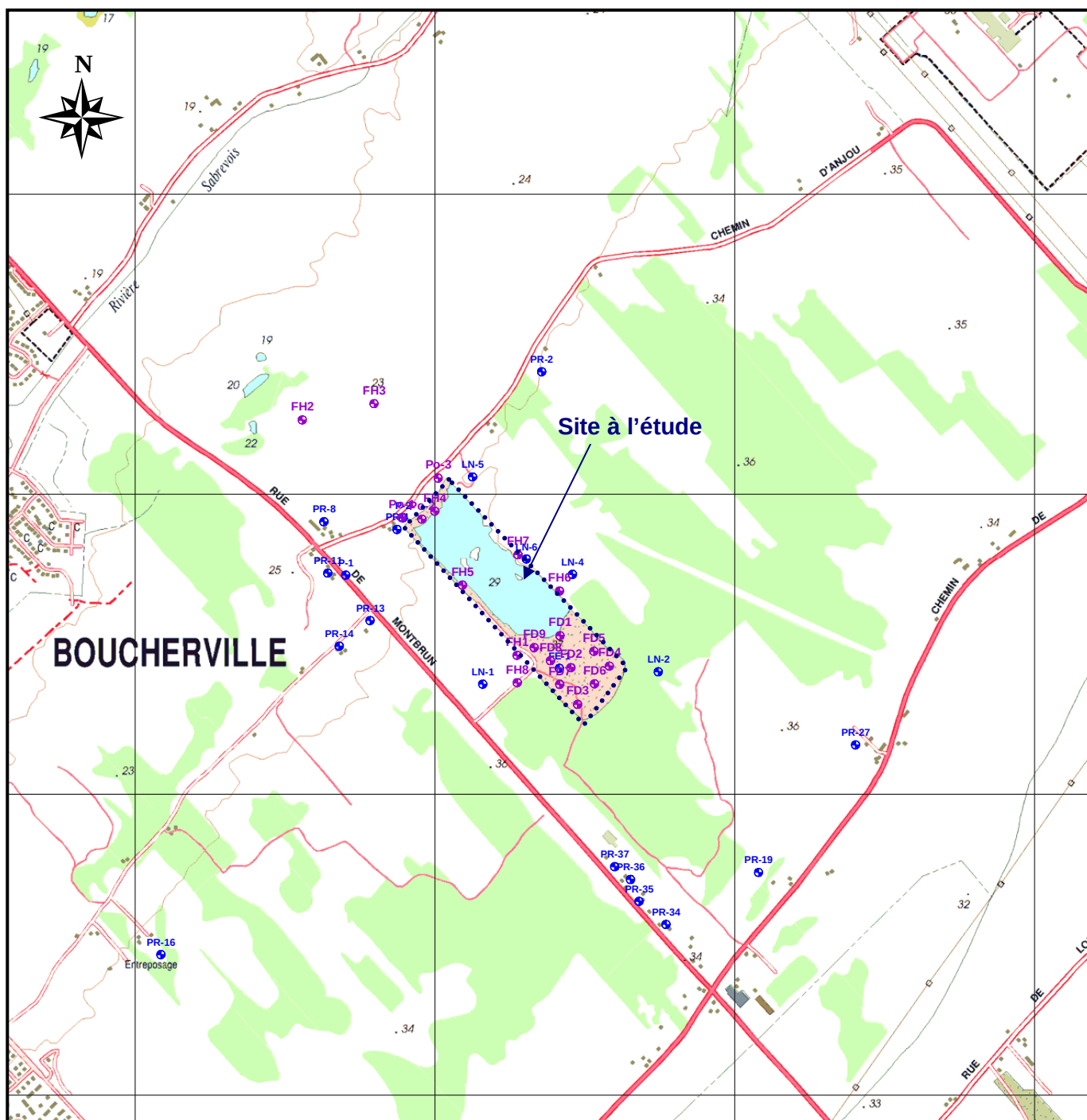
  chelle : 1 : 50 000

Projet : CARRIÈRE RIVE-SUD
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN



Légende:

Note : extrait de la carte 31H11 du Ministère des Ressources
naturelles du Canada



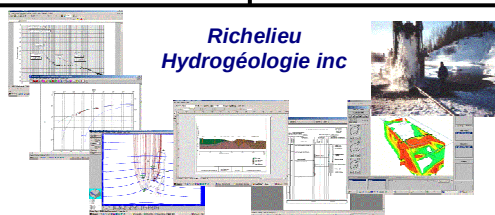
Dessin et interprétation : Yves Leblanc, ing. géo.
M.Sc., Hydrogéologue

Titre : FIGURE 2: CARTE TOPOGRAPHIQUE
   L'ÉCHELLE 1 : 20 000

Date : 27 avril 2009

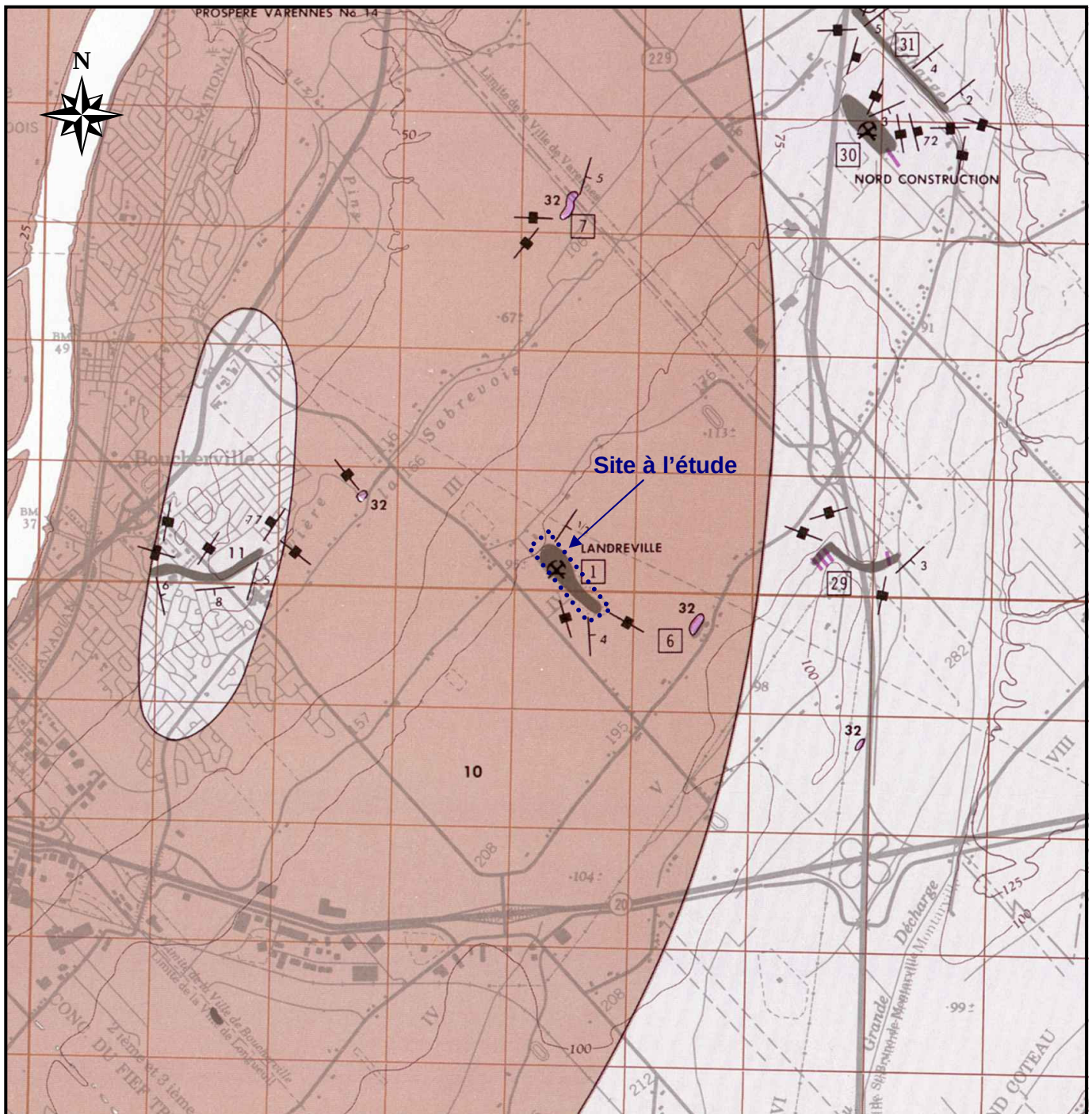
  chelle : 1 : 20 000

Projet : CARRIÈRE RIVE-SUD
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN



- Légende:
-    Puits ou forage recensé dans les études de 1981 et 1983
 -    Puits ou forage recensé dans les études de 2004 et 2006

Note : extrait de la carte 31H11-101 du Ministère des Ressources naturelles du Québec



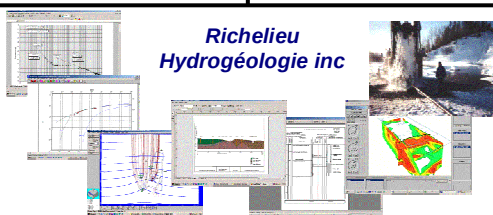
Dessin et interprétation : Yves Leblanc, ing. géo.
M.Sc., Hydrogéologue

Titre : FIGURE 3: EXTRAIT DE LA CARTE GÉOLOGIQUE
(tiré de la carte du MM-8403 du MRNQ)

Date : 27 avril 2009

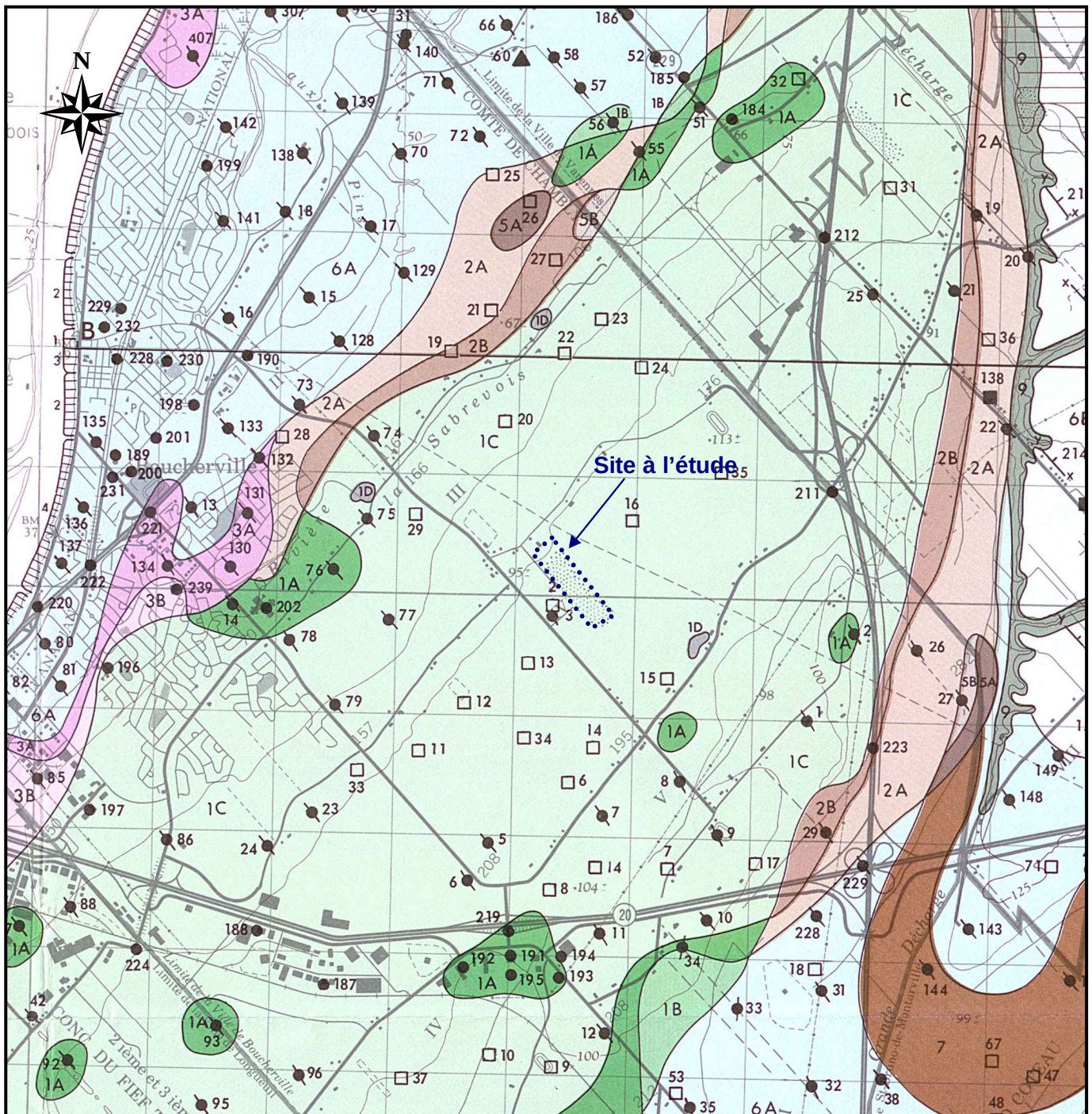
  chelle : 1 : 50 000

Projet : CARRIÈRE RIVE-SUD
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN



Légende:

- 32 Intrusions alcalines Mont  r  giennes
- 10 Shale d'Utica
- 11 Formation de Nicolet



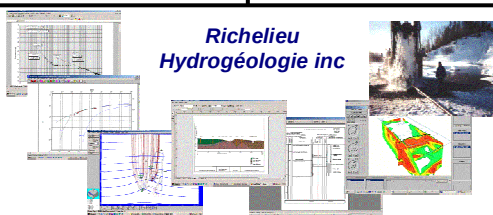
Dessin et interprétation : Yves Leblanc, ing. géo.
M.Sc., Hydrogéologue

Titre FIGURE 4: EXTRAIT DE LA CARTE DES DÉPÔTS MEUBLES
(D'après la carte du DPV-499 du MRN Québec)

Date : 27 avril 2009

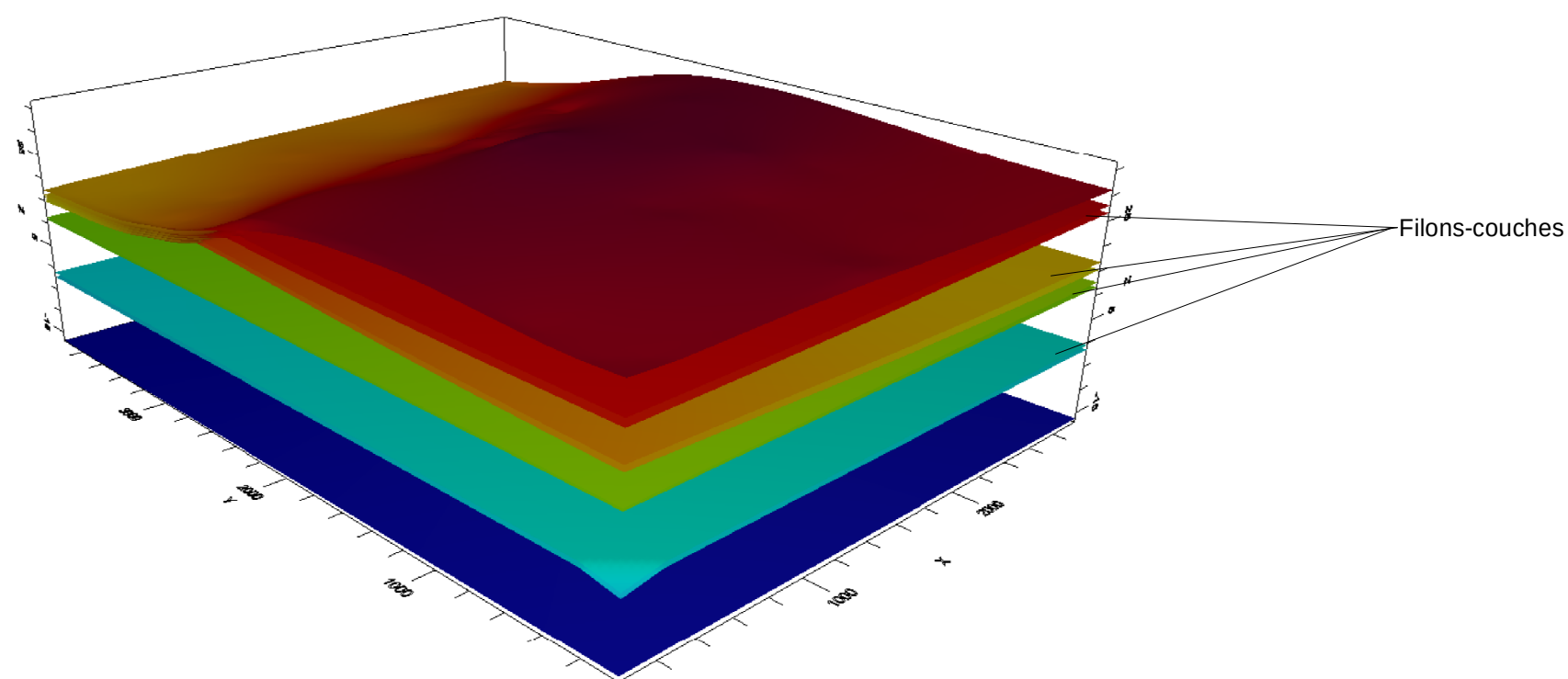
Échelle : 1 : 50 000

Projet : CARRIÈRE RIVE-SUD
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN

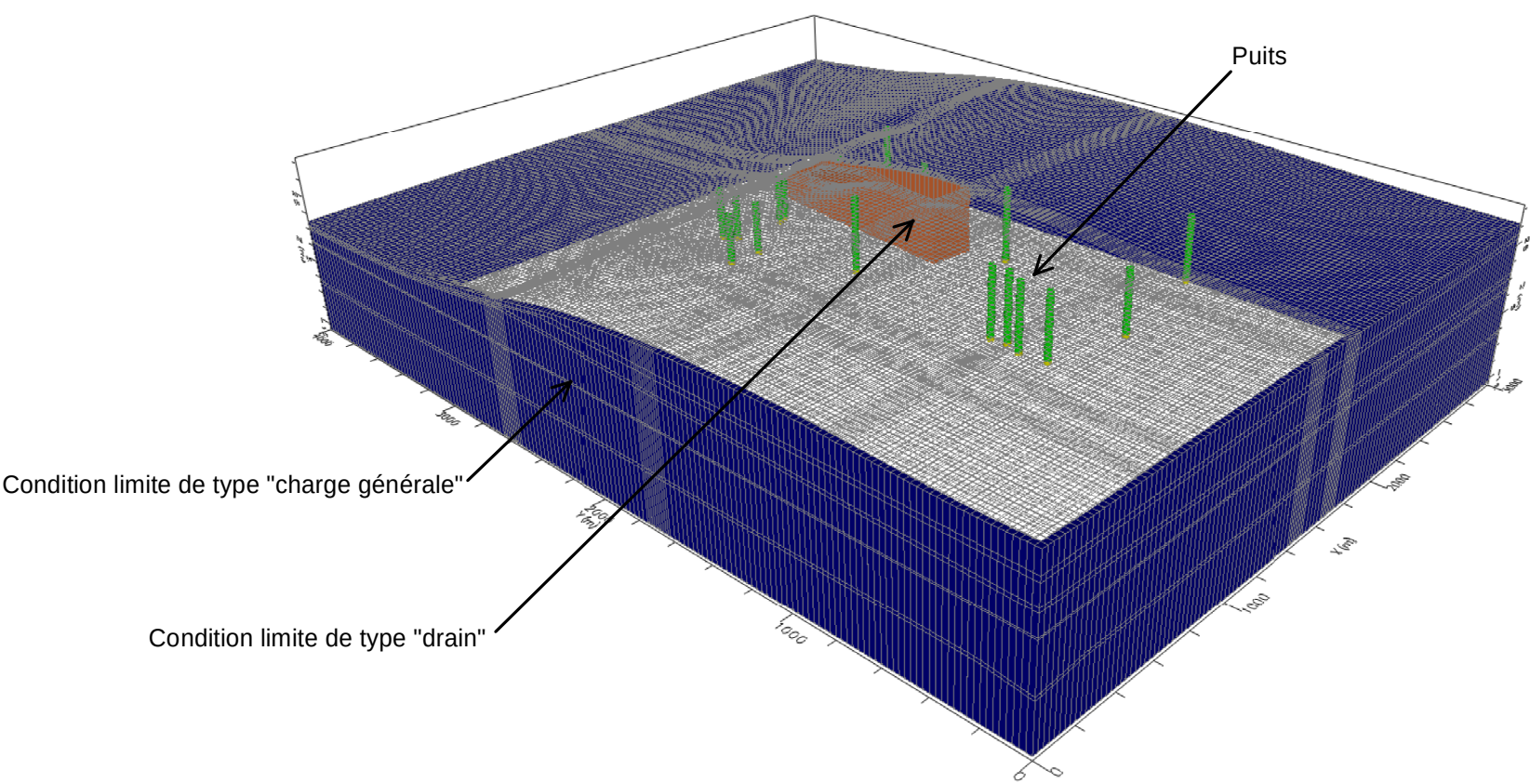


- Légende:
- 1A Till constitué d'argile, limon, sable et gravier, roc à 3-6 m
 - 1B Idem 1A, mais roc à plus de 6m
 - 1C Idem 1A, mais roc à moins de 3 m
 - 1D Moins de 3 m de till reposant sur une roche intrusive
 - 2A Argile en surface ou parfois recouverte de sable, roc à 3-6 m
 - 2B Idem 2A, mais roc à moins de 3 m

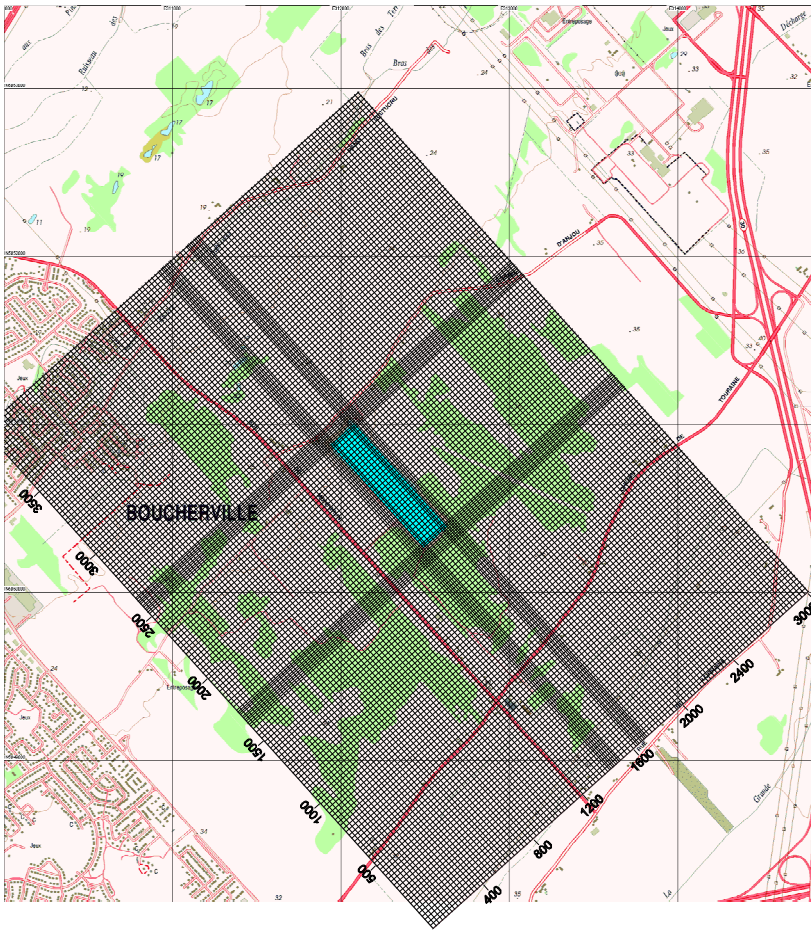
5A: Surfaces délimitant les unités hydrostratigraphiques du modèle



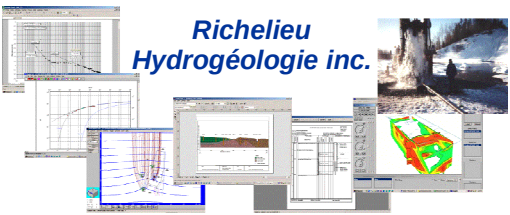
5B: Grille du modèle



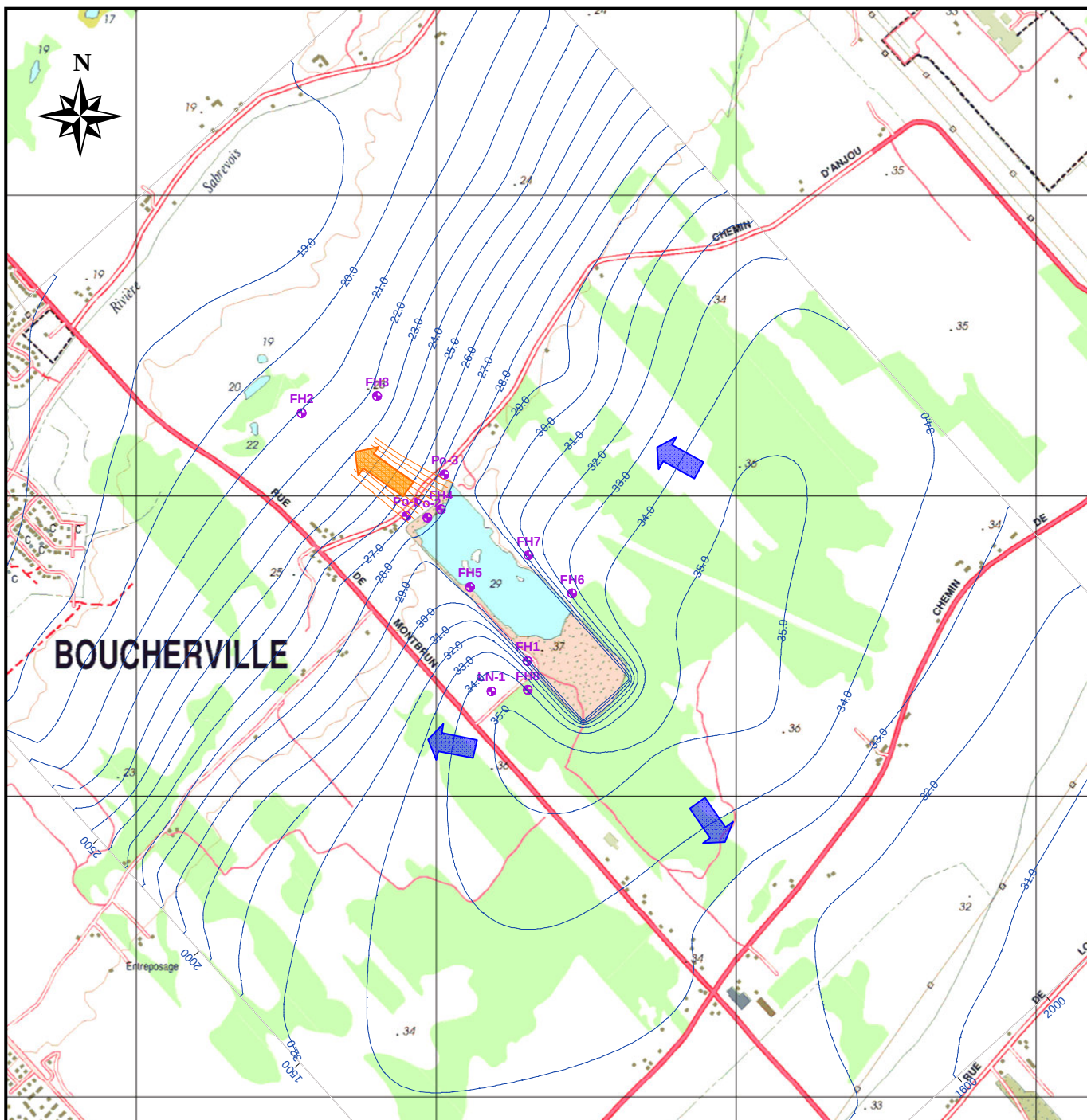
Légende



Fond cartographique: carte 31H11-101 du MRNQ



Titre	
FIGURE 5: DESCRIPTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE	
Projet	
CARRIÈRE RIVE-SUD MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN	
Interprétation et dessin	
Yves Leblanc, ing. géo. M.Sc. Hydrogéologue	
Date	Échelle
Le 27 avril 2009	Voir dessin



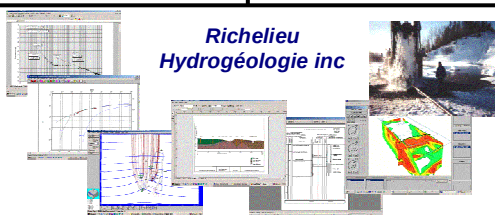
Dessin et interprétation : Yves Leblanc, ing. géo.
M.Sc., Hydrogéologue

Titre : FIGURE 6: PIÉZOMÉTRIE MODÉLISÉE
SOUS LES CONDITIONS ACTUELLES D'ÉCOULEMENT

Date : 27 avril 2009

  chelle : 1 : 20 000

Projet : CARRIÈRE RIVE-SUD
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN

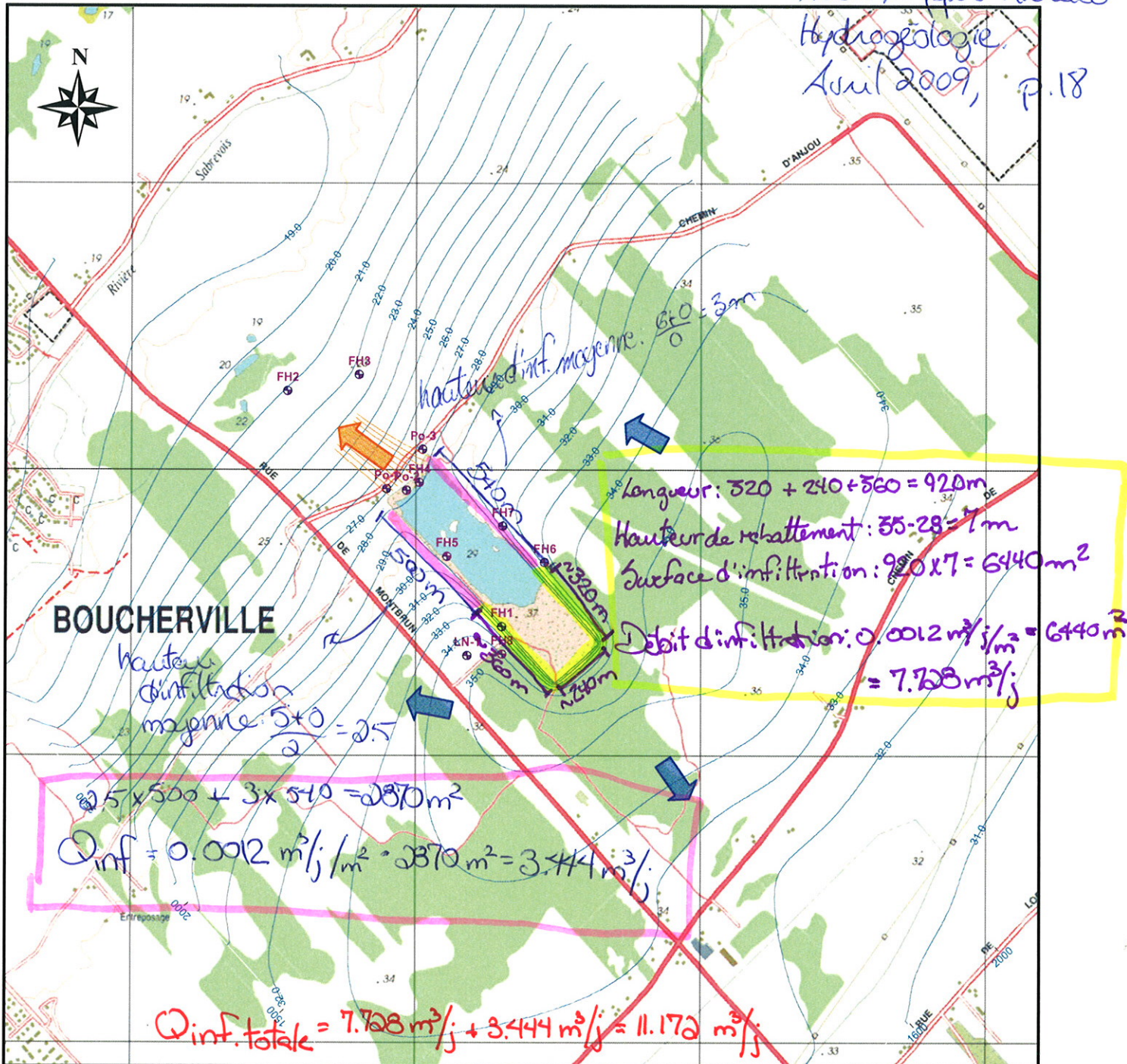


- Légende:
-    Puits ou forage recensé dans les études de 2004 à 2006
 -    Courbe équipotentielle
 -    Trajectoire d'une particule d'eau souterraine

Note : extrait de la carte 31H11-101 du Ministère des Ressources naturelles du Québec

$19,4 \text{ m}^3/\text{j} / 16600 \text{ m}^2 = 0,0012 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}^2 \Rightarrow$ Débit d'infiltration moyen aux parois selon rapport Richelieu

Hydrogéologie
Avril 2009, p.18



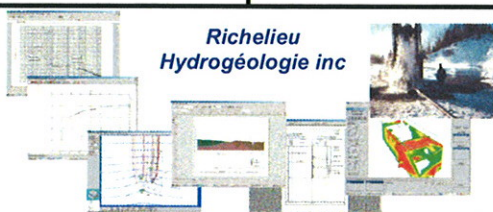
Dessin et interprétation : Yves Leblanc, ing. géo.
M.Sc., Hydrogéologue

Titre : FIGURE 6: PIÉZOMÉTRIE MODÉLISÉE
SOUS LES CONDITIONS ACTUELLES D'ÉCOULEMENT

Date : 27 avril 2009

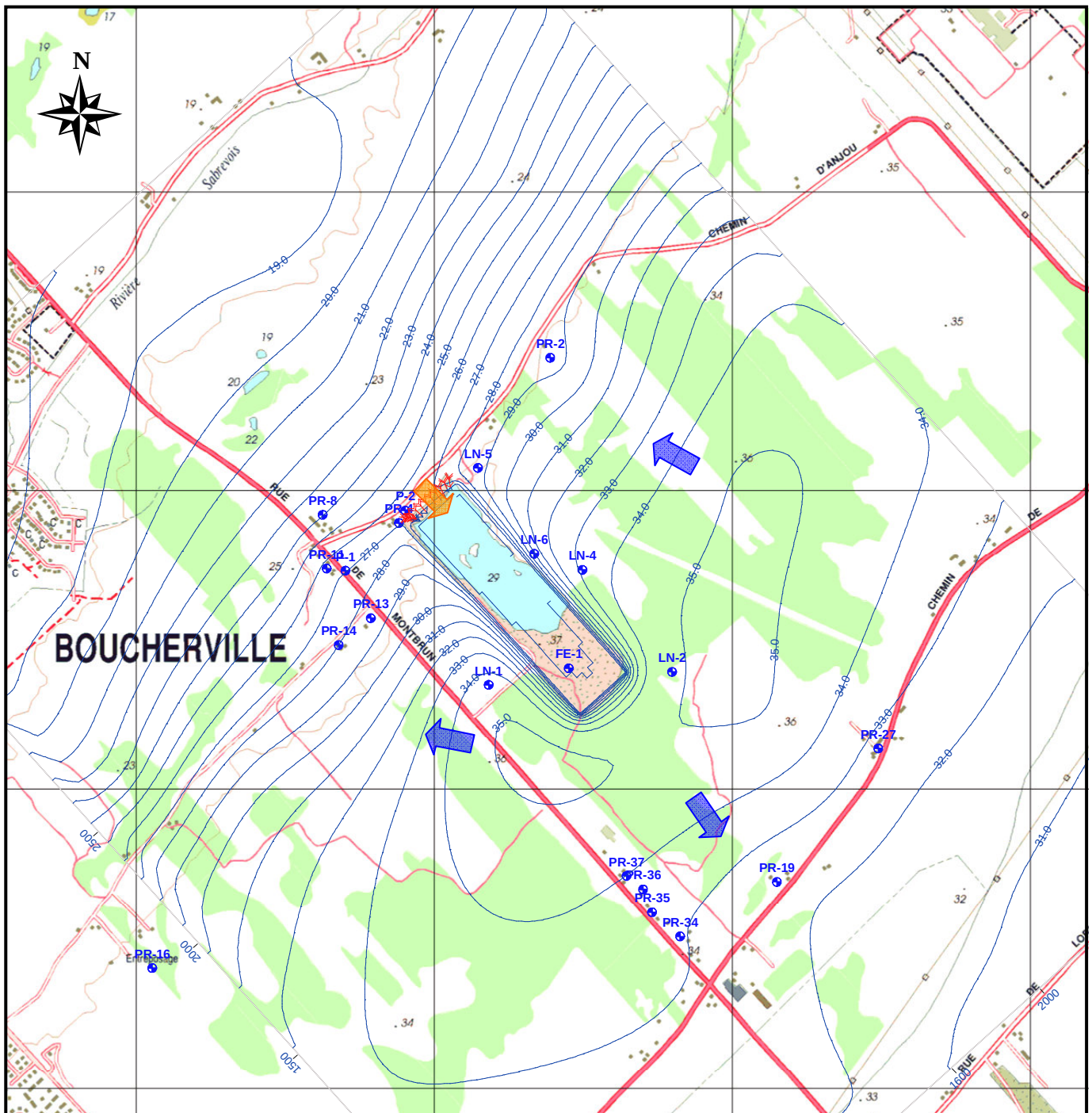
Échelle : 1 : 20 000

Projet : CARRIÈRE RIVE-SUD
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN



- Légende:
- Puits ou forage recensé dans les études de 2004 à 2006
 - Courbe équipotentielle
 - Trajectoire d'une particule d'eau souterraine

Note : extrait de la carte 31H11-101 du Ministère des Ressources naturelles du Québec



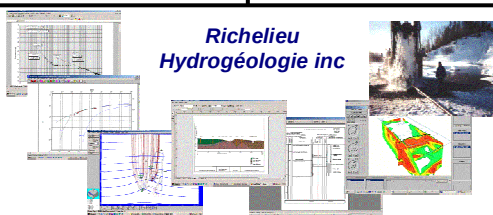
Dessin et interprétation : Yves Leblanc, ing. géo.
M.Sc., Hydrogéologue

Titre : FIGURE 7: PIÉZOMÉTRIE MODÉLISÉE
LORSQUE LA CARRIÈRE EST EN CONDITION DE POMPAGE

Date : 27 avril 2009

  chelle : 1 : 20 000

Projet : CARRIÈRE RIVE-SUD
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN



Légende:

- Puits ou forage recensé dans les études de 1981 et 1983
-    Courbe équipotentielle
-    Trajectoire d'une particule d'eau souterraine

Note : extrait de la carte 31H11-101 du Ministère des
Ressources naturelles du Québec