

This document was produced
by scanning the original publication.

Ce document est le produit d'une
numérisation par balayage
de la publication originale.



DOSSIER PUBLIC 4600

Études locales de secteurs choisis du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec

Coordination et révision scientifique

Martine M. Savard, René Lefebvre, Miroslav Nastev et Daniel Paradis

Rédaction

D. Paradis, G. Karanta, M. Nastev, J.-M. Lemieux, E. Bourque,
M.M. Savard, V. Cloutier, N. Fagnan, R. Therrien, R. Martel, R. Lefebvre,
D. Kirkwood et C. Savard

Avril 2004



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA

DOSSIER PUBLIC 4600

Études locales de secteurs choisis du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec

Coordination et révision scientifique

Martine M. Savard¹, René Lefebvre², Miroslav Nastev¹ et Daniel Paradis¹

Rédaction

D. Paradis¹, G. Karanta², M. Nastev¹, J.-M. Lemieux³, E. Bourque¹,
M.M. Savard¹, V. Cloutier², N. Fagnan¹, R. Therrien³, R. Martel², R. Lefebvre,
D. Kirkwood³ et C. Savard³

- 1) Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada
- 2) Institut National de la Recherche Scientifique - Eau-Terre-Environnement
- 3) Université Laval, département de géologie et de génie géologique

2004

©Sa Majesté la Reine du chef du Canada 2004

En vente à l'endroit suivant :

Commission géologique du Canada

601, rue Booth

Ottawa (Ontario) K1A 0E8

Savard M.M., Lefebvre, R., Nastev M. et Paradis, D., *et al.*

2004: Études locales de secteurs choisis du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec, Commission géologique du Canada, dossier public 4600, 147 p.

Les dossiers publics sont des produits qui n'ont pas été soumis au processus officiel de publication de la CGC.

Sommaire

Cadre de la recherche

La *Caractérisation hydrogéologique régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec* constitue le principal objet du partenariat de recherche impliquant Ressources naturelles Canada, Développement Économique Canada, le Ministère de l'Environnement du Québec, le Conseil régional de développement des Laurentides, et les Municipalités régionales de comté d'Argenteuil, Mirabel, Deux-Montagnes et Thérèse-de-Blainville.

Les travaux ont été exécutés par la Commission géologique du Canada en étroite collaboration avec l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau, Terre et Environnement), et l'Université Laval, et avec le support d'Environnement Canada, du Ministère de l'Environnement (Québec), de l'Université Queen's, du Service géologique des États Unis (USGS), et du Ministère des Transports (Québec).

Une série de documents synthétise les résultats de tous les travaux de terrain effectués de 1999 à 2002, les compilations de données hydrogéologiques existantes et celles acquises au cours du projet, l'analyse et l'interprétation de ces données, et elle présente des recommandations sur la gestion et la protection des ressources en eau souterraine. Ces documents incluent le *Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées* (Savard et al., 2003), le Bulletin de la CGC sur la *Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec* (Savard et al., sous presse), la base interactive de données hydrogéologiques (<http://cgcq.mcan.gc.ca/bdnes-ngwd/>), et le présent dossier public.

Études locales de secteurs choisis

Ce rapport présente quatre études thématiques locales qui complètent les connaissances régionales du système aquifère par des études détaillées de parties du système aquifère des Basses Laurentides (sud-ouest du Québec). Ces secteurs permettent d'aborder des questions prioritaires identifiées en collaboration avec les partenaires de la région, pour des secteurs restreints soumis à une exploitation intense de l'eau souterraine. En plus de répondre à des questions pratiques locales, l'étude détaillée de ces secteurs permet de mieux caractériser le comportement du système aquifère à l'échelle à laquelle les effets d'une exploitation plus intense se font sentir. Ce rapport donne donc un aperçu à différentes échelles de la dynamique d'écoulement dans la région d'étude.

Étude détaillée d'un site sélectionné : Cas de la carrière de Chatham

La caractérisation du comportement de l'une des principales couches aquifères – le calcaire fracturé – sous l'effet d'un pompage de longue durée (section 2) à la carrière de Chatham (Marellan) apporte des nuances au modèle hydrostratigraphique régional. En effet, l'étude implique que la perméabilité de l'aquifère de roches fracturées est plus importante au-dessus du

contact entre deux unités rocheuses (groupes de Chazy et de Beekmantown), à une profondeur de 35 m, et ce pour une couche d'environ 24 m. Cette analyse montre que des écarts existent sur le territoire d'étude par rapport au modèle conceptuel régional stipulant que la perméabilité diminue avec la profondeur dans la séquence rocheuse. De plus, les simulations numériques en mode transitoire sur ce secteur montrent que seul l'ajout au modèle hydrostratigraphique initial d'un système de fractures verticales orientées N°50 et la modélisation d'une infiltration rapide des précipitations vers la nappe permettent de bien reproduire l'abaissement de la nappe d'eau observé dans les cinq puits d'observation utilisés lors de l'assèchement de la carrière. L'extrapolation des résultats des simulations numériques suggère que le système régional de failles peut constituer une cible pour la recherche en eau souterraine dans le sud-ouest du Québec.

Étude détaillée d'un site sélectionné : Cas de Saint-Benoît

L'étude détaillée de l'approvisionnement en eau à Saint-Benoît (Mirabel) (section 3) face à la problématique de la salinité de l'eau souterraine présente les résultats des analyses hydrogéochimiques, des essais hydrauliques et des simulations numériques en mode transitoire effectués dans ce secteur. L'intégration de ces résultats suggère que la productivité de l'aquifère est suffisante pour permettre son exploitation durable pour un pompage de 180 m³/j dans un seul puits de pompage ou pour un pompage simultané dans deux puits à un débit maximal et continue de 140 m³/j pour chacun des puits (280 m³/j au total). Ce deuxième scénario d'extraction permet une exploitation maximale de l'aquifère sans provoquer d'abaissement des niveaux d'eau dans ce secteur sous un niveau d'eau de 35 m. Un pompage excédant cette limite ferait passer les conditions de la nappe de captives à libres, et pourrait causer une modification de la qualité de l'eau. Ce deuxième scénario permet aussi d'assurer l'augmentation du débit actuel tout en maintenant une bonne qualité d'eau pompée. Pour ce scénario, le rabattement dans le village de Saint-Benoît, en aval des sites de pompage, serait de 1.3 m, tandis qu'en amont des sites de pompage sur le rang Grand Brûlé et près de la ligne de partage des eaux, le rabattement serait plus important, soit de 3.7 m. On recommande pour tout le secteur une surveillance serrée des niveaux d'eau près des puits de pompage, et de la qualité de l'eau souterraine. Le suivi sur la qualité de l'eau consisterait à mesurer de façon périodique la conductivité électrique, le pH, la dureté totale et les concentrations en chlorures, manganèse, fer et nitrates. Un suivi de la qualité de l'eau dans des puits éloignés en amont des puits de pompage serait également utile pour prévenir une avancée éventuelle de l'eau saline. L'aire d'alimentation du secteur se trouve le long de la Côte Saint-Vincent. La protection de l'aquifère impliquerait donc aussi de faire un inventaire des principales sources de contamination possibles dans cette zone et de contrôler leur utilisation.

Étude détaillée d'un site sélectionné : Cas de la carrière de Saint-Eustache

La question des conduits efficaces de l'eau dans l'aquifère régional est abordée par l'étude détaillée à la carrière de Saint-Eustache (section 4). Les levés piézométriques à l'échelle régionale indiquent que l'effet du pompage de la carrière Saint-Eustache est visible à l'échelle de 1/100 000, les rabattements causés par l'exploitation de la carrière étant de l'ordre de 40 m. La moyenne géométrique de la conductivité hydraulique de la Formation de Beauharnois dans sa partie la plus perméable de la carrière se situe à 5.9×10^{-5} m/s, alors que celle du plancher peu

perméable serait de 1.9×10^{-7} m/s. Les travaux sur la fracturation documentent trois types distincts de fractures : (1) petites failles de décrochement, (2) plans de dissolution parallèles aux strates de dolomie, et (3) joints verticaux. Le rôle des fractures n'est pas régi par leur type, il varie avec la profondeur dans l'unité rocheuse. Les grandes profondeurs imposent des forces verticales plus élevées dues au poids des roches de recouvrement. En d'autres termes, tous les types de fractures peuvent agir comme conduit de l'eau souterraine, toutefois ce sont l'ouverture et l'interconnectivité de ces dernières qui contrôlent la perméabilité de l'aquifère.

Étude détaillée de deux sites sélectionnés : Cas de Saint-Janvier et de Sainte-Anne-des-Plaines

Les études détaillées de Saint-Janvier et Sainte-Anne-des-Plaines discutent de la délimitation des aires d'alimentation des ouvrages de captage de l'eau souterraine sur le territoire d'étude (section 5). Les résultats des essais de pompage de longue durée démontrent que les portions aquifères évaluées ont une transmissivité très élevée, typique des aquifères granulaires, qui résulte du fait que les premiers mètres du roc montrent une haute densité de fractures efficaces. Suite à la caractérisation détaillée des deux sites étudiés, plusieurs méthodes de délimitation des périmètres de protection éloignés et rapprochés des puits ont été appliquées. Pour les périmètres de protection éloignés, l'une des méthodes testées, la méthode hybride 3A2E, assure une détermination réaliste des périmètres pour les deux sites étudiés. En effet, cette méthode requiert de connaître un minimum de données hydrogéologiques et géologiques comme la stratigraphie et la géologie des unités, leurs caractéristiques hydrauliques et le débit des puits en opération. En retour, la méthode permet une protection efficace des zones de recharge qui constituent des points vulnérables de l'aquifère confiné. Cette méthode est simple d'application et elle peut contribuer à la préservation de la qualité de l'eau souterraine si des mesures de contrôle des sources de contamination sont appliquées à l'intérieur du périmètre. Pour les périmètres rapprochés, ce sont l'équation du temps de transport et CAPZONE/GWPATH qui couvrent le mieux l'aire d'alimentation pour un temps de 60 jours. La zone de recharge de l'aquifère contribuant à l'alimentation des puits doit faire l'objet d'une supervision étroite, puisqu'elle est très vulnérable à la contamination. En plus, à l'intérieur de toute l'aire d'alimentation des ouvrages de captage, les activités humaines doivent être gérées, même aux endroits où l'aquifère se trouve protégé par une couche d'argile. Il est aussi important de colmater tout puits abandonné dans l'aire d'alimentation car ceux-ci constituent des points d'entrée directe vers la nappe captive.

Remerciements

Le projet de CARACTÉRISATION RÉGIONALE a été supporté financièrement par la Commission géologique du Canada (Ressources naturelles Canada), Développement Économique Canada, le Conseil Régional de Développement-Laurentides, le Ministère de l'Environnement du Québec, les Municipalités régionales de comté d'Argenteuil, Deux-Montagnes, Mirabel et Thérèse-de-Blainville, et l'Association des Professionnels de Développement Économique des Laurentides. Une partie de la campagne de forage a été supportée par le Ministère des Transports du Québec. Les scientifiques du projet remercient sincèrement l'APDEL pour la prise en charge des transferts budgétaires. Ils remercient particulièrement M. Jean-Luc Riopel (APDEL) pour sa participation active à la gestion, aussi Mme Carole Hart de Développement économique Canada pour avoir grandement contribué à rendre possible la bonne marche du partenariat entre RNCan et DEC. M. Alfonso Rivera (RNCan) pour ses conseils scientifiques et MM. Guy Raynault anciennement au CRDL et Marc Carrière de la MRC d'Argenteuil pour leur appui constant par le biais de conseils judicieux.

L'équipe scientifique tient à remercier le Ministère de l'Environnement du Québec, un membre important dans ce large partenariat intergouvernemental. Sa contribution a permis de compléter l'étude hydrogéochimique et de produire un *guide méthodologique sur la caractérisation des aquifères en roches sédimentaires fracturées*. L'équipe tient à souligner la contribution importante des scientifiques du projet *des Ponts géologiques de l'est du Canada*, dirigé par Denis Lavoie, et supporté par le programme CARTNAT, pour le raffinement du cadre géologique régional. La production de cette ouvrage a bénéficié de la révision critique de Christine Rivard. De plus, l'équipe scientifique tient à remercier les institutions de recherche scientifique ayant participé au projet pour leur support administratif : la Commission géologique du Canada, le centre Eau, Terre et Environnement de l'INRS, l'Université Laval, le Ministère de l'Environnement du Québec, Environnement Canada, le Ministère des Transports du Québec, le USGS, et l'Université Queen's.



Table des matières

Sommaire	ii
Remerciements	v
Table des matières.....	vi
Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xvi
1. Introduction- Contexte et sélection des études d'échelle locale.....	1
1.1 Structure du rapport et présentation des résultats	1
1.2 Le système aquifère régional.....	1
1.3 Sélection des secteurs restreints et des thématiques d'étude.....	2
2. Étude détaillée d'un site sélectionné : Cas de la carrière de Chatham.....	3
2.1 Introduction	3
2.2 Contexte physique	3
2.2.1 Localisation, physiographie et hydrographie	3
2.2.2 Données climatiques	3
2.3 Contexte géologique	4
2.3.1 Formations superficielles.....	4
2.3.2 Socle rocheux	4
2.4 Contexte hydrogéologique	5
2.4.1 Unités hydrogéologiques.....	5
2.5 Recharge.....	5
2.6 Piézométrie et suivi piézométrique	5
2.7 Sources potentielles de contamination et qualité de l'eau souterraine.....	6
2.8 Utilisation de l'eau souterraine	6
2.9 Propriétés hydrauliques.....	7
2.9.1 Essais à charge constante et de perméabilité in situ	7
2.9.2 Essai de pompage.....	7
2.10 Modélisation numérique.....	8
2.10.1 Conception du modèle numérique.....	8
2.11 Simulations.....	9
2.12 Conclusion.....	11
2.13 Remerciements	11

3.	Étude détaillée d'un site sélectionné: Cas du secteur de Saint-Benoît	12
3.1	Introduction	12
3.1.1	<i>Problématique</i>	<i>12</i>
3.1.2	<i>Objectifs de l'étude.....</i>	<i>12</i>
3.2	Contexte physique	12
3.2.1	<i>Localisation et physiographie</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>Contexte géologique.....</i>	<i>13</i>
3.3	Contexte hydrogéologique	13
3.3.1	<i>Description des unités hydrogéologiques</i>	<i>13</i>
3.3.2	<i>Toit de l'aquifère.....</i>	<i>14</i>
3.3.3	<i>Piézométrie.....</i>	<i>15</i>
3.3.4	<i>Utilisation de l'eau souterraine dans le secteur et sources potentielles de contamination.....</i>	<i>15</i>
3.4	Qualité de l'eau souterraine	15
3.4.1	<i>Analyses chimiques</i>	<i>15</i>
3.4.2	<i>Qualité de l'eau souterraine dans le roc fracturé.....</i>	<i>16</i>
3.4.3	<i>Évolution de la qualité de l'eau souterraine lors des essais de pompage</i>	<i>16</i>
3.4.4	<i>Qualité de l'eau interstitielle des argiles</i>	<i>16</i>
3.4.5	<i>Origine de la salinité de l'eau souterraine</i>	<i>16</i>
3.4.6	<i>Profil vertical de la salinité.....</i>	<i>17</i>
3.5	Propriétés hydrauliques.....	19
3.5.1	<i>Données existantes</i>	<i>19</i>
3.5.2	<i>Essais hydrauliques - été 2000.....</i>	<i>19</i>
3.6	Modélisation numérique.....	20
3.6.1	<i>Construction du modèle numérique</i>	<i>20</i>
3.6.2	<i>Calage du modèle numérique – écoulement sans pompage.....</i>	<i>21</i>
3.6.3	<i>Simulation de l'écoulement lors des pompages</i>	<i>22</i>
3.6.4	<i>Scénarios de pompage.....</i>	<i>23</i>
3.6.5	<i>L'aire d'alimentation et temps de transport</i>	<i>24</i>
3.7	Conclusions et recommandations	25
3.7.1	<i>Hydrostratigraphie.....</i>	<i>25</i>
3.7.2	<i>Propriétés hydrauliques</i>	<i>25</i>
3.7.3	<i>Qualité de l'eau souterraine</i>	<i>25</i>
3.7.4	<i>Modélisation numérique.....</i>	<i>25</i>
3.7.5	<i>Durabilité de la ressource.....</i>	<i>26</i>
3.7.6	<i>Protection de l'aquifère</i>	<i>26</i>
4.	Étude détaillée d'un site sélectionné: Cas de la carrière de Saint-Eustache.....	28
4.1	Introduction	28
4.2	Contexte physique	28
4.2.1	<i>Localisation et physiographie.....</i>	<i>28</i>

4.3 Bassins hydrologiques	28
4.3.1 <i>Données climatiques</i>	29
4.4 Contexte géologique	29
4.4.1 <i>Carte des formations superficielles</i>	29
4.4.2 <i>Géologie du socle rocheux</i>	29
4.4.3 <i>Analyse de la fracturation</i>	30
4.5 Contexte hydrogéologique	31
4.5.1 <i>Description des unités hydrogéologiques</i>	31
4.5.2 <i>Limites ou conditions hydrauliques particulières</i>	31
4.5.3 <i>Carte piézométrique et zone d'appel de la carrière</i>	32
4.5.4 <i>Recharge, bilan hydrologique et suivi de la nappe</i>	32
4.5.5 <i>Sources potentielles de contamination et qualité de l'eau souterraine</i>	33
4.6 Propriétés hydrauliques	34
4.6.1 <i>Données existantes</i>	34
4.6.2 <i>Essais de perméabilité et essais d'injection à charge constante</i>	35
4.6.3 <i>Essais de pompage</i>	35
4.6.4 <i>Autres essais</i>	36
4.7 Modélisation numérique	37
4.7.1 <i>Objectifs</i>	37
4.7.2 <i>Modèle conceptuel</i>	37
4.7.3 <i>Simulations</i>	37
4.7.4 <i>Implications pour l'étude régionale</i>	38
4.8 Conclusion	39
5. Étude détaillée de deux sites sélectionnés: Cas de Sainte-Anne-des-Plaines et de Saint-Janvier	41
5.1 Introduction	41
5.2 Problématique et objectif	41
5.3 Localisation	41
5.4 Physiographie et hydrographie	42
5.5 Données climatiques	42
5.6 Périmètres de protection	42
5.6.1 <i>Définition et but</i>	42
5.6.2 <i>Études antérieures</i>	42
5.6.3 <i>Description des méthodes</i>	43
5.7 Comparaison des périmètres de protection	46
5.7.1 <i>Périmètres éloignés</i>	46
5.7.2 <i>Périmètres rapprochés</i>	46
5.8 Étude hydrogéologique à Sainte-Anne-des-Plaines	46
5.8.1 <i>Géologie</i>	47
5.8.2 <i>Hydrogéologie</i>	47

5.8.3	<i>Propriétés hydrauliques</i>	48
5.8.4	<i>Modélisation numérique</i>	49
5.8.5	<i>Délimitation de périmètres de protection</i>	51
5.8.6	<i>Conclusion</i>	53
5.9	Étude hydrogéologique à Saint-Janvier	54
5.9.1	<i>Géologie</i>	54
5.9.2	<i>Hydrogéologie</i>	54
5.9.3	<i>Propriétés hydrauliques</i>	55
5.9.4	<i>Modélisation</i>	56
5.9.5	<i>Délimitation de périmètres de protection</i>	57
5.9.6	<i>Conclusion</i>	59
5.10	Conclusion générale	60
5.11	Recommandations	61
5.12	Remerciements	62
6.	Synthèse des travaux et résultats des études locales	63
6.1	Introduction – Choix des secteurs d’étude	63
6.2	Cas de Chatham – Modélisation en mode transitoire à la carrière	63
6.2.1	<i>Problématique et contexte</i>	63
6.2.2	<i>Approche – Modélisation en mode transitoire</i>	63
6.2.3	<i>Résultats – Révision du modèle hydrostratigraphique</i>	63
6.2.4	<i>Implications pour l’étude régionale</i>	64
6.3	Cas de Saint-Benoît – Débit durable en conditions restreintes	64
6.3.1	<i>Problématique</i>	64
6.3.2	<i>Approche</i>	64
6.3.3	<i>Résultats</i>	64
6.3.4	<i>Implication pour l’étude régionale</i>	65
6.4	Cas de Saint-Eustache - Étude des systèmes de fractures	65
6.4.1	<i>Problématique et contexte</i>	65
6.4.2	<i>Approche</i>	65
6.4.3	<i>Résultats – Types de fractures et modélisation discrète</i>	66
6.4.4	<i>Implications pour l’étude régionale</i>	66
6.5	Cas de Sainte-Anne-des-Plaines et de Saint-Janvier - Périmètres de protection dans des secteurs de captage	66
6.5.1	<i>Problématique et contexte</i>	66
6.5.2	<i>Approche</i>	67
6.5.3	<i>Résultats – Comparaison des méthodes d’évaluation des périmètres de protection</i>	67
6.5.4	<i>Implications pour la protection des ressources en eau pour les Basses Laurentides</i>	68
7.	Références	69

Liste des figures

Figure 1.1	Distribution des zones d'étude locale.....	75
Figure 2.1	Localisation et physiographie de la région de la carrière étudiée à Chatham.....	76
Figure 2.2	Contexte hydrographie et hydrologique de l'étude locale.	77
Figure 2.3	Précipitations annuelles en pluie, en neige et total pour la période de 1970 à 1998.....	78
Figure 2.4	Précipitations moyennes mensuelles en pluie, en neige et total pour la période de 1970 à 1998.....	78
Figure 2.5	Stratigraphie du socle rocheux observée dans le secteur de la carrière étudiée.....	79
Figure 2.6	Coupe géologique du Groupe de Chazy et les dolomies du Groupe de Beekmantown.	79
Figure 2.7	Carte piézométrique de l'aquifère libre de calcaires du Groupe de Chazy.....	80
Figure 2.8	Bilan de la consommation d'eau souterraine pour la période de 1998-2000.....	81
Figure 2.9	Localisation des puits d'observation.....	82
Figure 2.10	Profil de conductivité hydraulique pour le puits d'observation 00_SIN-F3.....	83
Figure 2.11	Fluctuations des niveaux piézométriques dans les puits d'observation 00_SIN-F1 à F5 et du débit de pompage	83
Figure 2.12	Rabattements aux puits d'observation 00_SIN-F1 à F5	84
Figure 2.13	Courbe de capillarité et de perméabilité relative.	85
Figure 2.14	Limites latérales et maillage horizontal du modèle numérique	86
Figure 2.15	Maillage tridimensionnel du modèle numérique.	86
Figure 2.16	Évolution de l'erreur absolue en fonction des différents modèles conceptuels.....	87
Figure 2.17	Recharge et infiltration préférentielle calibrées et précipitations mesurées au cours de l'essai de pompage du 11 mai au 6 juin 2000.....	87
Figure 2.18	Courbes de rabattement observées en fonction du temps pour les puits 00_SIN-F1 à F5,.....	88
Figure 3.1	Localisation de la zone étudiée, topographie, géologie, et installations	89
Figure 3.2	Géologie quaternaire simplifiée et localisation des coups	89
Figure 3.3	Coupes stratigraphiques.	90
Figure 3.4	Topographie de la séquence rocheuse.....	90
Figure 3.5	Piézométrie tel qu'observé en début mai 2000.....	91

Figure 3.6	Pompage d'eau souterraine au puits municipal PE-1/87 en 1999.....	91
Figure 3.7	Concentrations de chlorures (mg/L) dans le secteur.....	92
Figure 3.8	Diagramme Piper de la région de Saint-Benoît.....	92
Figure 3.9	Modèle sur l'origine de la salinité dans la région de Saint-Benoît.....	93
Figure 3.10	Profil vertical des concentrations en Cl.....	94
Figure 3.11	Rabattement en fonction de t/r^2 pour l'essai de pompage au puits PE-1/87	94
Figure 3.12	Rabattement en fonction de t/r^2 pour l'essai de pompage au puits F3	95
Figure 3.13	Profil de la transmissivité dans le puits F4 déterminé par des essais Lugeon.....	95
Figure 3.14	Maillage d'éléments finis, conditions aux limites et points d'observation.....	96
Figure 3.15	Distribution de la conductivité hydraulique calée de la couche I.....	96
Figure 3.16	Variations saisonnières du taux de la recharge et des niveaux piézométriques	97
Figure 3.17	Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés.....	97
Figure 3.18	Relation entre les niveaux d'eau mesurés et simulés le 10 août 2000.....	98
Figure 3.19	Charge hydraulique simulée en régime transitoire pour la couche I	98
Figure 3.20	Rabattements observés et simulés au puits PE-1/87	99
Figure 3.21	Rabattements observés et simulés F3	99
Figure 3.22	Rabattements provoqués aux deux puits de pompage	100
Figure 3.23	Traçage des particules pour le pompage de 180 m ³ /j pour les deux	101
Figure 3.24	Traçage des particules et isochrones pour le pompage de 180 m ³ /j pour les deux puits.....	102
Figure 4.1	Hydrographie et bassins de drainage de la région à l'étude.....	103
Figure 4.2	Précipitations annuelles de pluie, de neige et total pour les années 1970 à 1998.....	103
Figure 4.3	Précipitations mensuelles moyennes de pluie, de neige et entre 1970 et 1998.....	104
Figure 4.4	Carte des dépôts de surface, tiré de Hamel (2002).....	104
Figure 4.5	Carte géologique des Basses Terres du Saint-Laurent.....	105
Figure 4.6	Distribution de l'espacement des joints pour chaque famille de joints	105
Figure 4.7	Piézométrie de la région à l'étude	106
Figure 4.8	Zone d'appel de la carrière.....	106
Figure 4.9	Contextes hydrogéologiques de la région à l'étude.....	107
Figure 4.10	Distribution des types d'eaux souterraines et leurs relations avec le contexte hydrogéologique.....	107
Figure 4.11	Distribution spatiale du log de la conductivité hydraulique horizontale de l'aquifère de roc fracturé	108

Figure 4.12	Position relative des trois puits dans la carrière Saint-Eustache.....	108
Figure 4.13	Profils de transmissivité selon la profondeur pour chacun des trois puits.....	109
Figure 4.14	Modèle hydrostratigraphique.....	109
Figure 4.15	Rabatement en fonction du temps pour le puits de pompage et les puits d'observations mesuré et simulé.	109
Figure 5.1	Physiographie régionale et localisation des sites d'étude de Sainte-Anne-des-Plaines et de Saint-Janvier.	110
Figure 5.2	Représentation du cylindre dont le rayon calculé est fixe sur l'épaisseur de l'aquifère.....	110
Figure 5.3	Représentation du périmètre de protection déterminé par l'équation de l'écoulement uniforme.....	111
Figure 5.4	Délimitation du périmètre de protection avec le calcul du temps de transport.....	111
Figure 5.5	Démonstration des cinq étapes de la méthode hybride 3A2E (d'après Paradis, 2000).	112
Figure 5.6	Représentation 3D des caractéristiques de la cartographie hydrogéologique.....	112
Figure 5.7	Exemple de l'application du modèle MODFLOW/MODPATH à Sainte-Anne-des-Plaines.....	113
Figure 5.8	Carte des formations géologiques du roc dans le secteur de Sainte-Anne-des-Plaines.....	113
Figure 5.9	Carte simplifiée des formations superficielles dans le secteur de..... Sainte-Anne-des-Plaines.....	114
Figure 5.10	Coupe stratigraphique A-A' nord-ouest sud-est de Sainte-Anne-des-Plaines.....	114
Figures 5.11 et 5.12	Cartes piézométriques dans le roc avant et après l'essai de pompage de Sainte-Anne-des-Plaines.....	115
Figure 5.13	Graphique des écarts des valeurs des propriétés hydrauliques de l'aquifère.....	116
Figure 5.14	Graphique du profil de la transmissivité au puits P9 (intervalles de 3.74 m).....	116
Figure 5.15	Modèle conceptuel de l'aquifère de Sainte-Anne-des-Plaines et propriétés hydrauliques des couches du modèle de Sainte-Anne-des-Plaines.....	117
Figure 5.16	Aires d'alimentation et conditions limites de la modélisation à Sainte-Anne-des-Plaines.....	117
Figure 5.17	Graphique des charges simulées en fonction des charges observées.....	118
Figure 5.18	Périmètres de protection éloignés des méthodes appliquées au puits P8.....	118

Figure 5.19	Périmètres de protection éloignés des méthodes appliquées au puits Barrette.....	119
Figure 5.20	Périmètres de protection rapprochés des méthodes appliquées aux puits P8 et Barrette.....	119
Figure 5.21	Carte des formations géologiques dans le secteur de Saint-Janvier.	120
Figure 5.22	Carte des formations superficielles dans le secteur de Saint-Janvier.	120
Figure 5.23	Coupe stratigraphique A-A' ouest-est de la région de Saint-Janvier.....	121
Figure 5.24	Carte piézométrique dans le roc avant l'essai de pompage de Saint-Janvier.	121
Figure 5.25	Carte piézométrique dans le roc après l'essai de pompage de Saint-Janvier.....	122
Figure 5.26	Graphique des écarts des valeurs des propriétés hydrauliques de l'aquifère.....	123
Figure 5.27	Graphique du profil de la transmissivité au puits STJA1 (intervalles de 3.72 m).	124
Figure 5.28	Modèle conceptuel de l'aquifère de Saint-Janvier.....	124
Figure 5.29	Aires d'alimentation et conditions limites du modèle MODFLOW à Saint-Janvier.	125
Figure 5.30	Graphique des charges simulées en fonction des charges observées.....	125
Figure 5.31	Périmètres de protection éloignés des méthodes appliquées au puits STJA1.	126
Figure 5.32	Périmètres de protection éloignés des méthodes appliquées au puits Charles.....	126
Figure 5.33	Périmètres de protection rapprochés des méthodes appliquées aux puits STJA1 et Charles.	127

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Qualité de l'eau souterraine dans le secteur de la carrière étudiée à Chatham.....	128
Tableau 2.2	Résultats des essais à charge constante, des essais de perméabilité in situ.....	129
Tableau 2.3	Conductivité hydraulique et critère de.....	129
Tableau 3.1	Description des forages de Saint-Benoît.....	130
Tableau 3.2	Résultats d'analyses chimiques des échantillons d'eau.....	131
Tableau 3.3	Échantillonnage multi-niveaux, Forage F4.....	132
Tableau 3.4	Évolution de la qualité de l'eau souterraine.....	133
Tableau 3.5	Forage F5 : Géochimie de l'eau interstitielle des argiles.....	133
Tableau 3.6	Ratio molaire Cl-/Br- de l'eau de mer et des échantillons.....	134
Tableau 3.7	Comparaison entre l'eau de mer et FROMA1 pour les ions Cl- et de Br-.....	134
Tableau 3.8	Propriétés hydrauliques.....	135
Tableau 3.9	Propriétés hydrauliques pour les diverses unités hydrostratigraphiques.....	137
Tableau 3.10	Paramètres statistiques de la résiduelle (r).....	137
Tableau 3.11	Niveaux de l'eau souterraine dans les puits d'observation et de pompage.....	138
Tableau 3.12	Bilans annuels de masse d'eau pour les divers scénarios.....	139
Tableau 4.1	Recharge calculée avec les bilans hydrologiques.....	140
Tableau 4.2	Recharge calculée à l'aide des hydrogrammes de puits.....	140
Tableau 4.3	Transmissivité mesurée avec les essais Lugeon et les essais de perméabilité.....	140
Tableau 4.4	Résumé des valeurs obtenues par interprétation des essais de pompage.....	140
Tableau 5.1	Méthodes de délimitation des PDP évaluées par ordre de complexité.....	141
Tableau 5.2	Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés.....	141
Tableau 5.3	Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés.....	142
Tableau 5.4	Tableau du classement des méthodes pour les périmètres rapprochés et éloignés.....	142
Tableau 5.5	Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés.....	143
Tableau 5.6	Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés.....	143
Tableau 5.7	Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés.....	143
Tableau 5.8	Tableau du classement des méthodes pour les périmètres rapprochés et éloignés.....	144



1. Introduction- Contexte et sélection des études d'échelle locale

Martine M. Savard et René Lefebvre

1.1 Structure du rapport et présentation des résultats

Ce rapport sur les «Études locales de secteurs choisis du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec» constitue une partie des produits livrés dans le cadre du vaste projet multidisciplinaire et multi-institutionnel visant à mieux connaître le système aquifère du sud-ouest du Québec. On y présente dans l'ordre les résultats d'études détaillées dans les secteurs de Brownsburg-Chatham de la MRC d'Argenteuil (section 2), de Saint-Benoît (section 3) et Saint-Janvier (section 5) de la MRC de Mirabel, de Saint-Eustache de la MRC de Deux-Montagnes (section 4) et de Sainte-Anne-des-Plaines, de la MRC de Thérèse-de-Blainville (section 5). Ce rapport est structuré de manière à être complémentaire au Bulletin de la CGC sur le système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec (Savard et al., sous presse).

1.2 Le système aquifère régional

Les connaissances hydrogéologiques générées au cours du projet de partenariat entre Ressources naturelles Canada, Développement économique Canada, Ministère de l'Environnement (Québec) et le CDRL et les MRC d'Argenteuil, Mirabel, Deux-Montagnes et Thérèse-de-Blainville sont résumées dans le bulletin de la CGC. Les aspects les plus saillants du système aquifère ainsi caractérisé sont résumés ci-dessous.

Des roches paléozoïques peu perméables et des argiles marines d'âge Quaternaire pratiquement imperméables constituent respectivement le plancher et le toit du système aquifère du sud-ouest du Québec, alors que deux couches hydrostratigraphiques de distribution régionale composent l'aquifère principal. De la base au sommet, ces couches incluent: 1) des roches paléozoïques fracturées et 2) une unité mixte constituée principalement de roches paléozoïques très fracturées et de sédiments quaternaires fluvio-glaciaires.

L'écoulement de l'eau souterraine dans ce système aquifère se fait généralement du nord vers le sud, pour se déverser partiellement dans les rivières des Outaouais et des Mille-Îles. Les gradients piézométriques pour les Laurentides et les collines d'Oka et de Saint-André sont en moyenne de 2,2 et 1,6%, respectivement. Aux endroits les plus plats des Basses-Terres du Saint-Laurent proprement dites, les gradients sont généralement de l'ordre de 0,46%.

La recharge de l'aquifère rocheux est estimée à 45.5 mm/an par calcul, alors que la modélisation l'accroît à 61 mm/an. Ces estimations contribuent à dresser le bilan hydrologique annuel suivant: 1040 mm de précipitations touchent la région, 416 mm s'évaporent, 624 mm s'écoulent par les rivières, de ceux-ci seulement 4.4 ou 7% participent à l'écoulement souterrain dépendamment si l'on utilise la recharge estimée par calcul ou par modélisation.

La cartographie régionale a délimité les zones de recharge sur la base des contextes hydrogéologiques (Savard et al., sous presse). Les mêmes portions du territoire, les plus vulnérables à toutes formes de contamination, ont été aussi identifiées en utilisant une limite d'indice supérieure ou égale à 100 selon la méthode d'évaluation DRASTIC (Murat et al., 2003). Ces résultats indiquent que les secteurs à protéger ou à surveiller couvrent environ 35% du

territoire étudié. Les secteurs vulnérables sont dispersés partout sur le territoire, exception faite de sa partie nord-est, principalement dans la MRC de Thérèse-de-Blainville, où les conditions naturelles imposées par d'épaisses couches d'argile protègent naturellement l'aquifère (Murat et al., 2003; Ross et al., 2003).

En termes de propriétés hydrogéochimiques, de conditions hydrogéologiques et de vulnérabilité, les eaux souterraines du territoire d'étude appartiennent à 7 secteurs de qualité relative de l'eau. Cette classification couplée aux simulations numériques de l'extraction de l'eau a permis de reconnaître les secteurs offrant le meilleur potentiel d'exploitabilité du territoire (Savard et al, sous presse), la vallée de Saint-Hermas offrant un potentiel supérieur à la fois en quantité et en qualité.

L'échelle d'applicabilité des résultats obtenus pendant la caractérisation régionale était celle du 1/100000. Des questions requérant des informations à de plus fines échelles devraient donc exiger des études complémentaires, c'est le cas des thématiques abordées dans le présente rapport.

1.3 Sélection des secteurs restreints et des thématiques d'étude

Le projet d'hydrogéologie régionale aborde la problématique des ressources en eau souterraine du sud-ouest du Québec à l'échelle du 1/100000 (Savard et al., sous presse). Ainsi, pour compléter les connaissances du système aquifère en ce qui touche à des questions prioritaires, des études détaillées de secteurs plus restreints ont été effectuées. Les secteurs sélectionnés en collaboration avec les partenaires de la région sont soumis à une exploitation relativement intense de l'eau souterraine (figure 1.1). Les thématiques abordées touchent : 1) la caractérisation du comportement de la couche aquifère principale – les roches paléozoïques fracturées – sous l'effet de pompages de longue durée (section 2); 2) la problématique de la salinité de l'eau (section 3); 3) la question des conduits efficaces de l'eau dans l'aquifère régional (section 4); et 4) la protection d'ouvrages de captage de l'eau souterraine en conditions de confinement (section 5).

De plus, les études locales ont été structurées de manière à caractériser des unités rocheuses de différentes natures et distribuées dans divers secteurs de la large superficie de l'étude régionale : le calcaire du groupe de Chazy à Brownsburg-Chatham et à Sainte-Anne-des-Plaines, les grès du Groupe de Potsdam à Saint-Benoît, et la dolomie de la Formation de Beauharnois à Saint-Eustache et à Saint-Janvier (figure 1.1).

2. Étude détaillée d'un site sélectionné : Cas de la carrière de Chatham

Daniel Paradis, Nathalie Fagnan, René Therrien, Catherine Savard et Miroslav Nastev

2.1 Introduction

Un des objectifs du projet multi-institutionnel et multidisciplinaire sur le système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec est la caractérisation des propriétés hydrauliques des matériaux composant cet aquifère. Jusqu'à ce jour, aucune étude hydrogéologique détaillée sur cet aspect n'était disponible dans la MRC d'Argenteuil où la partie aquifère appartient principalement aux calcaires du Groupe de Chazy. Afin de combler ce manque, une étude locale a été entreprise à une carrière de Chatham (*MARELLAN*) à l'été 2000. Cinq puits d'observation ont été aménagés à proximité de la carrière afin d'effectuer différents relevés.

Le but de cette étude est de documenter le contexte physique et hydrogéologique de la région immédiate de la carrière ainsi que d'étudier la dynamique de l'écoulement de l'eau souterraine. Ce document pourra par la suite être utilisé comme base pour toutes autres études hydrogéologiques dans le secteur.

2.2 Contexte physique

2.2.1 Localisation, physiographie et hydrographie

La carrière étudiée est exploitée par la compagnie SINTRA et est située au 453 de la route 148 (route du Canton) dans la municipalité de canton de Chatham, dans la région du sud-ouest du Québec (figure 2.1). Cette localité fait partie de la municipalité régionale de comté (MRC) d'Argenteuil. À près de 15 km à l'ouest de Lachute, la carrière est accessible en prenant la route 148 en direction de Hull/Ottawa. La carrière exploite les calcaires du Groupe de Chazy sur une superficie d'environ 67 400 m² et sur une profondeur de 8 à 10 mètres sous la surface du sol. Le volume d'excavation est d'environ 606 600 m³. Lorsque la carrière est remplie d'eau, le fond de l'excavation, dans la partie la plus profonde, se trouve à moins de 2 mètres sous la surface de l'eau.

La carrière est située dans la région physiographique des Basses-Terres du Saint-Laurent, à mi-chemin entre la rivière des Outaouais et la région physiographique du Bouclier Canadien (figure 2.1). Le relief y est donc faiblement accidenté. La distance de la carrière à la rivière des Outaouais est d'environ 3,5 km.

La carrière étudiée se trouve dans le bassin hydrologique de la rivière des Outaouais (figure 2.2). La carrière est située entre les ruisseaux McVean et Crushing qui se jettent plus au sud dans la rivière des Outaouais. Ces cours d'eau à faible débit coulent sur les formations superficielles.

2.2.2 Données climatiques

La station météorologique la plus près de la carrière étudiée se trouve à Lachute. Des mesures journalières de températures et de précipitations en pluie, en neige et totales sont disponibles pour la période allant de 1970 à 1998 (figure 2.3). Les précipitations totales moyennes sont de 1123 mm/an et sont composées de 900 mm/an de pluie et 222 mm/an de neige. Notons que les précipitations de neige ont été converties en mm d'eau équivalent, soit 1 cm de neige pour 1 mm

de pluie. On observe aussi que les précipitations en pluie et totales augmentent depuis 1970 tandis que celles en neige diminuent.

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles pour la pluie, la neige et pour les précipitations totales pour la période de 1970 à 1998 suggèrent que les précipitations totales sont légèrement plus importantes en été et à l'automne (juin à novembre) (figure 2.4). Les précipitations totales moyennes mensuelles sont de 94 mm, soit 75 mm en pluie et 19 mm en neige.

2.3 Contexte géologique

2.3.1 Formations superficielles

Il y a très peu de dépôts de surface dans la région immédiate de la carrière étudiée. La carte des formations superficielles (Savard et al., sous presse) indique que les dépôts meubles ont généralement une épaisseur inférieure à 5 mètres. Ces formations d'âge Quaternaire sont constituées de till remanié reposant sur le socle rocheux qui affleure par endroit.

2.3.2 Socle rocheux

La carrière étudiée (*MARELLAN*) exploite des calcaires de l'Ordovicien moyen appartenant au Groupe de Chazy dans la province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent (Savard et al., sous presse). Le Groupe de Chazy repose en discordance sur le Groupe de Beekmantown (figure 2.5). Selon Salad-Hersi (communication personnelle), le contact entre le Groupe de Chazy et le Groupe de Beekmantown a été identifié dans le forage *00_SIN-F3* à environ 50 mètres sous la surface du sol.

Le groupe de Chazy, d'une puissance d'environ 100 mètres, est composé d'une seule formation, celle de Laval, elle-même constituée des membres de Sainte-Thérèse et de Beaconsfield. Le Membre de Sainte-Thérèse représente le grès de base, bioremanié, gris verdâtre et micacé, à matrice calcareuse, interstratifié avec des shales gris verdâtres. Le Membre de Beaconsfield est composé d'une calcilutite argileuse à brachiopodes qui devient de plus en plus dolomitique vers le sommet. Entre le Sainte-Thérèse et le Beaconsfield, on peut distinguer deux biozones à l'intérieur de la formation, soit la zone supérieure à *Rostricellula plena* et la zone inférieure à *Bolboporites americanus* (Globensky, 1987).

Une analyse de la fracturation a été réalisée pour déterminer le type et la géométrie du réseau de fractures de la carrière (Lemieux, 2000). Les différents relevés de linéations sur les parois et sur le fond de la carrière ont permis de mettre en évidence deux familles principales de fractures : N110° et N155°. La famille à N110° est beaucoup mieux développée et recoupe généralement toute la hauteur des parois de la carrière. L'espacement entre les fractures est de l'ordre d'un demi-mètre. L'examen visuel de ces fractures ne permet pas de révéler si ces fractures participent activement à l'écoulement de l'eau souterraine.

2.4 Contexte hydrogéologique

2.4.1 Unités hydrogéologiques

La séquence des unités hydrogéologiques dans le secteur de la carrière étudiée est constituée à la base par l'aquitard rocheux appartenant au Groupe de Beekmantown (figure 2.6). L'essai de perméabilités au puits 00_SIN-F3 (section 2.9.1) révèle que le roc du Groupe de Beekmantown est beaucoup moins perméable que celui du Groupe de Chazy.

Sus-jacent aux roches du Groupe de Beekmantown, nous retrouvons l'aquifère rocheux du Groupe de Chazy. Cette formation constitue la seule unité hydrogéologique aquifère de la carrière étudiée. Notons que l'aquifère rocheux du Groupe de Chazy est à nappe libre et qu'il est surmonté d'un till remanié dont l'épaisseur est généralement inférieure à 5 mètres (Ross et al., 2004). Dans certains secteurs le socle rocheux est affleurant et le till est absent. Même si le till est parfois plus perméable que le socle rocheux sous-jacent, cette unité n'est pas considérée comme un aquifère à cause de son caractère discontinu.

2.5 Recharge

Un bilan d'eau détaillé a été réalisé dans le secteur de la carrière étudiée pour la période de 1993 à 2000 (Hamel, 2002). L'objectif de ce bilan était d'évaluer l'infiltration moyenne pour tous les types de sol. Le bilan d'eau a été calculé selon l'équation [1]. Le ruissellement (R) et l'emmagasinement (Em) ont été évalués avec la méthode SCS (Steenhuis, 1995). Les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle ont été compilées à partir des enregistrements mensuels de la station météorologique de Lachute, tandis que l'évapotranspiration (ET) a été calculée à l'aide des courbes de Rochette (Rochette et al., 1989). Ainsi, le bilan d'eau pour ce secteur donne une infiltration moyenne de 195 mm/an pour la période de 1993 à 2000.

$$\text{Infiltration} = P - R - ET - Em \quad [1]$$

Les résultats de ce bilan d'eau détaillé concorde avec les mesures d'infiltration réalisées au site de «Montée Lavigne» à l'aide d'une case lysimétrique (Hamel, 2002). Cette case lysimétrique est aménagée dans un contexte similaire à celui du secteur de la carrière, à savoir une zone de recharge où le till repose sur le roc. Le site de «Montée Lavigne» est situé à environ 23 km à l'est de la carrière étudiée. L'infiltration totale mesurée pour l'année 2000 à ce site est de 218 mm.

2.6 Piézométrie et suivi piézométrique

La figure 2.7 présente la carte piézométrique de l'aquifère libre appartenant aux calcaires du Groupe de Chazy ainsi que les points de mesures utilisés pour la tracer. Les mesures d'élévation de la surface piézométrique ont été interpolées par krigeage. Un variogramme omnidirectionnel linéaire a été utilisé pour modéliser le variogramme expérimental. La carte présentée correspond à l'élévation de la surface piézométrique à l'été 1999, soit lorsqu'il n'y a pas de pompage. La piézométrie en pompage doit être similaire à celle de la figure 2.7, car la variation du niveau d'eau dans la carrière avant et après le pompage est de moins de 2 mètres. De plus, les rabattements mesurés dans les puits d'observation au cours de l'essai de pompage sont relativement faibles (voir section 2.9.2, figure 2.11).

De façon générale, l'écoulement de l'eau souterraine se fait des Laurentides vers la rivière des Outaouais. Cependant, une partie de cet écoulement est captée par la carrière étudiée. Cette portion d'eau captée définit l'aire d'alimentation de la carrière. La superficie de l'aire d'alimentation est d'environ 1,4 km², sa largeur maximale au niveau de la carrière est de moins de 600 mètres et son étendue en amont est de moins de 3 km.

À ce jour, aucun suivi de la surface piézométrique n'est disponible dans l'aire d'alimentation de la carrière. Ainsi, il n'est présentement pas possible de déterminer si la surface piézométrique est en progression ou en régression. Un suivi a donc été amorcé en janvier 2002 au puits d'observation 00_SIN-F3 afin de palier à ce manque.

2.7 Sources potentielles de contamination et qualité de l'eau souterraine

Aucune source potentielle de contamination de l'eau souterraine n'a été répertoriée dans le secteur de la carrière. La majorité du territoire est boisé et les zones à découvert sont des champs en friche ou en pâture. Seule la présence d'une voie ferrée en amont de la carrière représente un risque potentiel (figure 2.1).

Quelques échantillons composites d'eau souterraine ont été analysés et discutés dans le secteur de la carrière (Partie I – Section 3) (Tableau 1). Les résultats de ces analyses indiquent 4 dépassements du critère de qualité pour le fluor (F), 7 dépassements pour la dureté totale, 9 dépassements d'ordre esthétique pour le fer (Fe), les sulfates (SO₄), le soufre (HS) et les matières dissoutes totales (MDT). Ces dépassements semblent être reliés aux calcaires présents dans le secteur.

La qualité de l'eau souterraine est très variable dans le secteur de la carrière. Celle-ci va généralement de bonne à passable. Les types d'eau rencontrés vont des eaux bicarbonatées/calciques (Ca-HCO₃) et bicarbonatées/sodiques (Ca-HCO₃) à sulfatées/calciques (Ca-SO₄) et sulfatées/sodiques (Na-SO₄). Cette variabilité est expliquée par les différents types de dépôts rencontrés par l'eau de pluie avant d'atteindre l'aquifère.

2.8 Utilisation de l'eau souterraine

Le bilan de l'utilisation de l'eau souterraine est connu pour la municipalité de Brownsburg-Chatham pour la période 1998-2000 (figure 2.8). La consommation totale en eau souterraine pour ce secteur est de 33,7 x10⁴ m³/an. L'eau souterraine supporte principalement l'élevage du bétail et constitue 46,1% de la consommation totale. Cette consommation est estimée à partir du nombre d'animaux dénombrés dans les fiches d'enregistrement des exploitations agricoles du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) et de la consommation moyenne par type d'animaux.

Le pompage de la carrière compte pour 36,2% de la consommation totale. La quantité d'eau souterraine extraite de la carrière est évaluée selon le volume pompé à l'été 2000 et la fréquence d'assèchement de la carrière (environ une fois l'an). La consommation humaine par le biais de l'aqueduc compte pour 16,8% de la consommation totale. Cette valeur est la consommation mesurée pour l'année 1998 au puits de pompage de la municipalité de Chatham. Finalement, la consommation d'eau potable par le biais des puits domestiques représente seulement 0,9% de la

consommation totale. La consommation des puits domestiques est estimée selon une consommation moyenne de 336 l/jour par puits.

Si on compare la consommation totale d'eau souterraine pour tous les types d'utilisation par rapport au volume d'eau rechargé annuellement par l'infiltration des précipitations, l'aquifère du secteur de la carrière étudiée n'est pas soumis à une exploitation intensive. En effet, considérant que la recharge est de 200 mm/an (voir la section 2.5) sur une superficie de 139,6 km² (superficie de la municipalité de Brownsburg-Chatham), soit un volume d'eau rechargé de 27,9x10⁶ m³/an, la consommation totale de 33,7 x10⁴ m³/an représente seulement 1,2% de la recharge annuelle.

2.9 Propriétés hydrauliques

La majorité des puits existants dans le secteur de la carrière étant des puits domestiques, aucune mesure de perméabilité n'est disponible. C'est pourquoi, l'aménagement de 5 puits d'observation a été entrepris à l'été 2000. Treize essais à charge constante (Lugeon), 4 essais de perméabilité *in situ* et un essai de pompage ont été réalisés dans les puits 00_SIN-F1 à F5 (figure 2.9).

2.9.1 Essais à charge constante et de perméabilité *in situ*

Des essais à charge constante (Lugeon) avec obturateurs pneumatiques ont été réalisés au puits 00_SIN-F3 afin d'étudier la perméabilité du Groupe de Chazy en fonction de la profondeur dans la séquence rocheuse (figure 2.10). Treize intervalles contigus de 3,77 mètres ont été testés et interprétés par l'équation analytique de Thiém (Zeigler, 1976). Le profil obtenu indique clairement la présence de trois zones distinctes (figure 2.10). La première zone, comprise entre 12,42 et 35,04 mètres de profondeur, possède une conductivité hydraulique relativement homogène d'environ 1,5x10⁻⁸ m/s. La seconde zone, comprise entre 35,04 et 53,89 mètres, est caractérisée par une plus grande conductivité hydraulique allant jusqu'à 1,2x10⁻⁶ m/s. Ces valeurs plus élevées de conductivité hydraulique concordent avec la présence de fractures identifiées à la même profondeur lors du forage. Finalement, la troisième zone montre une diminution abrupte de la conductivité hydraulique, soit des valeurs plus petite que 10⁻⁹ et 10⁻¹⁰ m/s. Ce changement abrupt correspondrait au contact entre les unités du Groupe de Chazy et du Groupe de Beekmantown (Salad-Hersi, communication personnelle). La moyenne géométrique des intervalles testés, excluant ceux de la dernière zone, est de 1,7x10⁻⁷ m/s.

Des essais de perméabilité *in situ* ont aussi été réalisés dans les puits 00_SIN-F1 à F4. Ces essais ont été interprétés par la méthode de Bouwer et Rice (1976). La moyenne géométrique des conductivités hydrauliques pour les quatre puits testés est de 8,8x10⁻⁷ m/s (Tableau 2.2). L'analyse de la conductivité hydraulique en fonction de l'élévation de la base du forage semble indiquer que la conductivité hydraulique augmente avec la profondeur (Tableau 2.2). À noter que la moyenne arithmétique des 11 premiers intervalles testés par les essais Lugeon est inférieure d'un ordre de grandeur à la valeur obtenue par l'essai de perméabilité *in situ* au puits 00_SIN-F3. Ceci est expliqué par le fait que ces deux types d'essais sollicitent des sections différentes.

2.9.2 Essai de pompage

Lors de l'été 2000, la carrière a été asséchée pour permettre son exploitation, l'eau résiduelle au fond de la carrière formant une couche de 1 à 5 mètres d'épaisseur. Ainsi, la carrière peut être représentée tel un puits de pompage. Les suivis des niveaux d'eau et des puits d'observations aménagés à proximité de la carrière (00_SIN-F1 à F5) ont été réalisés pour simuler un essai de

pompage. La mesure des niveaux d'eau de même que la mesure du débit d'assèchement de la carrière ont été réalisés du 11 mai au 6 juin 2000 (figure 2.11). Notons que le débit de pompage n'a pu être maintenu constant durant le pompage à cause des différents problèmes techniques reliés aux pompes.

L'essai de pompage a été interprété par la méthode de Birsoy et Summers (1980). Cette méthode analytique est utilisée lorsque le débit de pompage est variable ou intermittent. Le principe de superposition de l'approximation de Jacob pour l'équation de Theis est appliqué pour dériver une expression du rabattement en fonction du temps.

Les valeurs de conductivité obtenues par la méthode de Birsoy-Summers sont présentées au Tableau 2.3. Les critères de validité, définissant la durée minimale d'un essai pour être valide, sont aussi présentés pour chacun des puits. Les valeurs calculées du critère de validité pour chacun des puits indique que la durée de l'essai (16 000 minutes) n'est pas assez longue pour permettre une interprétation adéquate. De plus, les valeurs de conductivité hydraulique obtenues semblent très élevées pour le type de formation géologique testé (calcaires fracturés).

L'analyse du rabattement en fonction de la distance des puits d'observation au point de pompage de la carrière montre qu'il n'existe pas de relation linéaire entre ces 2 paramètres (figure 2.12a). Cependant, l'analyse des rabattements aux différents puits d'observation semble indiquer que l'écoulement est régi par un système de fractures verticales en contact avec le point de pompage. En effet, le rabattement aux puits *00_SIN-F1* et *00_SIN-F2*, qui sont respectivement à 10 et 100 mètres du point de pompage, ont le même rabattement. Ainsi, nous pouvons penser que le réseau de fractures se trouve à égale distance de ces deux derniers puits (figure 2.9). L'orientation de ce réseau serait N50°. Un graphique du rabattement en fonction de la distance des puits à ce réseau de fractures, indique maintenant une relation linéaire (figure 2.12b).

Notons que le réseau de fractures identifié précédemment n'est pas dans la direction des deux familles principales de fractures, soit N110° et N150°. L'hypothèse que ce réseau de fractures a été formé par le dynamitage de la carrière est plausible. En effet, l'orientation et la position du réseau déduit correspond exactement à l'emplacement de la rampe d'accès de la carrière (figure 2.9). La présence d'une faille régionale probable, identifiée sur la carte géologique demeure aussi une explication envisageable (figure H R-2.1).

2.10 Modélisation numérique

La modélisation numérique a été effectuée à l'échelle de la carrière afin de reproduire l'essai de pompage décrit à la section 2.9.2. Le but de cet exercice est de valider le modèle conceptuel déduit des différents travaux de terrain. Ceci permettra de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur de la carrière d'intérêt.

2.10.1 Conception du modèle numérique

Le programme retenu pour la modélisation est FRAC3DVS (Therrien et Sudicky, 1996). FRAC3DVS est un modèle en éléments finis à saturation variable. Ce programme a été choisi parce qu'il permet de représenter explicitement les fractures et les puits. Plus particulièrement, les fractures sont intégrées dans le modèle numérique par superposition d'éléments planaires bi-dimensionnels représentant les plans de fracture au maillage principal généralement composé de

prismes rectangulaires tri-dimensionnels. Les détails concernant les équations d'états et les méthodes numériques utilisés par le modèle sont présentés dans Therrien et Sudicky (1996).

L'aquifère modélisé est celui des calcaires du groupe de Chazy. La courbe de capillarité (pression en fonction de la saturation) de ce matériau a été tirée d'une roche sédimentaire de conductivité hydraulique similaire, soit la dolomie de « Rainbow Lake » (Wardlaw et McKellar, 1981) (figure 2.13a). La courbe de perméabilité relative des calcaires du Groupe de Chazy a été obtenue par le modèle de Mualem (1976) à partir de la courbe de capillarité précédente (figure 2.13b). La conductivité hydraulique de $8,8 \times 10^{-7}$ m/s attribuée aux roches du Groupe de Chazy correspond à la moyenne géométrique des essais de perméabilité *in situ* réalisés dans les puits 00_SIN-F1 à F4 (voir la section 2.9.1). Une porosité totale de 10,4% provenant de la valeur mesurée pour la dolomie de « Rainbow Lake » par Wardlaw et McKellar (1981) a été attribuée aux roches du Groupe de Chazy. Notons que les formations quaternaires superficielles ont été négligées vu leur faible épaisseur saturée.

La base de l'aquifère correspond au contact entre le Groupe de Chazy et celui du Beekmantown. L'élévation de ce contact a été fixée à 42 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer. Les limites latérales du modèle ont été définies à partir de la carte piézométrique (figure 2.14). Les limites nord et sud correspondent respectivement aux isopièzes de 88 et 76 mètres. Les limites est et ouest sont des limites à flux nul correspondant à des lignes d'écoulement. Dû au fait que la carte piézométrique représente les conditions d'étiage de l'été 1999 et que l'essai de pompage a été réalisé à la période de crue du printemps 2000, les charges des limites nord et sud ont été augmentées à 90.75 et 78.75 mètres au cours du calage afin que le niveau d'eau dans la carrière calculé par le modèle numérique soit sensiblement le même que celui mesuré au début de l'essai de pompage.

Le modèle numérique construit est du type «pseudo saturation variable». Ce terme signifie que l'écoulement est résolu par un modèle à saturation variable, mais que la zone vadose est discrétisée grossièrement dans le seul but de simuler la position de la nappe libre (Beckers et Frind, 2000). Le maillage horizontal est composé de 2849 éléments triangulaires de dimension allant de 5 mètres autour des puits 00_SIN-F1 et F-2 jusqu'à 200 mètres aux limites du modèle (figure 2.14). Le maillage tridimensionnel comprend deux couches, soit la zone saturée et la zone vadose. La zone vadose comprend une seule couche tandis que la zone saturée est subdivisée en cinq sous couches. Pour tenir compte de l'effet de la masse d'eau libre présente dans la carrière, celle-ci a été intégrée dans le modèle numérique comme un matériel géologique très perméable avec une porosité de 100%. Le maillage tridimensionnel final comprends 17 094 éléments prismatiques (figure 2.15).

Les puits d'observation 00-SIN-F1 à F5 ont été modélisés comme des conduites verticales avec des conductivités hydrauliques horizontales et verticales de 0.0047 m/s tel que déterminé par l'équation de Poiseuille (de Marsily, 1986).

2.11 Simulations

La simulation de l'essai de pompage a été réalisée en régime transitoire avec une charge hydraulique variable dans le temps pour les nœuds représentant l'eau de la carrière. Les charges imposées correspondent à celles mesurées au cours de l'essai de pompage. Les conditions

initiales de la simulation transitoire sont les charges hydrostatiques obtenues à partir d'une simulation en régime permanent. La période de simulation présentée est de 26 jours, soit du 11 mai au 6 juin 2000.

Le calage du modèle est réalisé à l'aide des courbes de rabattement des puits 00_SIN-F1 à F5. Pour chaque puits d'observation, la justesse du calage entre les rabattements mesurés et ceux calculés par le modèle numérique est donnée par l'erreur absolue. Cette erreur est définie comme la somme des différences absolues des valeurs mesurées et calculées pour chaque pas de temps.

Le calage du modèle a été effectué en complexifiant le modèle conceptuel de base décrit à la section 6.1. Ce modèle de base correspond à un aquifère poreux équivalent (sans fractures) et sans infiltration verticale. L'évolution de l'erreur absolue en fonction des différents modèles conceptuels testés mérite ici d'être considérée (figure 2.16). La somme des erreurs absolues (SEA) pour les cinq puits d'observation du modèle de base est de 1.637 mètres.

L'ajout d'un plan de fracture unique et de longueur finie coupant l'aquifère à la verticale selon une orientation N50°, tel que discuté à la section 2.9.2 et présenté à la figure 2.11, permet de diminuer la SEA à 1.164 mètres. Ce réseau de fractures a été modélisé en supposant une analogie avec un aquifère confiné (Lapcevic et al., 1993). La conductivité hydraulique du réseau de fractures, pour une ouverture de 5 mm, est de $1,36 \times 10^{-5}$ m/s (Bear, 1972).

Un flux semblable au patron des précipitations a par la suite été ajouté au modèle pour représenter la recharge (figure 2.17). L'ordre de grandeur du flux a été calé avec les variations du niveau piézométrique au puits 00_SIN-F4. On remarque que ce flux représente une fraction des précipitations. Ceci peut être expliqué par la capacité d'infiltration du roc et l'intensité des précipitations. Notons aussi que le délai d'infiltration de la pluie du sol jusqu'à l'aquifère par la zone non-saturée semble être très court, soit moins d'une journée. L'ajout d'un flux de recharge variable permet de diminuer la SEA à 1.029 mètres.

Ensuite, les variations de niveaux piézométriques au puits 00_SIN-F5 ont été modélisées par l'injection d'un volume d'eau représentant une infiltration préférentielle à même le puits 00_SIN-F5. Le volume injecté (infiltration préférentielle) suit le patron des précipitations en pluie et sa magnitude, convertie en flux, est du même ordre de grandeur que l'intensité des précipitations (figure 2.17). L'explication de cette infiltration n'est pas bien connue. Il est probable que le puits a été mal scellé ou que le puits ait été aménagé dans une fracture verticale en contact avec la surface du sol et favorisant ainsi une réponse quasi instantanée de la charge hydraulique aux précipitations. L'ajout de l'infiltration préférentielle au modèle conceptuel donne maintenant une SAE de 0.509 mètre.

Finalement, les valeurs de conductivité hydraulique, de porosité totale, de recharge et d'ouverture du réseau de fractures ont systématiquement été modifiées et simulées à tour de rôle. Suite à cette analyse de sensibilité, il apparaît qu'une porosité totale de 5% donne un meilleur ajustement des courbes de rabattement pour le puits 00_SIN-F5. La SEA passe ainsi à 0.309 mètre. La correspondance entre les courbes de rabattement observées en fonction du temps pour les puits d'observation et les meilleurs résultats simulés est excellente (figure 2.18). À noter que les meilleures simulations impliquent un réseau de fractures, une recharge et une infiltration préférentielle variable dans le temps, et une porosité totale de 5%.

2.12 Conclusion

Bien qu'il n'existe pas de suivi dans le secteur de la carrière étudiée à Chatham pour indiquer le niveau des réserves d'eau souterraine, il semble que ces dernières ne soient pas menacées au point de vue quantitatif. En effet, le bilan de l'utilisation de l'eau souterraine pour la municipalité de Brownsburg-Chatham indique qu'un peu plus de 1% de la recharge s'infiltrant annuellement est utilisée. De plus, la recharge dans les zones de till et de calcaires affleurant est relativement importante, soit d'environ 200 mm/an.

Cependant, le délai entre les précipitations et la réponse de l'aquifère indique que celui-ci est très vulnérable à la contamination à partir de la surface. Étant donné l'état de fracturation des calcaires du Groupe de Chazy, l'infiltration vers la nappe phréatique se fait directement par les fractures verticales ouvertes à la surface du sol. Le secteur de la carrière de même que les zones de till et de calcaires affleurants doivent donc être protégés d'autant plus que la qualité naturelle de l'eau souterraine y est variable, de bonne à passable selon les secteurs.

Les résultats de nos essais montrent que la conductivité hydraulique augmente avec la profondeur jusqu'au contact entre les calcaires du Groupe de Chazy et les dolomies du Groupe de Beekmantown. La zone inférieure du Groupe de Chazy serait alors plus favorable à l'exploitation que sa partie supérieure. Cette zone pourrait correspondre au Membre de Sainte-Thérèse. Si tel était le cas, la composition des matériaux géologiques serait plus importante pour décrire l'écoulement que l'augmentation de la fracturation avec l'élévation, tel que suggérée par Nastev et al. (2001) pour l'ensemble des 1500 km² du large territoire d'étude du projet de caractérisation régionale ou l'augmentation des contraintes avec la profondeur suggérée par Lemieux et al. (2001). Notons toutefois que ces conclusions ne sont sans doute valables que pour le Groupe de Chazy qui affleure sur une superficie restreinte du territoire d'étude du projet de CARACTÉRISATION RÉGIONALE et qu'une étude plus approfondie serait nécessaire pour pousser cette interprétation. De plus, même si la partie inférieure des calcaires du Groupe de Chazy est plus perméable que la partie supérieure, cette partie ne constitue pas une zone de grande perméabilité.

Finalement, suite aux résultats des simulations numériques, nous avons mis en lumière que la dynamique de l'écoulement de l'eau souterraine ne peut être expliquée par un modèle poreux équivalent à l'échelle de la carrière. Nous avons montré que la présence d'un réseau de fractures de conductivité hydraulique importante permet de mieux expliquer les courbes de rabattement des puits d'observation. La recherche de l'origine et de l'étendue de ce réseau de fractures nécessiterait une étude à plus grande échelle. S'il s'agit d'une faille régionale, telle que suggérée sur la carte géologique, celle-ci pourrait présenter un bon potentiel aquifère pour le secteur.

2.13 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes pour leur collaboration dans la réalisation de cette étude: Réal Labarre, Julie Bazinet et Gilles Théberge pour l'accès aux installations et les droits d'accès à la carrière MARELLAN de Chatham.

3. Étude détaillée d'un site sélectionné: Cas du secteur de Saint-Benoît

Édith Bourque, Miroslav Nastev et Daniel Paradis

3.1 Introduction

3.1.1 Problématique

Le secteur de Saint-Benoît est approvisionné en eau potable principalement par un ouvrage de captage d'eau de surface situé dans les collines d'Oka. Un puits de pompage d'eau souterraine aménagé en bordure du Rang Grand Brûlé (PE-1/87), au nord du village, permet de répondre à l'augmentation de la demande en eau surtout pour la période de mai à décembre. En 1999, l'approvisionnement en eau potable provenait à 82% de l'eau de surface captée dans les collines d'Oka et à 18% de l'eau souterraine pompée au puits.

Dans ce secteur une contamination naturelle par de l'eau souterraine saline a été identifiée depuis longtemps par les propriétaires de puits privés et lors d'études de recherche en eau effectuées dans le secteur par des firmes de consultants (Hydrogéologie-Canada, 1988). La ville de Mirabel trouve donc difficilement de l'eau souterraine de bonne qualité et en quantité suffisante pour approvisionner la population du secteur.

La demande en eau potable augmente et continuera à croître selon les prévisions des responsables de l'approvisionnement en eau potable de la Ville de Mirabel. La quantité d'eau de surface disponible est limitée et a été particulièrement faible lors de l'été 2001. Par ailleurs, une étude faite par Hydrogéologie-Canada (1988) prédisait une diminution potentielle de la qualité de l'eau si l'aquifère était surpompe. On recommandait de limiter le débit de pompage. Afin de conserver une bonne qualité d'eau, la municipalité limite donc le pompage du puits PE-1/87 à environ 160 m³/j (35000 gimp/jour). Pour toutes ces raisons, il a été jugé prioritaire de bien connaître les conditions hydrogéologiques qui prévalent dans le secteur de Saint-Benoît. La présente étude locale a donc été réalisée en collaboration avec la Ville de Mirabel.

3.1.2 Objectifs de l'étude

L'objectif de la présente étude est de caractériser la formation aquifère exploitée par la ville de Mirabel pour approvisionner en eau potable la population du secteur de Saint-Benoît. L'objectif spécifique étant d'évaluer la possibilité de trouver de l'eau de bonne qualité, ne nécessitant aucun traitement, et en quantité suffisante pour répondre aux besoins à venir de la population du secteur de Saint-Benoît. En termes quantitatifs, on estime qu'il faut fournir un débit moyen et soutenable de 360 m³/j (80000 gimp/jour). La réalisation de cet objectif est basée sur les résultats de la modélisation numérique, elle-même appuyant sur deux essais de pompage. Un deuxième objectif de l'étude est d'évaluer la qualité de l'eau souterraine du secteur relativement à la problématique de salinité de l'eau.

3.2 Contexte physique

3.2.1 Localisation et physiographie

Le secteur de Saint-Benoît fait partie de la Ville de Mirabel et se situe au sud de l'aéroport international de Mirabel et au nord des collines d'Oka. La recherche en eau a été faite dans le secteur du puits PE-1/87 utilisé pour l'approvisionnement en eau potable dans la partie nord du

secteur, entre le Rang Saint-Étienne et la Côte Saint-Vincent, en bordure du Rang Grand Brûlé. Les puits forés ont été réalisés dans un rayon de 600 m du puits de pompage PE-1/87 de la ville (figure 3.1). Le relief est plat dans le secteur (élévation moyenne de 50 m) et s'accroît au nord, où l'élévation de la Côte Saint-Vincent est de 60 m. Au sud, les Collines d'Oka atteignent 250 m. Les activités agricoles prédominent dans ce secteur.

Le secteur à l'étude est drainé vers l'est par le Ruisseau Levert-Cardinal, qui se jette dans la Petite Rivière. La Petite Rivière se déverse à son tour dans la Rivière du Chêne pour finalement rejoindre la Rivière des Mille-Îles.

Les précipitations annuelles moyennes pour le secteur sont évaluées à 1047 mm par an (Hamel, 2002). De ces précipitations, 232 mm (équivalent en eau) apparaissent sous forme de neige. La température moyenne annuelle entre 1970-1998 a été de 6,1 °C.

3.2.2 Contexte géologique

Géologie des roches paléozoïques

Du point de vue géologique, le secteur est composé de roches sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent. On retrouve des grès du groupe de Potsdam: des formations Cairnside dans la partie nord et Covey Hill au sud (figure 3.1). Ces grès reposent sur le socle précambrien (gneiss). Au sud, les collines d'Oka sont constituées de roches précambriennes et d'intrusions du Crétacé.

Dépôts quaternaires

Une carte des formations superficielles est présentée à la figure 3.2. Des processus fluviaux et marins sont à l'origine des structures sédimentaires présentes. Une formation argileuse déposée par la mer de Champlain, d'une épaisseur moyenne de 20 m, couvre la majeure partie du secteur étudié. Plus au nord, à la Côte Saint-Vincent, l'argile est absente et le till, dont l'épaisseur varie entre 5 et 25 m, est exposé. Ce till, d'une granulométrie très variable, constituerait l'unité perméable qui agirait comme zone de recharge de l'aquifère exploité. À la base de la séquence de till, on retrouve souvent une couche relativement mince (quelques mètres) de sable et gravier. Très localement, une mince couche de sable alluvionnaire repose sur le till. Dans le secteur à l'étude, les sédiments ont une épaisseur moyenne de 20 à 30 m. Plus au sud, les sédiments y atteignent une épaisseur de plus de 100 m.

3.3 Contexte hydrogéologique

3.3.1 Description des unités hydrogéologiques

Les données existantes et celles collectées lors de la campagne de forages effectuée en février/mars 2000 ont permis de bien définir le contexte hydrogéologique du secteur à l'étude. Neuf forages ont été réalisés à l'aide d'une foreuse marteau fond de trou; cinq d'entre eux ont été aménagés en puits d'observation. Un forage supplémentaire (F5) a quant à lui été foré à l'aide d'une foreuse à diamant (7,6 cm de diamètre). Les forages ont été réalisés afin de rechercher de l'eau et d'installer des puits d'observation qui seraient utilisés pour faire le suivi des niveaux d'eau durant les essais de pompage prévus. Les descriptions des forages sont données au Tableau 3.1. Les puits d'observation portent une numérotation P si la partie crépinée du puits intercepte les dépôts granulaires et/ou le contact entre les dépôts granulaires et la roche en place, tandis que F désigne les puits qui interceptent des grès fracturés.

Tous les forages étaient arrêtés après avoir atteint la limite supérieure des roches paléozoïques (à moins de 5 m), à l'exception de F1, F2 et F4 qui l'ont traversé sur une profondeur de 52, 16 et 76 m, respectivement. L'information relative aux forages et à l'aménagement des piézomètres est résumée au Tableau 3.1, sauf pour F5. Ce dernier a été effectué à environ 2 m de distance de F4: leur description stratigraphique est donc identique. Lors du forage F5, des échantillons de sédiments ont été prélevés. Il a atteint une profondeur de 27 m. Le till serait constitué de plusieurs lits diamictiques séparés par des interlits de sable et gravier et des niveaux riches en blocs (Ross, 2001). De plus, des échantillons d'argile prélevés lors du forage F5 ont été utilisés pour en extraire de l'eau pour analyse subséquente. Ces analyses sont faites afin de vérifier leur salinité et pour la mettre en relation avec la problématique identifiée dans le secteur.

Des coupes stratigraphiques (NS, OE et NO-SE) sont présentées à la figure 3.3 à partir des descriptions des 9 forages réalisés dans le cadre du projet de caractérisation régionale et du forage du puits municipal PE-1/87 et de son puits d'observation P0 à une distance de 5.4 m. A la coupe A-A', on remarque que l'épaisseur du till de même que la profondeur du sommet de la séquence rocheuse augmentent vers l'est. De plus, c'est au puits municipal PE-1/87 que l'épaisseur de sable et gravier est la plus importante. En effet, 6 m de sable et gravier mélangés de silt ont été rencontrés. L'épaisseur plus importante de matériaux perméables pourrait n'être que locale puisque seulement 1.3 m de sable et gravier ont été rencontrés lors du forage du puits P1 situé à moins de 50 m du puits PE-1/87.

L'aquifère exploité est en condition de nappe captive, et des conditions artésiennes ont même été observées au puits F1 au printemps 2000, lors de la fonte des neiges, soit lors de la période de recharge la plus importante.

Ainsi, de façon générale, une couche de sable et gravier fluvio-glaciaire recouvrirait le roc de façon discontinue. Il s'agit plus probablement de sédiments mis en place dans des conduits sous-glaciaires lorsque le drainage a complètement érodé les dépôts glaciaires mis en place précédemment. Ces conduits sous-glaciaires se trouvent souvent dans des dépressions rocheuses et sont parallèles à l'axe des vallées enfouies. Leur épaisseur est habituellement de l'ordre de quelques mètres. En bordure des dépressions rocheuses, cette séquence grossière devient des tills ayant une matrice plus fine. Le roc pourrait être fracturé en surface et constituer une zone plus perméable connectée hydrauliquement avec l'unité de sable et gravier. Dans le texte suivant ces deux unités seront référées comme unité mixte. Le principal aquifère pourrait donc être à la fois constitué des couches de sable et gravier et des roches plus fracturées en surface. Cette unité perméable (aquifère) est recouvert de till qui a une épaisseur variant entre 2 à 10 m, qui à son tour est recouvert d'une couche d'argile de 20 m d'épaisseur en moyenne. Des interlits de till plus perméables ont été rencontrés en cours de forage. L'unité d'argile constitue un aquitard.

3.3.2 *Toit de l'aquifère*

Étant donné l'épaisseur relativement faible de la couche de sable et gravier et sa discontinuité, le toit de l'aquifère correspond plus ou moins à la topographie de la séquence de roches fracturées (figure 3.4). On remarque que la topographie du roc est très différente de celle du terrain. Deux dépressions rocheuses majeures peuvent être notées au sud-ouest du village de Saint-Benoît. La surface des roches fracturées dans les points les plus bas se situe à -100 m d'altitude. L'aquifère se trouverait donc à 100 m plus bas que le niveau de la mer. L'orientation de ces vallées rocheuses est sud-ouest/nord-est, ce qui coïncide avec la direction des principales structures

régionales (plis et failles; Savard et al., sous presse). Ici, le socle rocheux a été érodé par l'écoulement dans les anciens réseaux de cours d'eau et les systèmes de drainage sous-glaciaire. À l'endroit du puits de pompage PE-1/87, l'épaisseur des dépôts superficiels est d'environ 20 m et l'aquifère se situe à 30 m d'altitude.

3.3.3 Piézométrie

La carte piézométrique montre la direction d'écoulement de l'eau souterraine à l'aide de flèches (figure 3.5). Le patron d'écoulement de l'eau souterraine indique que l'eau souterraine proviendrait de la Côte Saint-Vincent et s'écoulerait vers le sud-est puis vers l'est. Cette carte piézométrique est représentative des conditions statiques au puits municipal (sans pompage) puisque les élévations de la nappe ont été mesurées au début de mai 2000, alors que la station de pompage n'était pas en fonction.

3.3.4 Utilisation de l'eau souterraine dans le secteur et sources potentielles de contamination

La seule utilisation de l'eau souterraine dans la zone à l'étude actuellement correspond à l'approvisionnement de la municipalité de Saint-Benoît. Le volume d'eau pompée exprimé en production journalière annuelle moyenne au puits municipal a été de 88,4 m³/j (20000 gimp/jour) en 1999 (figure 3.6). Pour la même année, le volume d'eau de surface provenant des collines d'Oka et utilisé comme source d'eau potable était de 405 m³/j (90000 gimp/jour). La population desservie était estimée à 1050 personnes (375 résidences, 14 commerces, 6 industries) en 1999 (données fournies par la ville de Mirabel).

La principale source potentielle de contamination anthropique identifiée dans le secteur est reliée aux activités agricoles, soit à la culture de céréales qui y prend place. Des sels déglaçants peuvent également être épandus occasionnellement à l'intérieur de la zone à l'étude selon des informations fournies par un responsable de la ville.

3.4 Qualité de l'eau souterraine

3.4.1 Analyses chimiques

Des échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans les puits situés dans la zone d'étude. Les principaux résultats d'analyses chimiques de même que des critères de qualité d'eau, sont présentés dans le Tableau 3.2. La carte géochimique des concentrations de chlorures a été réalisée afin de visualiser les variations locales (figure 3.7). Cette carte comprend également les résultats d'analyses fournis par la Ville de Mirabel et les résultats de l'échantillonnage régional (Savard et al., 2002) qui sont présentés. Les chlorures qui peuvent être caractéristiques d'eaux salines marines sont présents en concentrations plus élevées au sud de la Côte Saint-Vincent. Sur la Côte Saint-Vincent, qui représente une zone de recharge pour le secteur, ces concentrations sont minimales. En effet, la moyenne des concentrations en chlorures des 5 puits au roc localisés sur la Côte Saint-Vincent est de 9 mg/L. Dans la zone près du puits municipal, les chlorures sont en concentrations généralement inférieures aux critères de qualité de 250 mg/L. L'exception est le puits P2 où une concentration de 1900 mg/L a été mesurée. La crépine de ce puits intercepte une formation peu perméable (argile) d'où pourrait provenir cette concentration (voir section 3.4.4). Enfin, le puits au roc FROMA1 (figure 3.7) montre la concentration en chlorures la plus élevée de la région, soit 6500 mg/L.

3.4.2 *Qualité de l'eau souterraine dans le roc fracturé*

Des analyses physico-chimiques ont aussi été réalisées sur des échantillons d'eau souterraine prélevés à différentes profondeurs de roc fracturé dans le puits F4 (Tableau 3.3). Ces échantillons ont été prélevés en prenant soin d'isoler des sections à l'aide d'obturateurs pneumatiques afin qu'ils soient représentatifs d'une certaine profondeur. En tout, 5 sections ont été isolées et échantillonnées. La variation verticale des concentrations de la majorité des paramètres est très peu variable. Le pH et l'oxygène dissous diminuent à partir du deuxième niveau jusqu'au cinquième niveau, alors que le Ca et le Mg diminuent du premier niveau jusqu'au quatrième niveau. Ces valeurs plus élevées pourraient indiquer que les 2 premiers niveaux sont plus actifs du côté de l'écoulement souterrain que les niveaux inférieurs. Enfin, la concentration pour l'isotope du tritium analysée au niveau 3 (profondeur de 64 m) est plus petite que 0.8 unités tritium. L'absence de tritium à une telle profondeur implique que l'eau souterraine à cette profondeur est antérieure à 1952 (Clark et Fritz, 1997). Une analyse approfondie des données de radiocarbone (^{14}C) pour les puits F4, FROMA1 et pour un puits de la Côte Saint-Vincent pourrait donner éventuellement des informations sur l'âge de l'eau souterraine dans le secteur, et ainsi nous aider à mieux comprendre la dynamique de l'écoulement.

3.4.3 *Évolution de la qualité de l'eau souterraine lors des essais de pompage*

Dû au problème de salinité, le débit de pompage au puits PE-1/87 est limité par les responsables du puits municipal. Des échantillons d'eau prélevés au cours des deux essais de pompage réalisés en mai 2000 au puits PE-1/87, et en août 2000, au puits F3, ont confirmé le lien entre l'augmentation du pompage et l'augmentation de la conductivité électrique de l'eau. Les concentrations en fer, manganèse et chlorures, et la dureté totale augmentent au cours du pompage (Tableau 3.4). Le critère de qualité esthétique de l'eau potable pour le Mn de 0,05 mg/L est même dépassé largement dans le puits F3 (SCFP, 2001).

Les concentrations des éléments tels Cl, Na, Br augmentent avec la profondeur alors que les concentrations en Ca diminuent (Tableau 3.5). À la profondeur de 14.5 m, les concentrations en Cl, Na et Br sont environ 3 fois plus élevées que celles de l'eau prélevée dans le puits F4 (Tableau 3.3) situé à environ 2 m du puits F5.

3.4.4 *Qualité de l'eau interstitielle des argiles*

L'étude géochimique de l'eau interstitielle des argiles de l'aquitard permet d'aborder la question de la source de salinité de l'aquifère de Saint-Benoît. Cinq échantillons d'argile prélevés au cours du forage du puits F-5 à des profondeurs différentes ont été utilisés pour en extraire l'eau interstitielle. Ces échantillons d'eau ont par la suite été analysés afin de mesurer les concentrations des éléments majeurs de même que le pH et la conductivité électrique (Beaubien, 2001).

3.4.5 *Origine de la salinité de l'eau souterraine*

Selon les résultats des analyses chimiques effectuées sur des échantillons d'eau souterraine prélevés dans des puits interceptant la nappe captive (FROMA1, PLA2, BEN1, F4, et BEN4, voir figure 3.7), l'eau souterraine du secteur de la région de Saint-Benoît est caractérisée par des salinités élevées. Ce secteur est dominé par le type d'eau souterraine Na-Cl, et on y trouve de l'eau ayant la concentration en matières dissoutes totales (MDT) calculée la plus élevée dans le cadre du projet de caractérisation régionale (site FROMA1: concentration en MDT, exprimée en salinité, de 11,4 g/L). La figure 3.8 montre la position des échantillons d'eau souterraine sur un

diagramme Piper (Piper, 1944). Les échantillons se séparent en deux zones dans le losange du diagramme:

- les échantillons du secteur en conditions de nappe libre (Côte Saint-Vincent) sont regroupés dans la zone Ca-Mg-HCO₃, caractéristique d'une eau nouvellement rechargée, et
- les échantillons du secteur en conditions de nappe captive sont regroupés dans la zone Na-Cl.

Le diagramme montre un alignement des échantillons du secteur en conditions de nappe captive, de la plus faible concentration en MDT (F4) à la plus élevée (FROMA1). Ce dernier échantillon, FROMA1, est localisé près du champ de la composition chimique de l'eau de mer. Puisque la Mer de Champlain a occupé la région durant le Pléistocène, une composante marine pourrait être la source de la salinité du secteur.

Cloutier et al. (2001) proposent un modèle pour expliquer l'origine de la salinité. Ce modèle utilise les ions conservateurs Cl⁻ et Br⁻ comme traceurs non réactifs afin d'identifier la composante marine dans les échantillons. Le Tableau 3.6 compare le ratio molaire Cl⁻/Br⁻ entre l'eau de mer et les échantillons du secteur en conditions de nappe captive de la région de Saint-Benoît. Le ratio Cl⁻/Br⁻ des échantillons FROMA1, PLA2, BEN4, et BEN1, est comparable au ratio Cl⁻/Br⁻ de l'eau de mer. L'accord entre le ratio Cl⁻/Br⁻ diminue pour l'échantillon qui a la plus faible salinité (F4).

Le Tableau 3.7 compare les concentrations en Cl⁻ et de Br⁻ de l'eau de mer et de l'échantillon FROMA1. En supposant que l'échantillon FROMA1 est le pôle salin d'origine du secteur, les traceurs conservateurs peuvent être utilisés pour déterminer le pourcentage d'eau de mer présent dans l'eau d'origine. Les ratios FROMA1/Eau de mer calculés au Tableau 3.7 indiquent que l'eau d'origine serait un mélange d'environ 35% d'eau de mer et de 65% d'eau douce.

Les diagrammes Br⁻ versus Cl⁻ (figures 3.9a et 3.9b) permettent d'expliquer, en deux étapes, le modèle sur l'origine de la salinité. La première étape (figure 3.9a) est la dilution de l'eau de la Mer de Champlain avec de l'eau de fonte glaciaire et de l'eau météorique Pléistocène. Cette dilution est responsable de la composition chimique de FROMA1 (ratio de 35% eau de la mer Champlain et 65% eau de fonte glaciaire et eau météorique Pléistocène). La deuxième étape (figure 3.9b) est le mélange entre l'eau météorique moderne (échantillons du secteur en conditions de nappe libre de la Côte Saint-Vincent) et la source saline d'origine Pléistocène (FROMA1). L'échantillon FROMA1 et les échantillons de la Côte Saint-Vincent forment les deux pôles du modèle de mélange, et les échantillons du secteur en conditions de nappe captive de la région de Saint-Benoît se situent sur la ligne de mélange.

3.4.6 Profil vertical de la salinité

Les résultats dans les sections précédentes nous permettent d'établir l'hypothèse que la salinité ou les concentrations en chlorures, indicateurs de la salinité de l'eau souterraine, sont inversement proportionnelles à la conductivité hydraulique des formations géologiques. Ainsi, les concentrations en chlorures seraient plus élevées dans les argiles caractérisées par une conductivité hydraulique faible; suivent les grès fracturés; tandis qu'elles sont plus petites dans la formation aquifère - l'unité mixte composée de roches très fracturées et de sable-gravier, au

sommet de la séquence rocheuse. Il est à noter que l'unité mixte n'est pas toujours présente. Le profil vertical des concentrations en chlorures présenté à la figure 3.10 confirme cette hypothèse pour le secteur à proximité du puits PE-1/87. Les résultats pour l'argile proviennent du forage F5, pour l'unité mixte du puits de pompage PE-1/87, et ceux pour les grès du puits F4.

Effectivement, lors du recul de la Mer de Champlain il y a environ 12000 ans, de l'eau d'une salinité élevée (mélange de l'eau de la mer et celle de la fonte glaciaire) aurait été piégée dans les pores et les fractures des formations géologiques en place. Avec les cycles répétitifs de recharge et d'écoulement souterrain cette eau a été diluée par de l'eau fraîche provenant des infiltrations des précipitations (eau météorique). Le taux d'écoulement souterrain, étant fonction de la conductivité et des gradients hydrauliques, a contribué à un déplacement presque complet de l'eau saline des formations aquifères les plus perméables (unité mixte, roches plus fracturées). Ainsi, la concentration en chlorures dans ces formations près de la Côte Saint-Vincent est en moyenne plus bas de 100 mg/L (puits : PE-1/87, P3, P4, P5, F3 et F1, voir Tableau 3.2). Noter que dans le Tableau 3.2, l'échantillon analysé du puits de pompage PE-1/87 a été prélevé en 1988, suite à l'installation de ce puits. Les concentrations en chlorures sont différentes de celles présentées dans le Tableau 3.4. L'échantillon du puits F1 représente un cas extrême. Le puits F1 est coulant durant la fonte printanière, et ici les concentrations en chlorures sont minimales, 0.1 mg/L. Dans la formation rocheuse caractérisée par une conductivité hydraulique moyenne à faible (puits F4), les concentrations en Cl sont plus grandes, de 200 à 240 mg/L. Finalement, les concentrations sont plus élevées dans les argiles et elles atteignent 1000 mg/L (F5) et plus (P2). Dans la partie superficielle des argiles (argile altérée et fracturée), les concentrations diminuent suite au contact avec l'eau fraîchement infiltrée. À cause de la faible perméabilité des argiles dans les plus grandes profondeurs, l'infiltration des premiers mètres est remplacée par le processus de diffusion de l'eau fraîche. Des concentrations plus faibles en chlorures devraient aussi se retrouver à la base de l'argile où la salinité serait diluée en contact avec l'eau moins saline des tills et de l'aquifère sous-jacents. Cependant, aucun échantillon de cette séquence n'a été analysé au site de forage F5.

De cette discussion il apparaît que la formation aquifère est confinée par le haut et le bas par des formations très salines. Lors du pompage de l'unité mixte, un flux vertical vers le bas provenant des argiles et un flux vertical vers le haut provenant des grès fracturés contribueraient à la salinité de l'eau pompée. Un flux latéral d'eau saline est également possible si l'unité mixte est juxtaposée à des formations moins perméables. Ceci expliquerait l'augmentation de la concentration en Cl lors des deux essais de pompage, soient de 75 à 116 mg/L au puits PE-1/87, et de 15 à 32 mg/L au puits F3. Dû à la conductivité hydraulique plus élevée des roches fracturées sous-jacentes, le flux vertical vers le haut serait plus grand. Le pompage d'eau souterraine créerait alors un dôme d'eau plus saline centré sur le puits de pompage. Cette constatation modifie l'explication actuelle de la source de salinité pour le puits PE-1/87, selon laquelle un panache d'eau saline se trouverait sous le village de Saint-Benoît (Hydrogeo Canada, 1988). La salinité plus élevée sous le village de Saint-Benoît est plutôt expliquée par la configuration de la formation aquifère. À cet endroit l'élévation de l'aquifère est à environ -50 à -100 m. De plus, les gradients hydrauliques étant relativement faibles, ceci entraverait le déplacement de l'eau saline.

3.5 Propriétés hydrauliques

3.5.1 Données existantes

Un essai de pompage de 72 heures réalisé dans le passé par Hydrogéologie-Canada (1988) à un débit de 680 m³/j a causé un rabattement maximal de 5.7 m dans le piézomètre P0 situé à 5.4 m du puits de pompage. Les propriétés hydrauliques évaluées suite à cet essai sont présentées au Tableau 3.8. On recommandait alors de pomper le puits à un taux n'excédant pas 260 m³/j par crainte qu'un panache d'eau saline situé sous le village de Saint-Benoît ne s'approche du puits.

3.5.2 Essais hydrauliques - été 2000

Essais de perméabilité in situ

Des essais de perméabilité in situ (slugs test) ont été réalisés à l'été 2000 dans les puits (Tableau 3.8). L'un des avantages de ce type d'essai est de donner la transmissivité de la formation géologique à l'endroit du puits testé. Ainsi, selon les résultats présentés au Tableau 3.8, les puits F1, P2 et P3 interceptent des formations peu perméables contrairement aux autres puits testés (P1, P4 et P5) qui interceptent des formations plus perméables.

Essais de pompage

Deux essais de pompage ont été réalisés en mai et août 2000 au puits municipal PE-1/87 et au puits F3. La durée du pompage a été de 8 et 7 jours respectivement pour ces 2 essais. Les débits de pompage pour le puits PE-1/87 ont été déterminés en collaboration avec les responsables du puits municipal, à partir des données connues de débits et de rabattement et à partir des résultats de l'étude hydrogéologique réalisée en 1988 par Hydrogéologie-Canada. Le débit a donc été fixé à 190.8 m³/j au puits PE-1/87, et à 218.1 m³/j au puits F3. Il n'y avait pas de pompage au puits municipal durant l'essai #2. Les propriétés hydrauliques déterminées par les méthodes de Theis et Cooper-Jacob sont présentées de façon sommaire au Tableau 3.8. Les courbes de rabattement en fonction du temps (t) et de la distance au carré (r²) sont présentées aux figures 3.11 et 3.12.

Dans les deux cas, les rabattements observés sont inversement proportionnels aux distances du puits de pompage et suivent de près la courbe théorique de Theis. Dans le cas du pompage au puits F3, les deux puits d'observation F2 et P5 sont installés approximativement à la même distance du puits de pompage, soit 24.1 et 27.0 m. Les rabattements observés à la fin du pompage sont de 6.9 m dans le puits F2 et 5.6 m dans le puits P5. Selon ces résultats, le puits d'observation F2 intercepte la formation pompée, soit le roc fracturé, tandis que le puits d'observation P5 ne semble pas connecté directement au puits F3. Pour l'essai de pompage au puits F3, la comparaison des courbes de rabattement aux courbes théoriques de Theis permet d'identifier des limites positives dans la direction des puits F2 et P5. Une limite positive signifie qu'un apport d'eau supplémentaire est rencontré lors de l'agrandissement du cône de dépression. En effet, le puits F3 est foré à proximité du contact de la plaine de Saint-Benoît et de la terrasse de la Côte Saint-Vincent qui constitue la principale zone de recharge pour le secteur. Des limites négatives ont aussi été rencontrées dans la direction des autres puits (P0, P1, P3 et P4). Ces limites peuvent être interprétées comme des amincissements de la couche perméable.

Essais d'injection à charge constante

Des essais d'injection à charge constante (Lugeon) ont été réalisés dans le puits F4 afin d'obtenir un profil vertical de transmissivité de la formation rocheuse. Ces essais consistent à injecter de l'eau à travers un intervalle du puits isolé par deux obturateurs pneumatiques (figure 3.13). La

transmissivité est calculée par l'équation de Thiem pour un régime d'écoulement permanent (Ziegler, 1976).

La transmissivité mesurée dans le puits F4 est relativement uniforme et montre une variation entre 1×10^{-6} et 1×10^{-4} m²/s pour des intervalles testés de 3.75 m de longueur. La conductivité hydraulique correspondante varie entre 2.5×10^{-7} et 2.5×10^{-5} m/s. Ainsi, elle est d'environ 1 à 3 ordres de grandeur plus petite que celle estimée pour l'unité mixte lors des essais de pompage (Tableau 3.8). Ceci est expliqué par le fait que dans le puits F4 le tubage isole l'unité mixte et celle-ci ne contribuerait pas à la transmissivité mesurée dans ce puits.

3.6 Modélisation numérique

Un modèle numérique tridimensionnel a été développé afin d'intégrer l'information inventoriée lors de cette étude et d'évaluer le débit durable de la ressource, soit la quantité d'eau souterraine de qualité pouvant répondre aux besoins de la Ville. À cette fin, le logiciel FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) a été utilisé (Dierch, 1998). Il s'agit d'un logiciel d'écoulement souterrain en éléments finis très sophistiqué avec un puissant outil de visualisation de données d'entrée et particulièrement approprié pour des systèmes aquifères complexes impliquant plusieurs strates géologiques. Le modèle a été calé en régime transitoire selon la fluctuation de la piézométrie mesurée dans les puits d'observation en conditions d'écoulement naturel (fluctuations saisonnières) et lors de deux pompages. Le modèle numérique calé a été utilisé pour définir la réponse de l'aquifère aux divers scénarios de pompage.

3.6.1 Construction du modèle numérique

Le domaine considéré par le modèle coïncide avec les limites des bassins versants du Ruisseau au Prince et du Ruisseau Levert-Cardinal. Il couvre approximativement 27 km². Le modèle consiste en 3 couches hydrostratigraphiques qui représentent l'ensemble de l'aquifère confiné au site d'étude:

- la couche I représente l'unité mixte composée de grès très fracturés et altérés et de sables et graviers fluvio-glaciaires d'une épaisseur de 2 m,
- la couche II désigne le grès fracturé, d'une épaisseur de 25 m, et
- la couche III représente un grès moins fracturé d'une épaisseur de 25 m.

Horizontalement, le modèle est discrétisé en 6060 éléments finis (prismes triangulaires) et 4148 nœuds par couche, ou 18180 éléments finis et 12444 nœuds au total. Pour faciliter la convergence du modèle dans des zones avec un fort gradient hydraulique (près des puits de pompage) le maillage d'éléments finis a été raffiné (figure 3.14).

Les points de référence relatifs aux puits d'observation avec une numérotation P ont été positionnés dans la couche I, et ceux avec la numérotation F dans la couche II, la formation des grès fracturés. Un puits d'observation 'miroir' du puits Saint-Vincent a été inclus dans le modèle, dans la couche II. Le vrai puits Saint-Vincent se trouve près de la Côte Saint-Vincent, à la même distance de la limite mais à l'extérieur du modèle. L'hypothèse retenue est que les fluctuations de la nappe sont les mêmes dans les deux puits. Ainsi dans le texte suivant, on désigne par «puits Saint-Vincent» un puits fictif (miroir), situé à la même distance de la ligne de partage des eaux

que le puits réel. Deux points d'observation fictifs, 17 et 18, ont été également inclus dans la couche I du modèle, pour suivre les fluctuations de la nappe à ces endroits.

Aucun flux ou charge n'est spécifié aux conditions limites latérales du modèle. À la sortie du bassin versant les nœuds latéraux des couches II et III ont été considérés comme des drains (figure 3.14) avec une élévation variable dans le temps pour permettre une évacuation libre de l'eau du système. À la surface supérieure du modèle est assignée un flux vertical égal au taux de la recharge (figure 3.14). Le taux de recharge est considéré comme variable sur une base saisonnière aux endroits d'affleurement des dépôts glaciaires, le long de la Côte Saint-Vincent, et comme nul ailleurs. La base du modèle est considérée comme une limite à flux nul. Finalement, pour les scénarios de pompage, un taux de pompage est imposé aux nœuds représentant la section ouverte de deux puits pompés, soit PE-1/87 dans la couche I et F3 dans la couche II.

Des propriétés hydrauliques représentatives ont été assignées aux éléments du modèle représentant les 3 couches hydrostratigraphiques (Tableau 3.9). Ces valeurs ont été obtenues lors de travaux de terrain, les essais de pompage et de compilation des données. Des valeurs uniques ont été utilisées pour tous les paramètres sauf pour la conductivité de la couche I.

3.6.2 Calage du modèle numérique – écoulement sans pompage

Le calage du modèle a été effectué par itérations (essais et erreurs) en régime transitoire jusqu'à ce qu'une similitude raisonnable entre la fluctuation de la piézométrie mesurée dans les puits d'observation et de la piézométrie simulée ait été obtenue. L'architecture du modèle hydrostratigraphique en 3D qui a été clairement définie par Ross et al., (2002) a rendu la tâche du calage relativement simple réduisant l'incertitude pratiquement à deux paramètres, soit:

- à la conductivité hydraulique de la couche I, et
- au taux de la recharge.

Les niveaux dans les drains suivent la variation du taux de la recharge. Tous les autres paramètres (épaisseur des couches, conductivité hydraulique, coefficients d'emménagement, porosité effective) ont été considérés comme connus et ne contribuant pas à l'incertitude des résultats des simulations.

D'abord, l'épaisseur de la couche I étant fixée à 2 m, une distribution uniforme de la conductivité hydraulique égale à 1×10^{-4} m/s (voir résultats des essais hydrauliques) a été considérée. Par la suite, en supposant que dans les dépressions rocheuses (vallées enfouies) l'épaisseur de cette couche est plus importante, la conductivité hydraulique a été amplifiée d'un ordre de grandeur (1×10^{-3} m/s). Ceci signifie en réalité qu'en gardant la conductivité hydraulique initiale, l'épaisseur de la couche I passe à 20 m. La distribution de la conductivité hydraulique de la couche I est présentée à la figure 3.15.

Les fluctuations de l'élévation des drains et du taux de recharge sont considérées variables en fonction de la saison. Ces fonctions cycliques sont présentées à la figure 3.16. La recharge se fait surtout au printemps en mars et avril et en automne de septembre à décembre. Cependant, la recharge de l'aquifère régional (recharge au roc) a lieu également en hiver et en été à un taux plus faible puisque la partie saturée du till sus-jacent agit comme un réservoir. Le taux moyen

calé de la recharge est de 74.1 mm sur une base annuelle. Cette valeur est à l'intérieur de la plage de valeurs typiques pour la recharge à travers des dépôts glaciaires. Le niveau piézométrique à la sortie du bassin versant représenté par l'élévation des drains suit de près la fluctuation de la recharge (de 38.9 à 40.1 m). Cette variation est représentative pour les conditions de nappes confinées dans la région : fluctuation maximale de 1.3 m sur une base annuelle (Savard et *al.*, 2002).

La distribution temporelle des niveaux d'eau montre une similitude entre les niveaux simulés et mesurés (figure 3.17). Les puits de comparaison considérés sont l'hydrogramme enregistré au puits Saint-Vincent en 2000, et les données mesurées durant l'été 2000 aux puits d'observation.

La précision de la simulation est évaluée par les résidus (erreurs de la simulation r) dont la valeur est égale à la différence entre les niveaux d'eau mesurés dans les puits d'observation et ceux simulés pour les couches I et II, en fonction de la section hydrostratigraphique interceptée par la partie ouverte (crépinée) du puits. La figure 3.18 montre cette relation entre les niveaux mesurés et simulés en date du 10 août 2000. Idéalement, tous les points devraient être sur la ligne 1:1, ce qui signifierait que les élévations simulées sont identiques à celles mesurées et que le modèle numérique reproduit exactement les conditions d'écoulement observées sur le terrain. Les paramètres statistiques des résidus pour la simulation sont donnés au Tableau 3.10. Il est supposé que les résiduelles ont une distribution normale par rapport à la ligne 1:1, (charge hydraulique simulée = charge hydraulique observée).

La piézométrie présentée à la figure 3.19 reproduit l'écoulement souterrain de la période juste après la fonte printanière, le 10 mai (130^e jour), et durant la période d'étiage, le 10 août (220^e jour). Ces deux dates correspondent également aux dates des deux essais de pompage. L'écoulement souterrain dans la zone étudiée se fait de l'ouest vers l'est. Pratiquement aucun changement dans la direction d'écoulement ne peut être observé entre les deux dates. Près de la zone de recharge, due à l'infiltration printanière, les élévations des niveaux d'eau sont plus élevées en mai pour 1 à 1,5 m. Le décalage des niveaux entre les deux dates diminue en se rapprochant de la sortie du bassin versant, et est pratiquement nul pour l'isocontour de 42 m. Ce retard est le résultat de la durée de temps nécessaire pour que le front de l'infiltration printanière arrive à la sortie du bassin versant. Le gradient horizontal est de 0,002 à 0,003, ce qui représente une dénivellation de 2 à 3 m sur une distance de 1000 m. Dans la zone restreinte, près des puits de pompage, les niveaux d'eau souterraine dans la couche I varient généralement entre 46 et 48 m.

3.6.3 Simulation de l'écoulement lors des pompages

Le calage du modèle a été effectué également pour les conditions de pompage. Deux essais de pompage ont été simulés en régime transitoire dans les puits PE-1/87 et F3, pour une durée de 8 jours. Le modèle calé dans les conditions de l'écoulement sans pompage (section précédente) a été exécuté en mode transitoire pour voir la reproduction de l'écoulement souterrain lors des pompages. Les conditions initiales pour les deux simulations transitoires ont été les charges hydrauliques du 10 mai (pour le pompage au PE-1/87) et du 10 août (pour le pompage au F3).

La comparaison des rabattements observés et simulés en fonction du temps est présentée aux figures 3.20 et 3.21. Il est important de noter que les puits d'observation présentés à la figure 3.20 interceptent tous l'unité mixte, l'unité qui est pompée par le puits PE-1/87. Dans le cas du

pompage au puits F3, les deux puits d'observation F2 et P5 sont installés à environ la même distance du puits de pompage (24.1 et 27.0 m). Mais dans ce cas le puits d'observation F2 intercepte la formation pompée, le roc fracturé, tandis que le puits d'observation P5 est crépiné à travers l'unité mixte (couche I) et c'est pour ça que le rabattement observé ici est plus faible que celui observé au puits d'observation F2.

3.6.4 Scénarios de pompage

La Ville de Mirabel souhaite exploiter les puits PE-1/87 et F3 à un taux de 180 m³/jour pour chacun des deux puits (2x180 m³/jour = 2x40000 GIMP/jour). Afin de comprendre l'impact d'un tel pompage, neuf scénarios principaux ont été simulés avec le modèle numérique :

- scénario #1: sans pompage ;
- scénario #2: pompage continu uniquement dans le puits PE-1/87, taux de 180 m³/jour ;
- scénario #3: pompage continu uniquement dans le puits F3, taux de 180 m³/jour ;
- scénario #4: pompage simultané dans les deux puits entre 1 mai et 1 octobre seulement, taux de 140 m³/jour pour chacun des deux puits;
- scénario #5: pompage continu et simultané dans les deux puits, taux de 140 m³/jour pour chacun des deux puits;
- scénario #6: pompage simultané dans les deux puits entre 1 mai et 1 octobre seulement, taux de 160 m³/jour pour chacun des deux puits;
- scénario #7: pompage continu et simultané dans les deux puits, taux de 160 m³/jour pour chacun des deux puits;
- scénario #8: pompage simultané dans les deux puits entre 1 mai et 1 octobre seulement, taux de 180 m³/jour pour chacun des deux puits.
- scénario #9: pompage continu et simultané dans les deux puits, taux de 180 m³/jour pour chacun des deux puits.

Tous ces scénarios considèrent uniquement la quantité d'eau qui pourrait être pompée de l'aquifère. Pour voir les effets des pompages, les résultats des scénarios sont comparés seulement pour la période d'étiage, le 20 août (le 230^e jour), et ce dans les puits de pompage et les puits d'observation (figures 3.22, et Tableau 3.11). Cette période est considérée la plus critique parce que c'est à cette période que les niveaux d'eau sont les plus bas.

La figure 3.22 montre les rabattements provoqués par le pompage simultané (180 m³/j pour chacun des deux puits) aux deux puits de pompage le 20 août. Le scénario #9 a été considéré comme étant le plus conservateur en termes de rabattements. Les rabattements anticipés dans le village seraient d'environ 1.7 m, et ceux le long du Rang Saint-Étienne, de 2.5 m. Étant donné sa proximité, le rabattement sur la ligne de partage actuelle en amont des sites de pompage serait plus important et de l'ordre de 4.7 m. La ligne actuelle de partage des eaux serait sûrement déplacée par le pompage plus au nord vers la Côte Saint-Vincent.

Les résultats présentés au Tableau 3.11 montrent les niveaux piézométriques simulés dans les puits d'observation et de pompage pour des divers scénarios de pompage. Les rabattements correspondants peuvent être obtenus par l'extraction des niveaux d'eau pour le scénario

considéré des niveaux simulés pour le scénario sans pompage (scénario #1). Un niveau piézométrique de 35 m dans les deux puits de pompage a été retenu comme limite sécuritaire à ne pas dépasser. Un niveau en dessous de 35 m implique une désaturation de la formation aquifère et signifierait un passage à des conditions aérobies et une dégradation possible de la qualité de l'eau souterraine.

Selon les scénarios #1 et #2, le pompage à un seul puits provoquerait un rabattement d'environ 2.6 m au puits non pompé. Les pompages intermittents du 1^{er} mai au 1^{er} octobre montrent en général un rabattement d'un mètre plus bas que les scénarios avec le même taux de pompage en continue. En période hivernale sans pompage, la recharge renouvelle les réserves en eau souterraine dans l'aquifère. Les rabattements observés avec les scénarios #4 et #6 ressemblent beaucoup à ceux des scénarios #2 et #3, malgré un taux de pompage presque doublé. Ces scénarios sont d'autant plus intéressants que c'est durant cette période que la population du village a besoin de plus d'eau. Les taux imposés dans les scénarios #2 à #5, soit un pompage continu de 180 m³/jour dans un puits de pompage seulement, ou un pompage simultané dans les deux puits de pompage de 140 m³/jour pour chacun des puits, sont favorables en termes de rabattements observés. Les niveaux piézométriques dans les puits de pompage pour ces scénarios restent toujours au-dessus de l'élévation de 35 m. Compte tenu de son taux de pompage plus élevé, le scénario #5 permet une exploitation maximale de l'aquifère. Selon les résultats des simulations, les rabattements pour les scénarios de pompage #6 à #9 dépassent ce niveau près des puits et ne devraient pas être considérés. Les plus grands rabattements sont observés avec le scénario #9.

Les deux composantes principales du bilan d'eau du domaine simulé, soit la recharge et le taux de pompage, sont présentées au Tableau 3.12. Selon le scénario considéré, le taux de pompage varie entre 15.6% et 47.8% de la recharge. Le reste de l'eau infiltrée s'écoule librement par les voies souterraines vers la sortie du bassin versant. Du point de vue de la pérennité de la ressource en eau souterraine, l'aquifère exploité supporte toujours mieux les taux de pompage qui représentent une fraction moindre du taux de recharge. Ainsi, les scénarios #7 et #9 (taux de pompage = 40% et plus du taux de recharge) sont encore moins favorables que les autres scénarios.

3.6.5 L'aire d'alimentation et temps de transport

Le traçage de particules par la méthode inverse pour le scénario #9 est présenté à la figure 3.23. Un rayon minimal de 100 m a été considéré autour des puits. Cet exercice nous donne l'origine des particules d'eau pompée au puits. Ainsi, toute la zone de recharge s'étendant au nord de la coordonnée 5 046 000 m nord serait captée par les puits. Les aires d'alimentation des deux puits devraient être protégées au cas où un pompage selon le scénario #9 serait appliqué. Ceci signifie que toute activité susceptible de produire une contamination dans cette zone (principalement épandage des engrais, des pesticides et des sels déglaçants) devrait être contrôlée. De plus, les isochrones présentées à la figure 3.24 montrent des zones de transport pour différents temps de transport des particules. La porosité moyenne est de 1% et le taux de pompage est celui du scénario #9. Ainsi, le temps maximal nécessaire pour qu'une particule s'infiltrant à partir de la Côte Saint-Vincent est d'un peu plus de 10 ans. Pour le puits de pompage actuel PE-1/87, le temps de transport moyen est de 1 à 5 ans.

3.7 Conclusions et recommandations

Une étude détaillée du secteur de Saint-Benoît a été réalisée afin de caractériser la formation aquifère exploitée par la Ville de Mirabel pour approvisionner en eau potable la population du secteur de Saint-Benoît. L'objectif principal de cette étude était d'estimer le débit maximal (quantité et qualité) pouvant être extrait de l'aquifère de façon durable.

3.7.1 Hydrostratigraphie

Une formation argileuse d'une épaisseur moyenne de 20 mètres, couvre la majeure partie du secteur étudié. Plus au nord, à la Côte Saint-Vincent, l'argile est absente et le till dont l'épaisseur varie entre 5 et 25 m est exposé. Ce till, plus perméable que l'argile, constituerait la principale zone de recharge de l'aquifère exploité. Généralement, on retrouve à la base du till, une couche de quelques mètres de sable et gravier qui constitue avec les premiers mètres de la séquence rocheuse, la principale zone aquifère du secteur étudié.

3.7.2 Propriétés hydrauliques

Les essais hydrauliques ont permis d'évaluer les propriétés hydrauliques de l'aquifère :

- la transmissivité moyenne est de $4,7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$;
- la conductivité hydraulique moyenne est de $1,46 \times 10^{-4} \text{ m/s}$;
- le coefficient d'emménagement est de 0,0001.

La distribution spatiale de la formation aquifère (unité mixte) n'est pas uniforme et elle est fonction de la présence de l'unité de sable et gravier et de la fracturation des roches sous-jacentes. Ceci est confirmé par la variation des propriétés hydrauliques ainsi que de la qualité de l'eau souterraine à l'interface entre les dépôts granulaires et la formation rocheuse.

3.7.3 Qualité de l'eau souterraine

La salinité de l'eau souterraine dans le secteur résulte du recul de la Mer de Champlain. En effet, le mélange d'eau marine et de fonte glaciaire aurait été piégé dans les pores et les fractures des formations géologiques. Par la suite, les cycles de recharge et d'écoulement souterrain auraient dilué cette eau saline. Dans les formations plus perméables (aquifère), la salinité est presque inexistante pour le secteur près de PE-1/87. L'analyse des échantillons d'eau interstitielle provenant d'échantillons d'argile montre que la salinité de l'eau y est plus importante que celle de l'eau souterraine provenant de la formation rocheuse sous-jacente aux puits F4 et F5. Puisque l'aquifère se trouve confiné entre ces deux formations, un pompage excessif contribuerait à augmenter la salinité de l'eau pompée par lixiviation. Cette hypothèse est supportée par l'augmentation de salinité durant les deux essais de pompage.

L'eau pompée au puits F3 est beaucoup moins saline que l'eau du puits municipal PE-1/87. Toutefois, les concentrations en fer et en manganèse y sont plus élevées. Advenant le cas où le puits F3 serait utilisé comme puits d'approvisionnement, un traitement de l'eau serait nécessaire pour limiter les concentrations en manganèse excédant déjà le critère de qualité esthétique.

3.7.4 Modélisation numérique

Un modèle numérique a été développé afin de prédire le comportement de l'aquifère lors du pompage des puits PE-1/87 et F3. Le modèle comprend trois couches: l'unité mixte de sable et

gravier et de roches fracturées, et deux couches de roc fracturé. Au total 18180 éléments finis et 12444 nœuds composent le maillage. Le calage du modèle numérique a permis la représentation des conditions d'écoulement. Le calage a été effectué en régime transitoire pour des conditions naturelles d'écoulement et pour des conditions de pompage. Par la suite, neuf scénarios de pompage ont été simulés. Un niveau piézométrique de 35 m dans les deux puits de pompage a été retenu comme limite de sécurité pour le pompage. Tous ces scénarios considèrent uniquement l'aspect quantitatif du pompage.

Les résultats des simulations suggèrent que la productivité de l'aquifère est soutenable pour un pompage de 180 m³/j dans un seul puits de pompage à la fois (scénarios #2 et #3), ou pour un pompage simultané des deux puits au taux de 140 m³/j pour chacun des puits (scénarios #4 et #5). C'est le scénario d'extraction continue de 140 m³/jour dans chacun des puits (scénario #5) qui permet une exploitation maximale de l'aquifère sans que la limite de 35 m ne soit dépassée. Pour ce scénario, le rabattement dans le village de Saint-Benoît, en aval des puits de pompage, serait de 1,3 m, tandis qu'en amont sur le rang Grand Brûlé et près de la ligne de partage des eaux, le rabattement serait de 3,7 m.

3.7.5 Durabilité de la ressource

La modélisation numérique a permis d'estimer le débit durable à 280 m³/jour (2x30000 gimp/jour), soit 140 m³/jour pour chacun des deux puits. Notons que ces résultats sont obtenus sur une base numérique et quantitative pour les conditions d'écoulement rencontrées durant la campagne de terrain de l'été 2000. La recharge et les conditions d'écoulement sont généralement fonction du temps et les résultats numériques présentés pourraient différer selon ces variations. En ce qui concerne la qualité de l'eau pompée, il est difficile de donner des conclusions précises avec la connaissance actuelle. Toutefois, la distribution du pompage sur deux puits pourrait à la fois assurer l'augmentation du débit actuel et maintenir une bonne qualité de l'eau pompée.

Une surveillance des niveaux et de la qualité de l'eau près des puits de pompage est recommandée afin de s'assurer que l'aquifère n'est pas surexploité. Ce n'est qu'après plusieurs années de suivi qu'il sera possible de définir avec précision le taux de pompage optimal. Ce suivi consiste à mesurer de façon périodique la conductivité électrique, le pH, la dureté totale et les concentrations en chlorures, manganèse, fer et nitrates. La mesure des débits pompés doit également être poursuivie afin de pouvoir faire le parallèle entre les débits et la qualité de l'eau. Ceci permettra de prédire l'évolution de la qualité de l'eau de l'aquifère.

3.7.6 Protection de l'aquifère

La modélisation numérique a permis de définir l'aire d'alimentation des deux puits de pompage pour différents scénarios. Le scénario avec la plus grande aire d'alimentation (scénario #9) a été retenue afin d'être conservateur dans les prédictions. Pour ce scénario, l'aire d'alimentation se trouve le long de la Côte Saint-Vincent dans la zone de recharge. Cette zone doit donc être protégée en priorité à cause de sa vulnérabilité et des risques de contamination des puits de pompage.

La protection de l'aquifère consiste à faire un inventaire des principales sources potentielles de contamination dans cette zone et de contrôler leur utilisation. La protection de la formation aquifère exploitée nécessite également un suivi de la qualité d'eau dans des puits éloignés en amont des puits de pompage afin de prévenir une avancée éventuelle de la contamination.

4. Étude détaillée d'un site sélectionné: Cas de la carrière de Saint-Eustache

Jean-Michel Lemieux, René Therrien et Donna Kirkwood

4.1 Introduction

La carrière Saint-Eustache est le plus gros producteur de granulats au Québec (Consedine, 2001) avec une exploitation de près de 2 millions de tonnes de granulats par année. Il n'est donc pas surprenant que l'exploitation de la carrière résulte en l'excavation d'un volume important de roc qui, puisque la carrière est asséchée par pompage, agit comme un gigantesque puits dans la région.

L'influence de l'exploitation de la carrière sur la piézométrie de la région est évidente. Localement, les eaux souterraines sont drainées vers l'excavation modifiant ainsi le patron d'écoulement naturel.

Le but de cette étude est de déterminer l'aire d'alimentation et d'influence de la carrière dans la région ainsi que de documenter le contexte physique et hydrogéologique de cette région. Il en résultera un document de base complet qui pourra être utilisé par quiconque ayant le désir d'approfondir une problématique particulière dans la région. De plus, dans le cadre de cette étude à saveur "régionale", une étude très localisée à l'intérieur de la carrière a été réalisée pour déterminer l'influence des différents types de fractures sur l'écoulement de l'eau souterraine. Les résultats de cette étude seront ensuite discutés pour évaluer leurs implications à l'échelle régionale. Ce rapport couvre donc deux études distinctes qui sont liées entre elles par la carrière Saint-Eustache.

4.2 Contexte physique

4.2.1 Localisation et physiographie

La carrière Saint-Eustache est située au 400 Hector-Lanthier dans la municipalité de Saint-Eustache, au nord-ouest de Montréal. On peut y accéder par l'autoroute 640 en prenant la sortie 14 (25ième avenue). Elle fait partie du territoire de la municipalité régionale de comté (MRC) de Deux-Montagnes. La carrière exploite des dolomies ordoviciennes sur une superficie d'environ 1.1 km² et sur une profondeur pouvant aller jusqu'à 17 mètres sous le niveau moyen de la mer, soit environ 60 mètres sous la surface du sol. Le volume de l'excavation est de l'ordre de 25 000 000 m³.

La carrière est située dans la région physiographique des Basses-Terres du Saint-Laurent. Il y a donc très peu de relief dans les alentours de la carrière si ce n'est de la colline d'Oka située à une dizaine de kilomètres à l'ouest. Enfin, la carrière est située à moins de 2 kilomètres au nord de la rivière des Mille-Îles.

4.3 Bassins hydrologiques

La carrière Saint-Eustache se trouve dans le bassin hydrologique de la rivière des Mille-Îles (figure 4.1). Par contre, l'eau pompée de la carrière est déversée dans la rivière Chicot, rivière la plus près de la carrière. Cette dernière se jette dans la rivière des Mille-Îles, à quelques

kilomètres au sud de la carrière. Une partie de l'eau pompée dans la carrière est utilisée pour la fabrication de béton directement sur le site.

Des mesures ont été réalisées pour estimer le débit de pompage de la carrière. Un profil de vitesse d'écoulement à l'aide d'un vélocimètre à hélice a été réalisé dans un ruisseau où l'eau est déversée avant de se jeter dans la rivière Chicot. Le profil de vitesse couplé avec un profil de profondeur a permis d'estimer un débit de pompage de 22 475 m³/j. Ce débit est environ 1,5 fois plus élevé que celui calculé il y a quelques années par le contremaître de la carrière à partir de la puissance des pompes. Compte tenu de l'agrandissement de la carrière et de l'évolution du réseau de pompage, la valeur calculée pour cette étude est considérée réaliste.

4.3.1 Données climatiques

La station météorologique la plus près de la carrière se trouve à Sainte-Thérèse de Blainville. Des données de précipitations quotidiennes sont disponibles pour les années comprises entre 1970 et 1998. La figure 4.2 présente les précipitations annuelles en pluie et en neige ainsi que la somme des précipitations en neige et en pluie, qui est la précipitation totale, pour l'ensemble des années disponibles. La moyenne des précipitations totales pour ces années est de 1075 mm/an; qu'elle est de 870 mm/an pour la pluie et de 205 mm/an pour la neige. Il est à noter qu'un centimètre de neige est environ l'équivalent d'un millimètre de pluie.

La figure 4.3 présente les valeurs de précipitations mensuelles moyennes pour la pluie, la neige et la précipitation totale calculées à partir des données comprises entre 1970 et 1998. Encore une fois, les précipitations de neige ont été converties en millimètres pour être comparées aux valeurs de précipitations de pluie. L'histogramme de la figure suggère que les précipitations mensuelles totales sont légèrement plus importantes en été et à l'automne qu'en hiver et au printemps. Enfin, les précipitations mensuelles moyennes sont de 72 mm pour la pluie, 26 mm pour la neige et 90 mm pour le total de la pluie et de la neige. Il est à noter que les précipitations mensuelles de neige ont été calculées pour les huit mois où il y a eu précipitation de neige et non, comme pour la pluie, pour chacun des mois.

4.4 Contexte géologique

4.4.1 Carte des formations superficielles

La carrière Saint-Eustache exploite les dolomies à même la surface du sol. Il y a très peu de dépôts meubles dans la région immédiate de la carrière et en général les dépôts meubles situés au-dessus du roc ont une épaisseur inférieure à 5 mètres (Hamel, 2002). Ces dépôts sont constitués de till avec quelque peu d'argile. La stratigraphie typique des dépôts dans la région est un till qui repose sur le roc, surmonté par des dépôts argileux de la mer de Champlain, qui sont parfois surmontés par du sable. Hamel (2002) identifie également la zone de la carrière comme une zone de recharge pour l'aquifère de roc fracturé. Enfin, la figure 4.4 présente une carte des dépôts de surface pour la région à l'étude.

4.4.2 Géologie du socle rocheux

La carrière Saint-Eustache exploite des dolomies de l'Ordovicien inférieur appartenant à la Formation de Beauharnois du Groupe de Beekmantown dans la province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent (figure 4.5). La Formation de Beauharnois repose sur la Formation de Theresa et est surmontée par la Formation de Carillon. Selon Globensky (1987), la Formation de

Beauharnois aurait une puissance d'environ 305 m et serait composée en majeure partie de dolomie massive et laminée, de couleur grise à altération beige, variant de cristalline à dense. On note également la présence d'interlits de grès dolomitique (Globensky, 1987).

La Formation de Beauharnois peut être divisée en deux membres, soit ceux de Huntington et Ogdensberg (Bernstein, 1992). Le Membre d'Ogdensberg est constitué à la base de dolomies fossilifères gréseuses et bioturbées surmontées par des dolomies parfois fossilifères à son sommet. Le Membre de Huntington est constitué à sa base d'une alternance de lits minces et épais de dolomies laminées et bioturbées non fossilifères. Sa partie sommitale est formée de calcaires et dolomies gréseuses parfois fossilifères. Ce sont les dolomies du membre de Huntington qui affleurent à la carrière Saint-Eustache (figure 4.5).

4.4.3 Analyse de la fracturation

Une analyse détaillée de la fracturation a été réalisée pour déterminer le type et la géométrie du réseau de fracture qui affecte les roches de la carrière (Lemieux, 2000, 2001). Les différents relevés linéaires sur les parois de la carrière ainsi que la cartographie partielle du fond de la carrière ont mis en évidence trois types de fractures. Le terme général de fracture sera utilisé ici pour décrire toutes les ruptures discrètes qui affectent la masse rocheuse et où il y a perte de cohésion (Ramsey et Huber, 1987). Ce terme général englobe les failles, pour lesquelles les deux compartiments sont déplacés l'un par rapport à l'autre, les joints où les deux lèvres ne montrent pas de mouvement différentiel (à l'œil nu), les fentes (joints scellés) où des fluides circulant dans la roche ont partiellement ou complètement scellé les deux lèvres de la roche par la déposition de matériel cristallin et les veines où une quantité considérable (> 1 mm) de matériel de remplissage occupe l'espace entre les deux lèvres de la fracture (Ramsey et Huber, 1987). À cette définition sera ajoutée les plans de dissolution diagénétiques ou stylolites diagénétiques (plans de litage) qui sont également des plans de faible cohésion.

Le premier type de fractures relevée dans la carrière correspond à des failles de décrochement d'épaisseur variant entre 10 et 50 cm et qui affectent toute la séquence visible dans la carrière. Ces failles de décrochement consistent en une zone hautement fracturée qui n'affecte pas les roches en bordure de la faille. On compte moins d'une dizaine de ces failles dans l'ensemble de la carrière. Leur effet sur l'écoulement de l'eau souterraine est inconnu.

Le second type de fractures est représentée par des plans de dissolution diagénétiques mis en évidence par une quantité importante de minéraux insolubles et de matière organique. Ce sont ces plans qui délimitent les bancs de dolomie sur les parois de la carrière. Ces fractures se comptent en centaines, leur nombre exact dépend de l'échelle à laquelle elles sont mesurées. Leur épaisseur varie de quelques millimètres à environ deux centimètres. Lorsque l'on regarde ces structures à petite échelle, on remarque que ce sont des structures non planaires et très rugueuses. La nature très irrégulière de ces structures offre des ponts, qui par endroit, peuvent maintenir la fracture ouverte. Leur extension latérale est, à l'échelle de la carrière, continue puisque le pendage des strates est pratiquement nul. L'observation de ces fractures sur les parois de la carrière a révélé que ce sont des structures qui agissent comme des drains importants pour l'eau souterraine. Des venues d'eau permanentes le long de ces fractures ont en effet été observées sur les parois, dans les horizons les plus profonds de la carrière.

Enfin, le troisième type de fracture, qui est le plus abondant, est représenté par des joints verticaux. Ceux-ci se terminent généralement dans les plans de litage. Ces fractures sont de moins grande étendue mais beaucoup plus fréquentes que les précédentes. Ces fractures peuvent être regroupées en différentes familles selon leur orientation. Les orientations moyennes des différentes familles sont, en ordre décroissant d'importance basée sur le nombre de fractures, 2°, 80°, 150° et 30°. L'espacement moyen des fractures pour chacune de ces familles varie entre 50 centimètres et 2 mètres tandis que la longueur moyenne des joints pour chaque famille est d'environ 30 centimètres.

L'examen des fractures sur les parois de la carrière n'a pas permis de révéler si ces fractures participent activement à l'écoulement de l'eau souterraine. Par contre, des observations dans d'autres carrières situées à proximité révèlent que certains joints en surface sont altérés par la circulation de l'eau souterraine. Il est donc possible qu'à la carrière Saint-Eustache, bien qu'une circulation d'eau souterraine n'ait pas été observée dans les fractures, celles-ci participent tout de même à l'écoulement de l'eau souterraine.

L'histogramme de l'espacement des joints pour chacune des familles suggère une distribution lognormale à exponentielle (figure 4.6). La majorité des joints sont assez peu espacés et une faible proportion de joints ont un espacement plus grand.

4.5 Contexte hydrogéologique

4.5.1 Description des unités hydrogéologiques

Les unités hydrogéologiques présentes dans la région sont définies à la base par un aquifère de roc fracturé. Cet aquifère est surmonté par un till parfois délavé en contact avec une zone de roc altéré. Cet aquifère est généralement surmonté par une séquence d'argile plus ou moins épaisse qui agit comme aquitard dans la région. Enfin, il y a parfois des aquifères de surface à nappe libre dans des "poches" de sable qui reposent sur de l'argile.

L'unité la plus perméable, mais qui ne se retrouve pas partout dans la région, est l'aquifère de till parfois délavé en contact avec le roc qui est altéré sur un maximum de quelques mètres. Peu d'information existe sur cette unité de roches altérées puisqu'elle est généralement isolée par le tubage dans les puits de la région. Par contre, Nastev *et al.* (2001) suggèrent que lorsqu'elle est présente, cette unité aurait une conductivité hydraulique élevée et assez uniforme. L'aquifère de roc "sain" est également beaucoup exploité et doit principalement sa perméabilité aux fractures qui l'affectent. Il se retrouve habituellement confiné par de l'argile mais il se retrouve parfois affleurant avec un peu de till au-dessus.

4.5.2 Limites ou conditions hydrauliques particulières

En premier lieu, outre la rivière des Mille-Îles, les limites représentées sur les différentes cartes de ce rapport ne sont pas toutes de nature hydrogéologique mais parfois de nature géographique et arbitraire. Les limites nord et est des cartes correspondent aux limites des MRC de Mirabel et Thérèse-de-Blainville tandis que les limites sud et ouest sont des limites arbitraires pour limiter les cartes au territoire à l'étude.

Par contre, à l'intérieur et à l'extérieur de ces limites se trouvent d'autres limites, celles-ci ayant beaucoup plus de signification. Au nord-ouest de la région se trouve le Bouclier canadien qui a

une topographie beaucoup plus élevée que celle des Basses-Terres du Saint-Laurent, dans laquelle se trouve la région à l'étude. Au nord-est de la région se trouve la rivière Mascouche (figure 4.1) qui est en contact hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé (Nastev *et al.*, 2001). La rivière du Chêne (figure 4.1) au sud-ouest de la région affecte également l'écoulement de l'eau souterraine. Enfin, la rivière des Mille Îles est probablement la limite physique la plus importante de la région.

4.5.3 Carte piézométrique et zone d'appel de la carrière

La figure 4.7 présente la carte piézométrique du roc de la région à l'étude avec la position des puits utilisés pour la tracer. La carte a été produite par interpolation des valeurs de charge hydraulique mesurées dans les puits par krigeage universel. Un variogramme théorique omnidirectionnel de forme sphérique a été utilisé pour modéliser le variogramme expérimental.

Les équipotentielles reproduisent presque intégralement la topographie du sol sauf qu'elles sont environ un mètre plus basses. L'écoulement se fait généralement vers la rivière des Mille Îles. Par contre, au nord-est de la région, l'eau souterraine s'écoule vers la rivière Mascouche. Il en est également de même pour la rivière du Chêne. La présence de la carrière est très visible puisqu'elle se trouve au centre d'un cône de dépression d'environ 50 mètres de profondeur, soit environ la profondeur de celle-ci.

La figure 4.8 présente également la piézométrie de la région avec en plus la zone d'appel de la carrière. Il s'agit de la zone dans laquelle toute infiltration d'eau sera un jour ou l'autre pompée par la carrière. Cette carte est créée en traçant des lignes d'écoulement de l'eau souterraine perpendiculairement aux contours piézométriques. Toutes les lignes d'écoulement qui aboutissent dans la carrière sont retenues. Enfin, la superficie couverte par ces lignes d'écoulement forme la zone d'alimentation de la carrière. La superficie de cette zone est d'environ 133 km². Il est possible de remarquer sur la figure qu'une partie de l'eau qui est pompée par la carrière provient de la rivière des Mille Îles.

L'aire d'alimentation correspond grossièrement à la forme du bassin de la rivière Chicot (figure 4.1). Puisque l'hydrographie est en grande partie contrôlée par la topographie du sol et que celle-ci semble également contrôler la forme de la nappe phréatique, il n'est donc pas surprenant que la zone d'appel de la carrière s'apparente au bassin de la rivière Chicot. Par contre, la zone d'influence de la carrière, qui peut être définie par la zone où la surface piézométrique est perturbée par l'exploitation de la carrière, est beaucoup plus petite que la zone d'appel de la carrière. La zone d'influence se limite à un rayon d'environ 2 kilomètres autour de la carrière.

4.5.4 Recharge, bilan hydrologique et suivi de la nappe

La figure 4.9 présente les contextes hydrogéologiques présents dans la région tels que tirés de Hamel (2002). Ces contextes hydrogéologiques sont divisés en deux contextes généraux: nappe libre ou semi-confinée et nappe confinée. À chacun de ces contextes est associé une valeur de recharge moyenne calculée pour l'aquifère de roc fracturé et pour l'ensemble de la région selon les types de sol, les conditions hydrogéologiques, les flux verticaux et les précipitations. Ainsi, pour une nappe confinée, les valeurs d'infiltration verticale seraient comprises entre 0 et 10 mm d'eau par année et pour les nappes libres ou semi-confinées, les valeurs de recharge seraient d'environ 200 mm d'eau par année.

Des bilans hydrologiques ont également été réalisés pour déterminer les valeurs de recharge (Hamel, 2002). Les résultats sont présentés au Tableau 4.1 pour les années 1993 et 1998 seulement. Les méthodes de Thorntwaite et de Rochette et Dubé (1989) ont été utilisées pour déterminer l'évapotranspiration potentielle. La recharge ainsi obtenue est beaucoup moins précise que celle obtenue en considérant les contextes hydrogéologiques puisque les bilans hydrologiques ne considèrent le type de dépôts que sous forme d'un coefficient de ruissellement. La valeur moyenne de recharge pour le site de la station météorologique de Sainte-Thérèse serait de 254 mm par année.

Enfin, la recharge a également été estimée à l'aide des hydrogrammes de puits dont le niveau d'eau a été suivi pour plusieurs années. Le Tableau 4.2 présente la liste des puits dont le niveau d'eau a été suivi avec la période d'enregistrement. La position de ces puits est présentée à la figure 4.7. On retrouve également dans le Tableau 4.2 la valeur de recharge calculée pour les puits crépinés en nappe libre. Les variations moyennes annuelles ainsi que la tendance à long terme de la nappe phréatique y sont aussi présentées. La valeur moyenne de recharge serait de 169 mm par année pour les trois puits suivis. Cette méthode d'estimation de la recharge est également moins précise que l'approche par contexte puisqu'elle fait appel à des coefficients de drainage théoriques et non mesurés.

Le suivi de nappe dans chacun des puits présentés au Tableau 4.2 donne de précieuses informations sur le bilan hydrique des eaux souterraines dans la région. La tendance à long terme mesurée dans les puits indique si la nappe est en régression ou en progression, c'est-à-dire que si la tendance est négative, la nappe phréatique régresse, et si elle est positive, la nappe phréatique progresse. À l'exception des tendances négatives relevées dans les puits R8 et R15, il semble que la nappe phréatique soit en progression. De plus, même si les valeurs relevées à Saint-Eustache montrent une tendance positive entre 1978 et 1993, il est à noter que ces puits se retrouvent à l'extérieur de la zone d'influence de la carrière (figure 4.8). Par contre, aucune donnée n'indique si la nappe est en régression ou en recharge dans la zone d'influence de la carrière.

4.5.5 Sources potentielles de contamination et qualité de l'eau souterraine

Puisque la région à l'étude est vaste, il est pratiquement impossible de répertorier toutes les sources de contamination possible. De plus, la carrière ne représente pas un milieu vulnérable au même titre qu'un puits. Ainsi, les sources de contamination pour l'aquifère de roc fracturé seront analysées au niveau théorique.

Il existe deux grands types de contamination : ponctuelle et diffuse. La région est évidemment vulnérable à ces deux types de contamination. La contamination ponctuelle est liée à une pollution de grande concentration sur un territoire restreint. La contamination ponctuelle peut être représentée par une fuite dans le réservoir d'essence d'une station service, une fuite dans un site d'enfouissement sanitaire ou un déversement sur un site industriel. Il est alors important de considérer le contexte hydrogéologique dans lequel ces sources potentielles de contamination se retrouvent. Par exemple, ces sources potentielles ne devraient jamais se retrouver dans les zones de recharge où la nappe phréatique n'est pas protégée puisque les sources, quoique ponctuelles, pourraient avoir un impact beaucoup plus grand que l'aire de contamination initiale.

Le deuxième type de contamination est "diffus", c'est-à-dire de faible concentration mais sur un grand territoire. Ce type de contamination est principalement attribuable aux activités agricoles et à la pollution industrielle atmosphérique. Encore une fois, c'est lorsque ces activités ont lieu dans des zones où la nappe phréatique n'est pas protégée qu'elles peuvent devenir dangereuses. Cette pollution dégrade les eaux souterraines plus lentement que la pollution ponctuelle puisque sa concentration est beaucoup plus faible. C'est également pourquoi cette pollution est plus difficile à prévenir et à détecter. Par contre, la pollution diffuse sur des dépôts imperméables n'est pas plus souhaitable puisque les contaminants finiront tôt ou tard dans les cours d'eau qui sont parfois en contact avec l'eau souterraine.

La caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines de la région a été effectuée lors des étés 1999 et 2000 (Bourque *et al.*, 2001). La qualité de l'eau a été étudiée à l'aide des paramètres physico-chimiques et des analyses inorganiques. Malgré certaines anomalies mineures dans la région à l'étude, il n'y a pas de problèmes majeurs dans la qualité de l'eau souterraine. Le lecteur est référé à Bourque *et al.*, (2001) pour plus de détails sur la distribution de la composition chimique des eaux souterraines dans la région.

La figure 4.10 présente une carte des types d'eau souterraine superposés aux contextes hydrogéologiques. Les types d'eau pour chaque échantillon sont déterminés par les cations (Ca, Mg, Na) et anions (HCO_3 , Cl, SO_4) dominants. La concentration des anions et cations est transformée en milliéquivalents par litre et en milliéquivalents (%). Tous les cations et anions qui ont un pourcentage plus élevé que 20% déterminent alors le type d'eau (Cloutier *et al.*, 2001). La carte des contextes hydrogéologiques est la même que celle présentée à la figure 4.9 excepté qu'elle a été simplifiée pour ne montrer que le type d'aquifère.

La figure 4.10 montre beaucoup de variation dans la distribution des types d'eau. Le type d'eau le plus important est l'eau bicarbonatée dominée par le calcium (Ca- HCO_3) et le magnésium (Mg- HCO_3). Ce type d'eau se retrouve principalement dans les zones de recharge et est caractérisé par de l'eau météorique récente (Cloutier *et al.*, 2001). Les autres types d'eau sont caractéristiques des aquifères confinés. Pour ce qui est des eaux riches en Na-Cl, elles se retrouvent généralement dans les vallées enfouies et pourraient être le résultat du mélange avec de l'eau marine datant de la mer de Champlain (Cloutier *et al.*, 2001). Par contre, pour ce qui est de la série de quatre analyses de type Na-Cl qui sont alignées au nord de la carte, elles seraient plutôt attribuables aux sels déglaçants utilisés sur l'autoroute 15 en bordure de ces puits.

4.6 Propriétés hydrauliques

4.6.1 Données existantes

Plusieurs essais ont été réalisés dans le cadre du projet de caractérisation régionale. Ces essais incluent des essais de pompage, des essais Lugeon et des essais de perméabilité. En plus de ces essais, plusieurs autres essais ont été compilés par Nastev *et al.* (2001). Ces essais comprennent des essais de capacité spécifique, de productivité et de pompage réalisés par différents organismes, compagnies, agences, municipalités, etc.

La figure 4.11 présente la distribution du logarithme de la conductivité hydraulique horizontale dans la région à l'étude. Cette carte a été produite avec les données interprétées des différents essais disponibles dans la région dont la position est également représentée. L'interpolation a été

réalisée par krigeage en utilisant la conductivité hydraulique comme variable ayant un poids semblable quelle que soit la méthode utilisée pour la mesurer. Par contre, Nastev *et al.* (2001) montrent que l'échelle de l'essai influence les valeurs de conductivité hydraulique. C'est-à-dire que plus l'échelle de l'essai augmente, plus la valeur de conductivité hydraulique sera grande. Ainsi, un essai de pompage donnera une valeur différente de conductivité hydraulique par rapport à un essai de perméabilité ou d'injection effectué dans un seul puits. Ces différences peuvent atteindre jusqu'à deux ordres de grandeur. Il serait alors nécessaire d'introduire un poids associé au type d'essais lors de l'interpolation de la conductivité hydraulique par krigeage.

Enfin, Nastev *et al.* (2001) suggèrent que la conductivité hydraulique horizontale est plus élevée pour les dolomies dans le centre et au nord de la région à l'étude que dans les endroits où le grès est présent.

4.6.2 Essais de perméabilité et essais d'injection à charge constante

Dans un premier temps, des essais de perméabilité et des essais Lugeon ont été réalisés dans quelques puits de la région à l'étude. La position de ceux-ci dans la région d'étude est illustrée à la figure 4.7 par un cercle superposé à une croix. Une étude régionale de Nastev *et al.* (2001) sur la variation verticale de la transmissivité suggère que celle-ci diminue avec la profondeur. Cette diminution s'approche de 2 ordres de grandeur entre les essais les moins profonds et les plus profonds. Ceci viendrait appuyer l'hypothèse que la surface du roc fracturé en contact avec les sédiments serait la plus perméable et que l'écoulement diminuerait avec la profondeur. Cette diminution de la conductivité hydraulique avec la profondeur suggérerait que l'écoulement de l'eau souterraine à une profondeur de plus de 100 m serait limité. Par contre, Nastev *et al.* (2001) fait remarquer que ces conclusions sont tirées avec bien peu de données et que les données en profondeur (> 100 mètres) sont encore plus rares et appartiennent principalement aux dolomies qui sont considérées plus perméables.

Dans un deuxième temps, des essais ont été réalisés dans les trois puits situés dans la carrière (figure 4.12). Des essais de perméabilité ont été réalisés par Nastev. Ces essais ont été interprétés avec la méthode de Bouwer et Rice (1976). Les valeurs de transmissivité calculées pour chacun des trois puits sont présentées au Tableau 4.3. Des essais Lugeon ont aussi été réalisés dans chacun des trois puits avec un intervalle de 2.21 m entre les obturateurs. Les profils de transmissivité obtenus dans chacun des trois puits sont présentés à la figure 4.13 tandis que la transmissivité équivalente du puits (somme de chacun des intervalles du profil) est présentée au Tableau 4.3.

Ces profils montrent qu'une zone de grande transmissivité se situe à des profondeurs comprises entre 6 et 15 mètres. Une seconde zone de transmissivité plus élevée, mais d'épaisseur moins importante, est comprise entre les profondeurs de 22 et 24 mètres. Les zones comprises entre 15 et 22 m et entre 24 et 31 m ont une transmissivité d'environ trois ordres de grandeur inférieure aux zones à grande transmissivité.

4.6.3 Essais de pompage

Les seuls essais de pompage réalisés ont été effectués dans les puits de la carrière. La configuration des essais est basée sur les résultats obtenus par les essais de perméabilité, les essais Lugeon et les diagraphies géophysiques. Les diagraphies géophysiques ne sont pas

présentées dans ce rapport et le lecteur est référé à Etienne (2002) ou Lemieux *et al.* (2001) pour plus de détails. Les deux puits d'observation ont été équipés d'obturateurs pneumatiques afin d'isoler deux fractures horizontales. Celles-ci sont localisées à des profondeurs d'environ 14 et 23 mètres. Ces fractures ou plans de litage diagénétiques ont été mis en évidence par les diagrapies géophysiques et ont également été reconnues par les essais hydrauliques. Par exemple, sur les profils de transmissivité de la figure 4.13, les valeurs de transmissivité élevées situées aux profondeurs de 14 et 23 mètres sont attribuables à la présence de ces fractures horizontales. Pour le puits de pompage, seulement la fracture pompée a été isolée à l'aide d'obturateurs. L'essai de pompage détaillé dans cette section était concentré sur la fracture horizontale la plus profonde. Le puits de pompage est SE6 et les puits d'observation sont SE4 et SE5 (figure 4.12).

L'interprétation de ces essais a été effectuée basée sur plusieurs méthodes selon différents concepts d'aquifères. En premier lieu, les essais ont été analysés en considérant la fracture pompée comme un aquifère confiné avec les méthodes de Theis et de Cooper et Jacob. Ces méthodes permettent de calculer une valeur de transmissivité ainsi qu'une valeur d'emmagasinement de l'aquifère, donc de la fracture. Les essais ont également été interprétés en considérant la fracture comme un aquifère drainant avec les méthodes de Walton (1962), du point d'inflexion de Hantush (1956) et des courbes types de Hantush (1960) qui permettent de déterminer la transmissivité et l'emmagasinement de la fracture ainsi que la conductivité hydraulique et l'emmagasinement de l'aquitard. Le Tableau 4.4 résume les valeurs calculées selon les différentes méthodes et présente également la moyenne géométrique de chacun des paramètres.

Les valeurs de transmissivité obtenues par les différentes méthodes sont assez semblables et sont de l'ordre de $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Les valeurs d'emmagasinement calculées sont également très semblables selon les différentes méthodes avec une moyenne de 2.3×10^{-4} . Enfin la conductivité hydraulique de l'aquitard serait $1.9 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ et le coefficient d'emmagasinement de l'aquitard de 1.8×10^{-4} . Malgré que les valeurs calculées selon les différentes méthodes soient assez semblables, il n'en demeure pas moins que les méthodes d'interprétation ne sont valables que pour les hypothèses ou simplifications des méthodes d'analyse. Toutes les hypothèses ne sont pas respectées dans le cas de cet essai de pompage, comme par exemple la présence d'une base imperméable sous l'aquifère. Ces valeurs ne sont donc pas représentatives du milieu à l'étude.

4.6.4 Autres essais

Comme il a été mentionné dans l'introduction, la carrière se comporte comme un immense puits dans la région. Ainsi, puisqu'il y a plusieurs puits disponibles autour de la carrière, il est possible d'évaluer les propriétés hydrauliques de la dolomie avec une solution en régime permanent. L'équation de Thiem a été utilisée avec une hauteur de suintement de 10 m lorsque la carrière a été utilisée comme puits. Dans les autres cas, 2 puits alignés radialement ont été utilisés.

Le calcul a été effectué pour les 12 puits autour de la carrière. La moyenne géométrique de la conductivité hydraulique ainsi calculée serait de $5.9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

Finalement, d'autres observations peuvent fournir des informations importantes sur les propriétés hydrauliques sans toutefois les quantifier. Par exemple, un forage a été réalisé sur le plancher de la carrière à une profondeur de 17 m sous le niveau moyen de la mer. Lorsque le forage a atteint une profondeur d'environ 30 m sous le niveau moyen de la mer, l'eau a commencé à couler

naturellement du puits. Lorsque les tiges de forage ont été enlevées, l'eau sortait du puits jusqu'à une hauteur d'environ 4 mètres. La hauteur a ensuite diminué jusqu'à environ 1 m après 2 mois. Puisque la carrière est asséchée par pompage, lorsqu'un forage plus profond que celle-ci est réalisé, la surface piézométrique devrait correspondre à la base de la carrière. Par contre, les pressions accumulées en profondeur et qui ont produit les conditions artésiennes se sont formées à cause de la faible perméabilité verticale dans la dolomie. Cette observation suggère donc que le réseau de fractures verticales et horizontales a une très faible perméabilité verticale en profondeur.

4.7 Modélisation numérique

4.7.1 Objectifs

La modélisation numérique a été effectuée à petite échelle afin de reproduire l'essai de pompage réalisé dans la carrière et décrit à la section 4.6.3. Le but de cet exercice est de valider le modèle conceptuel déduit des travaux de terrain. De plus, puisque l'interprétation des essais de pompage a été réalisée avec des solutions analytiques dont les hypothèses ne correspondent pas aux conditions de terrain, les propriétés hydrauliques ainsi mesurées ne correspondent pas aux valeurs réelles. En reproduisant l'essai de pompage par modélisation numérique et en incorporant les fractures actives identifiées dans le forage, il sera alors possible de définir des valeurs pour les propriétés hydrauliques plus réalistes et représentatives du milieu à l'étude.

4.7.2 Modèle conceptuel

Le modèle conceptuel a été déduit des travaux de terrain, soit des relevés structuraux, des diagraphies géophysiques ainsi que des essais hydrauliques. Il se compose de différentes unités hydrostratigraphiques (figure 4.14) : un aquitard à la base du modèle où les fractures ne semblent pas contribuer à l'écoulement. Cet aquitard est surmonté d'une fracture de grande conductivité hydraulique considérée comme un aquifère confiné. Cette fracture est surmontée par un autre aquitard avec des propriétés hydrauliques mal définies. Enfin, un aquifère à nappe libre se retrouve en surface où les fractures horizontales à grande conductivité hydraulique sont connectées par des fractures verticales qui ont également une conductivité hydraulique élevée.

4.7.3 Simulations

Le code retenu pour la modélisation numérique des essais de pompage est FRAC3DVS (Therrien et Sudicky, 1996). Ce code permet la représentation explicite des fractures et l'aquifère et l'aquitard de dolomies sont traités comme des milieux poreux équivalents. Les détails concernant les équations d'états et les méthodes numériques utilisés par le modèle sont présentés dans Therrien et Sudicky (1996).

Le maillage utilisé est tridimensionnel tel que présenté à la figure 4.14. Celui-ci couvre une superficie d'environ 2500 m² (50 mètres x 50 mètres) et une profondeur de 35 mètres qui correspond à la section de l'aquifère soumis aux essais. La matrice de roches est discrétisée avec des prismes rectangulaires tri-dimensionnels, tandis que la zone de fractures horizontales très perméable est discrétisée avec des éléments planaires bi-dimensionnels. Les trois puits de l'essai (SE4, SE5 et SE6) sont représentés par des conduits uni-dimensionnels de grande perméabilité, selon la formulation présentée par Therrien et Sudicky (2000). Le maillage a été raffiné près des puits et de la zone de fracturation horizontale. L'aquifère de surface présenté à la figure 4.14

n'est pas inclut dans le modèle numérique car son influence sur les rabattements en profondeur a été jugée négligeable. Des conditions d'écoulement confiné ont été simulées.

Les conditions aux limites sont une charge constante sur chacun des côtés du modèle et un flux nul au sommet et à la base du modèle. Une charge initiale de zéro a été affectée à l'ensemble des nœuds du maillage pour les simulations, puisque seuls les rabattements étaient considérés. Enfin, l'essai simulé est le même que celui décrit à la section 4.6.3, soit le pompage de la fracture horizontale la plus profonde dans le puits SE6 avec observation dans chacun des intervalles dans les puits SE4 et SE5. Le débit de pompage est de $4.66 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pour une durée d'environ 8 heures.

Les paramètres qui ont été variés afin de caler le modèle sont l'ouverture de la fracture, la conductivité hydraulique des aquitards et l'emmagasinement des aquitards. L'emmagasinement de la fracture n'a pas été inclut dans cette analyse puisque son effet est négligeable sur l'écoulement.

La figure 4.15 présente les courbes de rabattement en fonction du temps mesuré pour le puits de pompage et les puits d'observation superposés aux meilleurs résultats simulés. Ces résultats ont été obtenus avec une valeur d'ouverture de fracture de $7 \times 10^{-4} \text{ m}$, une conductivité hydraulique de l'aquitard de $5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ et un coefficient d'emmagasinement de l'aquitard de 1×10^{-3} .

La conductivité hydraulique de l'aquitard est à l'extrémité supérieure des valeurs rapportées dans la littérature pour une dolomie non fracturée, soit 10^{-7} m/s . Puisque les essais Lugeon donnent des valeurs de conductivité hydraulique du même ordre pour l'aquitard et que celui-ci est fracturé, ce résultat est probablement représentatif d'un milieu poreux équivalent, soit une roche de très faible conductivité hydraulique recoupée par des fractures de conductivité hydraulique plus élevée. Il serait alors possible de reprendre les mêmes simulations en traitant l'aquitard avec un réseau de fractures discrètes et ainsi obtenir les mêmes résultats.

Il est donc possible de conclure que malgré le nombre important de fractures qui affectent le massif, chacune d'elles a un rôle différent dans l'écoulement de l'eau souterraine. Des fractures du même type peuvent contribuer ou non à l'écoulement. Ces observations suggèrent que le facteur qui est responsable de cette dualité est l'état des contraintes dans le massif.

4.7.4 Implications pour l'étude régionale

Les résultats de l'étude locale dans la carrière suggèrent que l'état des contraintes dans le massif est responsable de l'influence des fractures sur l'écoulement de l'eau souterraine. Price (1959) montre qu'une relation existe entre les contraintes verticales et latérales ou entre la profondeur et les contraintes latérales. Cette relation veut que les contraintes latérales augmentent avec la profondeur selon la relation suivante :

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{1}{m - 1} \sigma_z$$

où σ_x et σ_y sont les contraintes latérales, σ_z est la contrainte verticale et m est le nombre de Poisson. Ainsi, les fractures verticales seraient plus ouvertes en surface puisque les contraintes latérales sont plus faibles. Il en est de même pour les fractures horizontales.

Une étude de la fracturation a été réalisée pour l'ensemble de la région (Lemieux, 2000). Les résultats de cette étude montrent que la fracturation est, dans l'ensemble du territoire, semblable à celle décrite pour la carrière dans la section 4.4.3. Ainsi, l'espacement moyen des fractures, les distributions d'espacement et de longueur ainsi que le patron de fracturation sont tous semblables et c'est le nombre et l'orientation des différentes familles de fracture qui changent.

Puisque la fracturation est partout semblable dans la région, le modèle d'écoulement décrit à la carrière pourrait s'appliquer à l'ensemble de la région. Ainsi, l'ensemble des roches pourrait présenter des fractures plus ouvertes ou de plus grande conductivité hydraulique en surface qu'en profondeur tel qu'observé à la carrière. Il se pourrait par contre que, localement, des fractures de grande conductivité hydraulique soient présentes en profondeur, comme la fracture horizontale la plus profonde à la carrière Saint-Eustache.

Ces conclusions seraient en accord avec les travaux de Nastev *et al.* (2001) qui considèrent l'aquifère de roc fracturé en surface avec les dépôts meubles comme l'aquifère le plus perméable. Par contre, ce n'est pas parce que le roc est plus fracturé, mais plutôt parce que les contraintes ont permis une ouverture des fractures plus grande. L'augmentation des contraintes avec la profondeur pourrait également expliquer la diminution de la transmissivité avec la profondeur notée par Nastev *et al.* (2001). Ces conclusions mettent en évidence que l'observation du nombre de fractures pour un affleurement donné ou pour une lithologie donnée n'est pas une information suffisante pour déduire la perméabilité de l'unité. Il faudrait aussi observer le type de fracture, la géométrie des fractures et l'état des contraintes. De plus, les observations de fracturation devraient être combinées à d'autres méthodes telles que la géophysique et des essais hydrauliques.

4.8 Conclusion

Cette étude locale avait pour but d'évaluer l'aire d'alimentation et l'influence de la carrière sur les eaux souterraines de la région ainsi que de documenter le contexte physique et hydrogéologique de cette région. De plus, une étude ponctuelle à l'intérieur de la carrière a été réalisée pour déterminer l'influence des différents types de fractures sur l'écoulement de l'eau souterraine.

L'aire d'alimentation de la carrière a pu être évaluée à environ 133 km² à partir de la piézométrie de la région. La majeure partie de l'eau provient des sols en amont de la carrière mais une quantité importante d'eau provient également de la rivière des Mille-Îles. De plus cette aire couvre environ la même superficie que le bassin hydrologique de la rivière Chicot.

La carrière se retrouve dans une zone à nappe libre où une mince couche de till couvre les dolomies exploitées par la carrière. La zone d'alimentation couvre également une bonne partie de l'aquifère à nappe libre. Dans les autres endroits, l'aquifère est confiné par de l'argile. Les zones à nappe libre forment donc les zones préférentielles de recharge et les zones les plus vulnérables à la contamination de l'aquifère de roc fracturé. Les valeurs de recharge dans ces zones sont environ de 200 mm/an. Enfin, l'analyse des hydrogrammes de puits suggère que la nappe est généralement en progression depuis 1974.

L'analyse des essais hydrauliques réalisés dans la région suggère qu'une zone de conductivité hydraulique élevée se retrouve au nord et au centre de la région, soit dans les roches calcaires. Cette analyse suggère également que l'écoulement de l'eau souterraine à une profondeur de plus de 100 m serait limité et que l'aquifère est plus perméable au contact des sédiments, là où le roc est plus fracturé.

Dans un deuxième temps une étude ponctuelle a été réalisée pour évaluer le rôle des différentes fractures sur l'écoulement de l'eau souterraine. Cette étude a révélé la présence de trois types de fractures : des failles, des joints (fractures verticales) et des plans de litage diagénétiques (fractures horizontales). L'analyse statistique suggère que les fractures verticales se terminent sur les fractures horizontales. Les fractures verticales sont distribuées aléatoirement dans chaque banc de roche et se retrouvent également à une échelle plus grande dans plusieurs bancs de roches.

L'intégration des travaux de terrain (relevés structuraux, diagraphies géophysiques et essais hydrauliques) dans un modèle d'écoulement de l'eau souterraine a permis de conclure que même si le massif est affecté uniformément de fractures, celles-ci contribuent différemment à l'écoulement de l'eau souterraine selon leur position dans le massif. Les fractures verticales et horizontales en surface sont plus perméables qu'en profondeur et ce phénomène pourrait être attribuable aux contraintes qui sont plus importantes en profondeur qu'en surface.

Puisque la distribution des fractures dans la région est semblable à celle décrite dans la carrière, le modèle d'écoulement décrit pour la carrière pourrait alors s'appliquer à l'échelle régionale. Un relâchement des contraintes en surface ferait augmenter la conductivité hydraulique des fractures dans les premiers mètres de roche, ce qui pourrait expliquer la présence d'un aquifère très perméable. La présence de cet aquifère très perméable serait alors lié aux contraintes plutôt qu'à une augmentation de la fracturation tel que suggérée par Nastev *et al.* (2001). L'augmentation des contraintes avec la profondeur ferait diminuer la valeur de transmissivité tel qu'observé par Nastev *et al.* (2001). Ces conclusions mettent en évidence que l'observation du nombre de fractures n'est pas suffisant pour étudier la perméabilité de la formation rocheuse et qu'il faudrait aussi observer le type et la géométrie des fractures ainsi que l'état des contraintes. Les relevés de fracturation devraient idéalement être combinés à d'autres méthodes telles que la géophysique et des essais hydrauliques.

5. Étude détaillée de deux sites sélectionnés: Cas de Sainte-Anne-des-Plaines et de Saint-Janvier

Gilbert Karanta, Richard Martel, Miroslav Nastev, René Therrien, Daniel Paradis et René Lefebvre

5.1 Introduction

Au Québec, l'eau souterraine constitue la source privilégiée d'alimentation en eau pour près de 20% de la population. Les risques inhérents à la pollution de cette ressource sont en grande partie tributaires des activités humaines à la surface du sol. Afin de préserver la qualité de cette ressource au fil des années, il s'avère nécessaire d'avoir une connaissance du système d'écoulement de l'eau souterraine et de faire la délimitation autour des ouvrages de captage d'un périmètre, à l'intérieur duquel les sources potentielles de contamination sont gérées.

La présente recherche fait partie d'un vaste projet de cartographie hydrogéologique des aquifères de roc fracturé dans les Basses-Laurentides au nord-ouest de Montréal, dans les MRC de Thérèse-de-Blainville, Mirabel, Deux-Montagnes et Argenteuil (Savard et al., 2000). S'inscrivant dans les objectifs du projet, deux sites ont fait l'objet d'une étude hydrogéologique détaillée à l'échelle locale, soit les municipalités de Sainte-Anne-des-Plaines et de Saint-Janvier. L'emphase de cette étude a porté sur la délimitation des périmètres de protection des puits municipaux.

5.2 Problématique et objectif

La délimitation des formations aquifères, leur potentiel d'exploitation, leurs aires de recharge, la qualité de l'eau qui s'écoule, les liens avec les réseaux hydrographiques sont autant de renseignements qui s'avèrent essentiels à la gestion et à la protection des ressources en eaux souterraines. Les principaux objectifs de cette étude sont de définir le système aquifère des deux sites en question (écoulement, recharge, propriétés hydrogéologiques) et d'identifier le seuil d'information nécessaire qui assure une détermination réaliste des périmètres de protection pour des conditions représentant les aquifères captifs fracturés des Basses-Terres du Saint-Laurent. Le rapport présente les propriétés hydrauliques de l'aquifère, la modélisation effectuée à chaque site ainsi que l'application, la comparaison et la validation de différentes méthodes de détermination des périmètres de protection. Sept méthodes de délimitation de périmètres de protection rapprochés et éloignés sont évaluées et comparées entre elles dans ce rapport à chacun des sites étudiés.

5.3 Localisation

Le vaste projet de cartographie hydrogéologique des Basses-Laurentides couvre quatre Municipalités Régionales de Comté (MRC), soit Deux-Montagnes, Mirabel, Thérèse-de-Blainville et Argenteuil. Le présent rapport traite spécifiquement des sites de Saint-Janvier et de Sainte-Anne-des-Plaines qui font partie respectivement des MRC de Mirabel et de Thérèse-de-Blainville. Ces municipalités se trouvent à 35 km au nord-ouest de Montréal. Elles sont distantes l'une de l'autre de 10 km (figure 5.1).

5.4 Physiographie et hydrographie

La figure 5.1 montre que les deux sites à l'étude font partie de la région physiographique des Basses-Terres du Saint-Laurent qui est bordée au nord par le Bouclier Canadien et au sud par la rivière des Outaouais, le lac des Deux-Montagnes et la rivière des Mille-Îles. Le seul cours d'eau d'importance dans la région d'étude est la rivière Mascouche qui traverse Saint-Janvier et passe tout juste au sud de Sainte-Anne-des-Plaines. Les deux municipalités se trouvent alors dans le bassin hydrologique de la rivière Mascouche.

5.5 Données climatiques

Les précipitations pour les trente dernières années ont été mesurées à partir de deux stations météorologiques (Saint-Janvier et Mirabel) basées près des deux sites à l'étude. La moyenne est de 1028 mm par année dont 267 mm équivalent en hauteur d'eau sous forme de neige. La température moyenne annuelle est de 4.8°C (Environnement Canada, 1998).

5.6 Périmètres de protection

5.6.1 Définition et but

Selon l'EPA (Environmental Protection Agency, 1991), le périmètre de protection (PDP) définit un territoire, comprenant la surface et le sous-sol autour d'un ouvrage de captage (puits; sources), à travers lequel des contaminants peuvent migrer et atteindre l'eau souterraine pompée par le captage. Le périmètre de protection qui est défini à la surface du sol est la projection de ce volume. Le Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ, 1995) définit trois zones à l'intérieur du périmètre de protection : 1) le périmètre immédiat couvre une zone clôturée ayant un rayon minimal de 30 m et vise à protéger l'ouvrage de captage et ses équipements; 2) le périmètre rapproché correspond à une distance équivalente à un trajet de 60 jours de l'écoulement de l'eau souterraine, temps présumé nécessaire pour l'élimination d'une contamination bactérienne ou virale par atténuation naturelle, et qui ne doit pas être inférieure à 100 mètres à partir du captage; 3) le périmètre éloigné représente toute l'aire d'alimentation d'un ouvrage de captage et permet de le protéger contre les contaminants mobiles et persistants susceptibles d'être relâchés à l'intérieur du périmètre. Pour notre étude, les périmètres rapprochés et éloignés ont été comparés, le périmètre immédiat n'ayant pas d'objet de comparaison parce qu'il est défini par une distance fixe.

Le but de délimiter un périmètre de protection autour d'un ouvrage de captage est essentiellement d'estimer la région à travers laquelle l'eau souterraine s'écoule jusqu'à un récepteur (puits) afin que les sources de contamination à l'intérieur de ce territoire soient contrôlées.

5.6.2 Études antérieures

En 1991, l'EPA a publié un document traitant des méthodes de détermination des périmètres de protection dans les aquifères de roc fracturé. Six méthodes, allant de simples à complexes, sont présentées : 1) rayon fixe arbitraire; 2) rayon fixe calculé (équation du cylindre); 3) cartographie de la vulnérabilité; 4) cartographie hydrogéologique associée à des calculs de temps de transport (TOT) et des équations analytiques; 5) approche du temps de résidence; 6) modèle numérique de l'écoulement et du transport. Le document conclut que la cartographie hydrogéologique et la modélisation numérique sont les deux approches qui protègent le mieux les aquifères fracturés.

Bair et Roadcap (1992) ainsi que Marquis et Stewart (1992) ont fait des études comparatives de différents modèles d'écoulement dans les aquifères carbonatés fracturés aux États-Unis. Ils ont testé : 1) le modèle semi-analytique DREAM/WHPA; 2) le modèle analytique CAPZONE/GWPATH; 3) le modèle numérique MODFLOW/MODPATH. Les deux études ont démontré que le modèle analytique CAPZONE donne des résultats presque aussi précis que le modèle numérique MODFLOW à des coûts et à un niveau d'effort moindre (Bair et al., 1991). Le modèle semi-analytique, pour sa part, échoue dans sa tentative d'incorporer les caractéristiques majeures du système d'écoulement. Ce dernier introduit ainsi plus d'erreurs dans les prédictions que les modèles numérique et analytique.

5.6.3 Description des méthodes

Plusieurs méthodes de détermination des PDP existent et diffèrent tant par leur degré de complexité d'application que par leurs coûts. Une méthode est généralement plus précise si elle permet l'intégration des caractéristiques géologiques et hydrauliques de la région étudiée. Cependant, elle doit aussi être relativement facile d'application et à coût raisonnable pour les municipalités. Le modèle idéal de délimitation des PDP est celui qui a la capacité de simplifier le système d'écoulement tout en préservant ses caractéristiques géologiques et hydrogéologiques (Bair et Roadcap, 1992). À partir d'une revue d'études antérieures (Bair et Roadcap, 1992; Bradbury et Muldoon, 1994; Paradis, 2000), sept méthodes de délimitation des PDP ont été sélectionnées pour la présente étude. Les méthodes évaluées sont classées de simples à plus complexes d'application au Tableau 5.1. Les méthodes 1 et 3 sont propres au périmètre de protection rapproché, alors que les méthodes 2 et 5 servent à la délimitation du périmètre éloigné. Les caractéristiques des méthodes 4, 6 et 7 permettent la délimitation des périmètres autant éloignés que rapprochés.

Équation du cylindre

Le rayon fixe calculé (figure 5.2), ou l'équation du cylindre, utilise l'équation volumétrique de l'écoulement pour calculer un rayon fixe autour d'un puits à l'intérieur duquel l'eau s'écoule dans un intervalle de temps spécifié. Le rayon définit une isochrone circulaire du temps de transport qui, faisant toute l'épaisseur de l'aquifère, délimite un cylindre dont le volume des pores est égal au volume d'eau pompée sur une période de temps définie (EPA Handbook, 1994) de 60 jours.

L'équation est :

$$Qt = n\pi Hr^2 \quad (1)$$

où :

Q = débit du pompage

t = temps de transport

n = porosité de l'aquifère

H = longueur de la crépine ou section ouverte

r = rayon du cylindre

Cette méthode est appropriée pour les aquifères confinés sans infiltration provenant d'une couche sus-jacente. Elle exige aussi un gradient régional négligeable (< 0.001), car une valeur plus élevée se traduirait par une zone d'influence qui ne serait pas circulaire.

Équation de l'écoulement uniforme

Développée par Forchheimer en 1930, cette méthode assume un aquifère bidimensionnel en plan et d'épaisseur constante uniforme (figure 5.3). Elle approxime un milieu poreux équivalent. L'équation générale des limites de l'aire qui produit un écoulement vers le puits de pompage est (Todd, 1980) :

$$\frac{-y}{x} = \tan \left[\left(\frac{2\pi Kbi}{Q} \right) y \right] \quad (2)$$

où x et y sont les coordonnées spatiales en plan, K est la conductivité hydraulique, b est l'épaisseur saturée de l'aquifère et i est le gradient hydraulique avant pompage. L'équation de l'écoulement uniforme s'applique aux aquifères confinés et ne tient pas compte de l'hétérogénéité et de l'infiltration verticale venant d'une couche sus-jacente. L'avantage de cette méthode est la facilité d'application qui réduit considérablement les données requises et le travail sur le terrain.

Calcul du temps de transport (Bear et Jacob, 1965)

Cette méthode sert à délimiter une zone de transport autour d'un puits en pompage. Elle est applicable dans le cas où le gradient de la surface potentiométrique est prononcé. Pour un temps déterminé (t), un point d est positionné en amont de l'écoulement, dans l'axe d'une ligne parallèle au mouvement de l'eau souterraine, à partir du puits de pompage. L'équation est la suivante :

$$t = \frac{nd}{Ki} - \frac{Qn}{2\pi K^2 i^2 b} \ln \left[1 + \left(\frac{2\pi Kbid}{Q} \right) \right] \quad (3)$$

Le point d délimite un rayon d'arc de cercle où le puits de pompage en est le centre et où la zone d'alimentation tracée avec l'équation de l'écoulement uniforme, décrite précédemment, forme les limites latérales du périmètre de protection (figure 5.4). L'équation ne tient pas compte de la dispersion hydrodynamique ni des processus de retard. Les calculs de temps de transport appliqués aux aquifères hétérogènes risquent de sous évaluer les aires de protection, car le facteur de dispersion dû aux hétérogénéités de perméabilité est plus important que le facteur de retard dans ces conditions (EPA, 1994). Cette méthode a l'avantage de limiter en amont de l'écoulement le périmètre de protection dans les régions où la zone d'alimentation est trop grande.

Méthode hybride (3A2E)

Cette méthode est une combinaison des méthodes simples et de la cartographie hydrogéologique (Paradis, 2000). Elle dérive d'une méthode utilisée au Massachusetts (EPA, 1987). La délimitation du périmètre se fait en cinq étapes successives (figure 5.5) :

1. Détermination de la limite avale : les équations de Forchheimer, la loi de Darcy, Bear et Jacob et la cartographie hydrogéologique peuvent être utilisées;

2. Détermination de la limite amont : les équations du temps de transport, la loi de Darcy, Bear et Jacob (pour le périmètre rapproché) et la cartographie hydrogéologique (pour le périmètre éloigné);
3. Détermination de l'aire de protection totale : l'équation d'infiltration pour le périmètre éloigné et l'équation du cylindre pour le périmètre rapproché;
4. Détermination de la direction de l'écoulement souterrain : utilisation de la cartographie hydrogéologique ou la mesure de niveau d'eau dans au moins trois puits d'observation;
5. Délimitation du périmètre de protection : ellipse dessinée d'une aire égale à celle calculée en 3, où l'un de ses axes est orienté dans la direction de l'écoulement et où les extrémités correspondent aux limites aval et amont.

Cartographie hydrogéologique

Cette méthode assume un aquifère bidimensionnel qui approxime un milieu poreux équivalent. La cartographie hydrogéologique comprend les caractéristiques physiques et hydrologiques qui contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine. Les frontières physiques incluent les failles majeures, les contacts géologiques ainsi que les structures topographiques qui correspondent à une limite de partage des eaux. Les frontières hydrologiques comprennent des cours d'eau tels que des rivières, des lacs et des canaux (EPA, 1991). La méthode utilise ces frontières pour construire la carte piézométrique servant à délimiter la zone d'alimentation qui correspond à tout l'écoulement horizontal de l'eau souterraine qui est interceptée par un puits sur une période de temps infinie (figure 5.6). Cette méthode est relativement simple d'application, mais nécessite beaucoup de données de terrain et de ressources financières pour construire une carte piézométrique représentative du milieu. La cartographie hydrogéologique est un bon complément aux méthodes simples exposées plus haut et s'avère un outil nécessaire pour des méthodes plus complexes telles que les modèles numériques. C'est la méthode la plus précise et sert de base de comparaison pour l'application des méthodes simples, hybrides, analytiques et numériques. La carte piézométrique est valable pour des conditions spécifiques de pompage au moment du relevé de la piézométrie.

Modèle analytique CAPZONE

Bair *et al.* (1991) ont développé un modèle analytique permettant de construire des modèles d'écoulement en deux dimensions caractérisés par un milieu homogène et isotrope dans des conditions d'aquifères confinés, fuyants ou à nappe libre. CAPZONE calcule le rabattement pour des points de maillage défini par l'utilisateur en appliquant l'équation de Theis (1935) pour les aquifères confinés et non confinés. Pour les aquifères fuyants, l'équation de Hantush-Jacob (1955) est employée. La distribution calculée du rabattement à l'intérieur du domaine modélisé peut se superposer à la carte piézométrique de la région pour inclure l'effet de non-uniformité ou d'uniformité de l'écoulement. Le programme de traçage de particules GWPATH est nécessaire en vue de circonscrire les zones d'alimentation.

Modèle numérique MODFLOW

MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1988) est un modèle d'écoulement par différences finies basé sur la discrétisation d'un domaine en un maillage déterminé par l'utilisateur et résout les équations gouvernant l'écoulement saturé aux différents nœuds du maillage. Le modèle offre la

possibilité de simuler l'écoulement en régime permanent ou transitoire; pour des conditions d'aquifères confinés, non confinés ou fuyants; avec des puits de pompage ou d'injection; il permet des variations spatiales dans les paramètres hydrauliques; et permet aussi d'imposer des charges et des flux. Le modèle calcule les charges hydrauliques, les flux et effectue le bilan de masse du système. Afin de délimiter la zone d'alimentation d'un puits, le programme de traçage de particules MODPATH (Pollack, 1989) utilise un schéma semi-analytique de traçage avant ou inverse pour simuler le transport advectif de solutés basé sur les résultats des simulations en régime permanent ou transitoire obtenus par MODFLOW (figure 5.7).

5.7 Comparaison des périmètres de protection

L'approche utilisée pour la validation des méthodes décrites dans la section précédente consiste à faire le choix de celle qui représente le mieux les conditions hydrogéologiques du site et de l'utiliser comme base de comparaison. Pour le périmètre rapproché, la modélisation numérique avec MODFLOW est la méthode la plus précise parce qu'elle intègre le mieux les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère. C'est donc la base de comparaison pour les autres méthodes. Pour ce qui est du périmètre éloigné, le standard de comparaison est la cartographie hydrogéologique, car elle incorpore le mieux les caractéristiques hydrauliques, géologiques et hydrogéologiques du domaine d'étude (Paradis, 2000). L'étude de comparaison pour les périmètres éloignés est faite principalement dans la région la plus vulnérable à la contamination : la zone de recharge. Elle est vulnérable, car elle n'est pas protégée naturellement par une couche imperméable d'argile.

5.7.1 Périmètres éloignés

L'étude comparative des méthodes pour les périmètres éloignés se fait de deux façons. En premier lieu, l'aire totale du PDP obtenu de chaque méthode est comparée avec celle de la cartographie hydrogéologique. Deuxièmement, la zone vulnérable à la contamination, qui représente l'intersection entre la zone de recharge et le périmètre délimité par la cartographie hydrogéologique, est comparée avec l'intersection de chacune des autres méthodes. La validation des méthodes sera basée principalement sur ce deuxième type de comparaison.

5.7.2 Périmètres rapprochés

L'aire à protéger calculée par MODFLOW/MODPATH est basée sur un temps de transport de 60 jours de l'écoulement de l'eau souterraine. Puisque l'aquifère se trouve en conditions captives pour les périmètres rapprochés, il est beaucoup moins critique de bien les décrire que si l'aquifère se trouvait en conditions de nappe libre. Les périmètres de protection rapprochés serviront plutôt à l'installation de puits de surveillance dans le but de prévenir toute contamination éventuelle du captage.

5.8 Étude hydrogéologique à Sainte-Anne-des-Plaines

La présente section décrit l'étude hydrogéologique détaillée de la région de Sainte-Anne-des-Plaines. La géologie, l'hydrogéologie, les propriétés hydrauliques de l'aquifère, la modélisation numérique ainsi que l'étude comparative des méthodes de détermination des périmètres de protection sont développées. Une conclusion sur les méthodes appliquées complète la section.

5.8.1 Géologie

Le socle rocheux de la région de Sainte-Anne-des-Plaines consiste en des formations de roches sédimentaires constituées de dolomie, de calcaire et de shale. Ces assises rocheuses de l'Ordovicien inférieur et moyen font partie respectivement des groupes de Beekmantown, de Chazy et de Black River (figure 5.8). Les dépôts meubles du Quaternaire qui recouvrent le socle rocheux sont constitués principalement d'argile et de sable issus de la Mer de Champlain. On retrouve aussi, juste au-dessus du socle rocheux, un dépôt de till glaciaire (figure 5.9).

Au puits de pompage P8 de la municipalité, les dépôts meubles sont constitués à partir de la surface de 9.4 m d'argile, suivi de 1.5 m de till argileux qui recouvrent le calcaire du Chazy fracturé sur 5.8 m et non fracturé sur les 2.7 m suivants. Le puits est crépiné sur 4.9 m et atteint au total 19.5 m de profondeur.

Lemieux et al. (2001) ont cartographié les fractures et les joints de la région. Les fractures et les joints subverticaux principaux répertoriés dans la région ont généralement une orientation nord-ouest/sud-est. Les plans de litage des formations de roc sédimentaire constituent également un réseau de fractures subhorizontales important.

5.8.2 Hydrogéologie

L'aquifère exploité par la municipalité de Sainte-Anne-des-Plaines est constitué d'horizons calcaires très fracturés dans les premiers mètres du socle rocheux associés à une mince couche de till (un à trois mètres d'épaisseur) les recouvrant. L'eau y circule principalement par un réseau très dense de fractures (porosité secondaire). La conductivité hydraulique primaire de la matrice est faible et sa porosité efficace est négligeable. L'aquifère est confiné pratiquement partout sur le territoire de la municipalité par une couche argileuse (aquitard) variant de 11 à 18 mètres d'épaisseur (figure 5.10). La zone de recharge (région 3 en vert à la figure 5.9), qui correspond à un sommet topographique de la région, se situe tout juste au nord de la terrasse de Rigaud (5 km au nord de la ville), où l'on retrouve du roc affleurant, un mince dépôt de sable sur roc ainsi que du till sur roc (figure 5.9). Le réseau hydrographique de la région a peu de contact hydraulique avec l'aquifère; les cours d'eau coulent principalement sur l'argile. L'écoulement de l'eau souterraine se fait du nord-ouest vers le sud-est avec un gradient hydraulique de l'ordre de 0.003 (figures 5.11 et 5.12).

L'aquifère de Sainte-Anne-des-Plaines est limité hydrauliquement au nord-ouest par le Bouclier Canadien dont la conductivité est faible, créant ainsi une barrière hydraulique à l'écoulement de l'eau souterraine. La base de l'aquifère se situe à une profondeur approximative de 75 mètres à partir du toit de l'aquifère, là où des essais lugeons ont montré une très faible transmissivité.

La population de la municipalité de Sainte-Anne-des-Plaines s'approvisionne à 100% à partir de l'eau souterraine. Les principaux utilisateurs de cette ressource sont : la municipalité même qui, par un réseau d'aqueduc, alimente une partie de la ville; les résidents qui se trouvent à l'extérieur du circuit d'aqueduc et qui possèdent des puits privés; les agriculteurs qui utilisent l'eau souterraine pour l'arrosage des terres et l'élevage du bétail; les industries dans les procédés de transformation des matières premières. La principale activité humaine potentiellement contaminante pour l'eau souterraine dans la région est l'épandage de fertilisants. Cependant, compte tenu que l'aquifère est protégé par une épaisse couche d'argile, qui a la propriété de

limiter l'infiltration de l'eau de surface et des contaminants vers l'aquifère, les risques de contamination de l'aquifère au roc sont faibles. Par contre, les puits existants, en fonction ou abandonnés, peuvent constituer des points d'entrée de contaminants dans l'aquifère. Il est donc impératif que les puits soient bien installés et scellés. Tous les puits abandonnés devraient également être cimentés. La région la plus vulnérable de l'aquifère est la zone de recharge où le roc affleure ou est recouvert d'une mince couche de till et/ou de sable. À cet endroit, aucune activité humaine répertoriée ne risque de contaminer l'eau souterraine.

Les tests sur la qualité de l'eau souterraine au puits de pompage de la municipalité ont démontré qu'elle respecte les normes gouvernementales provenant du règlement sur l'eau potable (MENVQ, 2001 et SCFP, 2001). Cependant, la concentration de sulfures dépasse la norme de 0.05 mg/l avant traitement. Notons aussi l'alcalinité totale qui se trouve à la limite supérieure de la norme gouvernementale.

5.8.3 Propriétés hydrauliques

Études antérieures

Deux études hydrogéologiques ont déjà été réalisées à Sainte-Anne-des-Plaines aux puits municipaux P8 et 3/90 (Montée Barrette) en vue de l'exploitation de la ressource en eau souterraine. Des essais de pompage de 72 heures ont eu lieu afin de déterminer les propriétés hydrauliques de l'aquifère. Pour le puits 3/90 (Barrette), l'étude a été entreprise par Dessau (1991) qui a calculé une transmissivité de 2.8×10^{-2} m²/s (conductivité hydraulique $K=9.3 \times 10^{-3}$ m/s) et un emmagasinement de 1.3×10^{-4} . Au puits P8, l'étude a été réalisée par HFontaine (1979) qui a estimé la transmissivité à 7.7×10^{-3} m²/s ($K=2.6 \times 10^{-3}$ m/s).

Essai de pompage

Dans le cadre de cette étude, un essai de pompage a été réalisé au puits P8 de la municipalité. Huit capteurs de pression ont été installés dans des puits d'observation situés à des distances variant entre 3 m et 1970 m. Le pompage a duré sept jours sans interruption à un débit moyen de 2.3×10^{-2} m³/sec. La remontée a été suivie pendant les sept jours suivant l'arrêt du pompage. Les données de rabattement et de remontée de l'eau souterraine ont été analysées par le logiciel Aquifertest 2.54 (Roehrich, 1995). Les méthodes de Theis (1935) et de Cooper-Jacob (1946) ont été employées parce que les courbes de rabattement/remontée en fonction du temps ont une allure similaire aux courbes-types, excepté pour la phase initiale du pompage (les premières minutes) dont les points forment plutôt un segment de droite. La méthode de Gringarten-Witherspoon (1972) a aussi été utilisée, considérant que l'essai de pompage a eu lieu dans le roc fracturé. Cette méthode permet de représenter l'aquifère comme une fracture verticale simple. Les points de mesure des niveaux d'eau en fonction du temps correspondent aux courbes-types, incluant les premières minutes du pompage. Les valeurs de conductivité hydraulique et d'emmagasinement de l'aquifère sont déterminées en faisant la moyenne géométrique de chacune des valeurs calculées aux puits d'observation. La conductivité hydraulique est estimée à 4.5×10^{-3} m/s alors que l'emmagasinement est de 9.6×10^{-4} (figure 5.13). La valeur de conductivité hydraulique est très élevée et est comparable à un aquifère de gravier. L'aquifère de calcaire de Sainte-Anne-des-Plaines est donc un excellent conducteur pour l'eau souterraine. Les courbes de rabattement révèlent une possible limite imperméable de l'aquifère: En effet, la fin du pompage est caractérisée par un rabattement plus important par rapport aux courbes-types. Les calculs effectués dans le but de localiser la limite en question ont été infructueux. Cette limite est

possiblement l'effet du puits Barrette et est situé à 1890 m à l'ouest du puits de pompage P8, qui pompe en permanence.

Essai à choc hydraulique

L'essai de perméabilité permet avec de faibles moyens d'évaluer la conductivité hydraulique de l'aquifère à l'échelle du puits. Le test consiste à modifier soudainement le niveau d'eau d'un puits. Dans notre étude, le changement de niveau a été provoqué par la mise sous pression de l'air au-dessus du niveau d'eau. Une fois la pression relâchée, un capteur de pression note la remontée de l'eau en fonction du temps. La conductivité hydraulique a été obtenue en utilisant les méthodes de Bouwer et Rice (1976) et de Van der Kamp (1976) et Uffink (1984). Cette dernière méthode est employée dans les cas où les variations de la charge hydraulique de la nappe donnent une solution oscillatoire. Deux essais ont été réalisés aux puits P08 et P9, tout près du site de l'essai de pompage. La conductivité hydraulique évaluée par cette méthode est inférieure à celle trouvée par l'essai de pompage. La conductivité hydraulique moyenne est de 7.8×10^{-4} m/s, soit presque six fois inférieure à celle évaluée par l'essai de pompage (figure 5.13). Cela s'explique par une variation locale de perméabilité. Aussi, l'essai à choc hydraulique se fait sur une infime partie de l'aquifère alors que l'essai de pompage sollicite l'aquifère sur une grande échelle et l'hétérogénéité (fractures, variations de la porosité) a donc moins d'influence à grande échelle.

Essai Lugeon

L'essai Lugeon (essai d'injection à charge constante) permet, à l'aide d'obturateurs et d'équipements spécialisés, de mesurer la transmissivité à différentes profondeurs dans un puits ouvert au roc (Nastev et al., 2000). Ainsi, le profil de la transmissivité de l'aquifère en fonction de la profondeur peut être tracé. Il est alors possible de repérer dans l'aquifère les horizons plus perméables qui contribuent le plus à l'écoulement de l'eau souterraine. Un essai a été réalisé au puits P9, situé à 79 m au sud du puits de pompage P8. La figure 14 montre qu'à 40 m (21 m de profondeur), 21 m et 9 m les transmissivités sont plus importantes (0.0003 à 0.001 m²/sec) que le reste du profil. Il existe donc des réseaux de fractures à différentes profondeurs en plus des premiers mètres du roc fracturé qui n'ont pas été mesurés et qui forment l'horizon le plus transmissif de l'aquifère (0.014 m²/sec selon l'essai de pompage). Les valeurs de transmissivité des essais Lugeon sont encore plus variables que les essais à choc hydraulique ou que les essais de pompage, car elles représentent des valeurs à l'échelle des fractures.

5.8.4 Modélisation numérique

Objectifs

La modélisation numérique sert à représenter les conditions géologiques et hydrogéologiques du terrain et à reproduire les diverses sollicitations imposées aux aquifères. Elle sert, entre autres, à prédire le comportement des systèmes hydrogéologiques en présence de pompage. Elle permet aussi de valider les propriétés des matériaux et les limites du système d'écoulement provenant de données recueillies sur le terrain. La modélisation constitue le meilleur outil de prédiction qui tient compte de la complexité des aquifères. Dans la présente étude, la modélisation numérique est l'une des sept méthodes qui a été appliquée au site de Sainte-Anne-des-Plaines en vue de l'étude comparative des PDP. Pour les périmètres rapprochés, la modélisation numérique sert de base de comparaison pour valider les méthodes. C'est la méthode la plus précise et c'est

pourquoi elle constitue la méthode étalon, alors que pour les périmètres éloignés, c'est la cartographie hydrogéologique qui est la méthode étalon et sert à valider la modélisation.

Modèle conceptuel

Le modèle conceptuel de l'aquifère de Sainte-Anne-des-Plaines est séparé en trois couches divisées en deux zones (figure 5.15). Cette division est la représentation du contraste de perméabilité entre la formation Carillon (Groupe de Beekmantown) en association avec les roches calcaires du Chazy, et celle des roches dolomitiques de la formation de Beauharnois du Groupe de Beekmantown. Les essais lugeons ont permis d'identifier trois couches dans le roc ayant des transmissivités différentes. La première couche, d'une épaisseur de 3 mètres, intègre les unités stratigraphiques les plus transmissives: le till perméable et le sommet très fracturé du roc. La seconde couche possède une épaisseur de 50 m et sa perméabilité est nettement inférieure à la première couche, alors que la dernière est la moins perméable et possède une épaisseur de 25 m. Enfin, sous la dernière couche se trouve la base imperméable de l'aquifère (l'aquitard). La figure 5.15 présente les valeurs finales après calage de chacune des couches du modèle numérique. Les valeurs de conductivité hydraulique et d'emmagasinement sont basées sur les essais de pompage et Lugeon. La valeur de porosité pour la couche 1 est tirée de la littérature et a été déterminée à partir de la conductivité hydraulique qui a une valeur comparable à ce qui est retrouvé dans un gravier. Pour les couches 2 et 3, la porosité est déterminée par l'équation d'ouverture d'une fracture équivalente à la conductivité hydraulique et tient compte des familles de fractures, de leur fréquence et de leur espacement. Les couches de sable et d'argile saturées en eau sur le terrain n'ont pas été ajoutées au modèle. Elles ont plutôt été substituées par une recharge équivalente imposée à la surface de la première couche.

Choix du code

La modélisation numérique a été réalisée en utilisant MODFLOW/MODPATH (McDonald et Harbaugh, 1988) qui est un modèle par différences finies qui permet de simuler divers types d'aquifères. MODPATH effectue le traçage de particules afin de déterminer le champ d'écoulement de l'eau souterraine et permet de circonscrire l'aire d'alimentation d'un puits en pompage.

Conditions aux limites, conditions initiales et sollicitations

La région de Sainte-Anne-des-Plaines a été modélisée sur une superficie de 102.6 km². Les limites du modèle ont été déterminées à partir des cartes piézométrique et géologique du site d'étude. Cinq limites cernent la région (figure 5.16) : deux limites à flux nul parallèles à l'écoulement situées au nord-est et au sud-ouest (limites 1 et 2); deux limites à charge constante au sud, l'une qui est concordante avec une isopièze (limite 3), l'autre avec une ligne d'écoulement (limite 4); et une limite à flux nul au nord-ouest qui correspond à la frontière entre les roches sédimentaires des Basses-Terres et les roches ignées/métamorphiques du Bouclier Canadien (limite 5). Cette dernière limite suppose qu'il n'y a pas d'écoulement significatif provenant de l'infiltration du Bouclier. Cette condition peu réaliste a été corrigée en imposant un flux sous forme de recharge (536 mm/an) à chacune des cellules composant la limite 5. Les valeurs de recharge imposées au modèle, pour simuler l'apport en eau provenant des précipitations ainsi que des couches de sable et d'argile, proviennent de l'évaluation faite par Hamel (2002). Des valeurs élevées de recharge se trouvent au nord-ouest du modèle (420 mm/an), là où l'aquifère est non confiné, alors que les valeurs pour les régions couvertes par

l'argile sont moindres (8 mm/an). Le débit du pompage au puits P8 est de 2.3×10^{-2} m³/s. Le modèle inclut aussi le puits de la municipalité (Barrette) qui pompe en permanence à un débit de 4.4×10^{-2} m³/min. La modélisation de la région d'étude s'est faite en deux étapes. Le calage de la première modélisation s'est fait en régime permanent en utilisant une charge initiale sur tout le domaine et en incorporant le pompage du puits Barrette. La deuxième modélisation a été réalisée en régime permanent en incorporant le puits P8 afin de délimiter les périmètres rapprochés et éloignés des puits.

Calage

Afin de caler le modèle, les paramètres de conductivité hydraulique, d'emménagement, de recharge ainsi que du flux au nord-ouest ont fait l'objet d'ajustements. Toutefois, les trois premiers paramètres sont demeurés sensiblement les mêmes. Puisque le flux au nord-ouest ne peut être évalué sur le terrain, c'est ce paramètre qui a varié le plus et qui a permis de caler le modèle. La charge simulée (provenant de la modélisation en régime transitoire de 7 jours) en fonction de la charge observée montre une distribution assez régulière des valeurs de part et d'autre du segment de droite (figure 5.17). L'erreur moyenne est de -0.46 m; l'erreur moyenne absolue est de 0.93 m; et l'erreur sur la racine carrée de la moyenne est de 1.19, ce qui représente moins de 5% d'erreur entre les charges simulées et les charges observées. Il n'y a donc pas d'erreur systématique, ce qui confirme que la modélisation représente adéquatement les conditions du terrain.

Résultats des simulations et limites du modèle numérique

La figure 5.16 montre en plan le domaine de la modélisation à Sainte-Anne-des-Plaines. L'aire d'alimentation est tracée pour les deux puits en pompage à partir de la modélisation avec MODFLOW et du traçage de particules avec MODPATH en régime permanent. L'aire d'alimentation du puits P8 couvre une superficie de 6.5 km² alors que celle du puits Barrette est de 10.2 km², soit 58% de plus que le puits P8. Puisque les paramètres de la modélisation sont les mêmes pour les deux puits, on constate bien l'effet du débit de pompage au niveau de l'aquifère. Ce dernier ayant un champ de charge relativement uniforme, les deux aires d'alimentation ne se touchent pas. Les aires d'alimentation se dirigent vers le nord-ouest et s'arrêtent à la limite du Bouclier Canadien. Plusieurs combinaisons de valeurs des paramètres sont possibles lors du calage du modèle, pouvant ainsi donner plusieurs résultats réalistes. Par contre, leurs variations doivent demeurer à l'intérieur d'une fourchette de valeurs déterminée à partir des données recueillies sur le terrain. Ce qui est présenté comme résultat est la représentation d'une réalisation possible.

5.8.5 Délimitation de périmètres de protection

Périmètres éloignés

Équation de l'écoulement uniforme

Avec 69% (puits P8) et 62% (puits Barrette) d'aire non protégée (Tableau 5.2) par rapport à la méthode étalon (cartographie hydrogéologique en rouge aux figures 5.18 et 5.19), l'équation de l'écoulement uniforme (contour noir) constitue la méthode qui protège le moins bien l'aquifère de roc fracturé. De plus, la zone la plus vulnérable (en brun dans la zone de recharge) n'est absolument pas couverte au puits P8 (0%), alors qu'au puits Barrette (figure 5.19) seulement 7% de l'aire de recharge est protégée. Cette piètre performance s'explique par l'échec de cette méthode à tenir compte des variations spatiales de l'écoulement. L'application au site de Sainte-

Anne-des-Plaines de cette méthode pour assurer la protection des puits pourrait causer une dégradation à long terme de la qualité de l'eau souterraine compte tenu que la zone de recharge se trouve en secteur agricole.

MODFLOW/MODPATH

La modélisation numérique (contour bleu) échoue à son tour dans la tentative de protéger adéquatement la zone de recharge. Bien qu'en épousant assez fidèlement la forme du périmètre étalon, le contour tracé par cette méthode dévie vers l'ouest jusqu'à la limite de l'aquifère où ses limites latérales se rejoignent. Cette méthode ne couvre que 27% (puits P8) et 54% (Barrette) de la zone de recharge vulnérable alimentant ces puits.

CAPZONE/GWPATH

Les résultats du modèle analytique sont meilleurs que ceux de la modélisation numérique. En effet, les périmètres issus de CAPZONE (contour en mauve) couvrent une superficie commune avec la zone de recharge de 35% à 122% plus grande qu'avec MODFLOW. Au puits P8, 60% de la zone est couverte alors qu'au puits Barrette une valeur non négligeable de 73% est atteinte. La méthode, bien que donnant des résultats plus concluants que la précédente, est beaucoup moins précise. En fait, elle ne considère qu'une seule couche dans le modèle dont la base imperméable ne peut faire l'objet de variations spatiales en termes d'élévation. Aussi, bien que l'entrée des données soit facile et que la quantité d'informations nécessaires à la modélisation avec CAPZONE soit minime (comparé à MODFLOW), la conception de la discrétisation de la région d'étude s'avère une tâche ardue. L'espacement des nœuds du maillage doit demeurer constant et dans le cas où la région d'étude est très vaste, les dimensions des cellules s'avèrent très grandes puisqu'il y a une limitation dans le nombre d'éléments dans le maillage. Il y a alors généralisation des conditions hydrologiques en périphérie des puits, là où les variations de la charge hydraulique sont les plus importantes. De plus, CAPZONE ne permet pas d'imposer des limites hydrauliques directement sur le domaine. Cela se fait plutôt par la méthode des puits image qui est un concept dont l'application est complexe et pas aussi précise que la modélisation numérique.

Méthode hybride 3A2E

Ayant pour les puits P8 et Barrette plus de 97% d'aire commune avec la méthode de la cartographie hydrogéologique, la méthode 3A2E (contour vert) est la plus efficace pour la protection de l'aquifère de roc fracturé. De plus, elle couvre 99% (P8) et 100% (Barrette) de la zone de recharge. Malgré le fait qu'elle tend à surprotéger la région plus que les autres méthodes (plus de 100% d'aire trop protégée), cette méthode constitue celle qui préservera le mieux la qualité de l'eau souterraine si des mesures de contrôle des sources de contamination sont appliquées à l'intérieur de ce périmètre.

Périmètres rapprochés

Équation du cylindre

C'est la méthode la moins précise d'entre toutes, car le rayon calculé à partir de l'équation (contour jaune à la figure 5.20) ne tient pas compte de l'écoulement de l'eau souterraine. En effet, dans le cas des deux puits de la région, le périmètre tend à surprotéger en aval, alors qu'en amont, il n'en assure pas complètement l'aire à protéger, spécialement dans le cas du puits P8. Le périmètre défini pour ce dernier couvre 77% de l'aire étalon calculée par

MODFLOW/MODPATH (Tableau 5.3). Toutefois, au puits Barrette, avec 96% d'aire commune, c'est la méthode qui l'englobe le mieux.

Équation du temps de transport

Le périmètre de protection issu de l'équation de Bear et Jacob (contour brun) couvre celui de la méthode étalon avec des valeurs de 86% (P8) et 85% (Barrette). Par contre, dans les deux cas, la méthode tend à surprotéger plus que les autres méthodes en amont avec 85% et 118% d'aire trop protégée, pour les puits P8 et Barrette respectivement.

Méthode hybride 3A2E

La méthode hybride (contour vert) ne constitue pas la méthode qui protège le mieux l'aire délimitée par la modélisation numérique dans le cas des deux puits. Bien qu'obtenant des valeurs raisonnables de 80% (puits P8) et de 86% (puits Barrette), les périmètres de protection tendent à surprotéger, comme l'équation du temps de transport, l'aquifère en amont de l'écoulement. Cela est dû au fait que la limite amont de la méthode hybride utilise justement l'équation de la méthode précédente.

CAPZONE/GWPATH

Pour le puits P8, le modèle analytique (contour mauve) est la méthode la plus précise, car elle protège à 100% le périmètre étalon. En ce qui concerne le puits Barrette, cette méthode ne se démarque aucunement des autres. En fait, c'est la méthode la moins précise, couvrant seulement 79% du territoire étalon.

5.8.6 Conclusion

Cinq méthodes ont été appliquées à chacun des puits municipaux de Sainte-Anne-des-Plaines, autant pour les périmètres rapprochés que pour les périmètres éloignés. Les méthodes employées dans le cadre de cette étude comparative varient de simples d'application à très complexes. Les méthodes les plus complexes ne sont pas nécessairement les plus précises. Ceci est le cas pour les périmètres rapprochés où les méthodes CAPZONE et équation du cylindre arrivent au premier rang (Tableau 5.4), surclassant la méthode hybride 3A2E qui incorpore dans ses calculs l'équation du cylindre ainsi que l'équation du temps de transport, donc plus complexe. On arrive à la même conclusion avec les périmètres éloignés où, dans ce cas-ci, c'est la méthode hybride qui est la plus précise pour les deux puits ayant des valeurs supérieures à 99% pour ce qui est de la préservation de la zone de recharge. La modélisation numérique, qui nécessite beaucoup de données sur le terrain ainsi que du temps pour bâtir et calibrer le modèle, finit troisième, derrière la méthode hybride et le modèle analytique CAPZONE, ces derniers étant considérées comme plus simples d'application. À la lumière de ces constatations, l'étude comparative démontre qu'il est possible, avec des moyens plus ou moins limités, d'assurer une détermination réaliste des périmètres de protection pour des conditions représentant les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec. Ces moyens doivent toutefois comporter un minimum de données hydrogéologiques et géologiques telles des puits d'observation, la stratigraphie et la géologie des formations présentes, les caractéristiques hydrauliques des formations et le débit des puits en opération. L'importance des périmètres rapprochés est moindre en conditions captives comme c'est le cas à Sainte-Anne-des-Plaines, car l'aquifère est protégé naturellement par l'argile. L'accent est plutôt mis sur l'aire d'alimentation tracée par les périmètres éloignés.

5.9 Étude hydrogéologique à Saint-Janvier

Cette section présente les résultats de l'étude hydrogéologique détaillée de la région de Saint-Janvier. La géologie, l'hydrogéologie, les propriétés hydrauliques de l'aquifère, la modélisation numérique ainsi que l'étude comparative des méthodes de détermination des périmètres de protection (PDP) sont développées. Une conclusion sur les méthodes de PDP appliquées complète la section.

5.9.1 Géologie

Les formations du substratum rocheux appartiennent au Groupe de Beekmantown et sont représentées par des roches sédimentaires dolomitiques. Ces formations de l'Ordovicien inférieur sont celles de Beauharnois et de Thérèse (figure 5.21). Les dépôts meubles du Quaternaire sont constitués principalement de sable, d'argile et de till (figure 5.22).

Au puits de pompage STJA1 du lieu d'étude, les dépôts meubles se présentent comme suit à partir de la surface : 1.5 m de sable moyen, 13.1 m d'argile ainsi que 1.2 m de till. Le roc, constitué de dolomie de la formation de Beauharnois, est recoupé sur une épaisseur de 57.3 m.

5.9.2 Hydrogéologie

L'aquifère de la municipalité de Saint-Janvier est constitué d'une couche perméable de till en discordance sur le roc dolomitique. Les premiers mètres du roc, plus fracturés, constituent le principal horizon qui alimente en eau le puits de la municipalité. L'aquifère est confiné au site de pompage de Saint-Janvier par une épaisseur d'argile qui varie spatialement sur le territoire. En effet, l'épaisseur d'argile diminue vers l'ouest, passant de 13 mètres au site de pompage jusqu'à disparaître à 2.6 kilomètres (figure 5.23). C'est à cet endroit que la nappe aquifère est rechargée par l'eau des précipitations qui s'infiltre jusqu'à l'aquifère. La zone de recharge (zone 3 en vert à la figure 5.22) se situe sur une terrasse qui correspond à la limite de partage des eaux entre le bassin hydrologique de la rivière Mascouche et celui de la rivière du Nord. La limite inférieure de l'aquifère se situe à une profondeur de 90 mètres à partir de la surface. À cette profondeur, les essais lugeons ont relevé une transmissivité très faible. La rivière Mascouche qui passe à travers la municipalité de l'ouest vers l'est, et qui se situe à 500 mètres au nord du puits de pompage, est en partie en contact hydraulique avec l'aquifère. En effet, la rivière coule sur le roc à l'ouest de la ville et coule progressivement sur l'argile vers l'est. L'écoulement régional de l'eau souterraine se fait du nord-ouest vers le sud-est. Localement, au niveau du site à l'étude, l'eau circule de l'ouest vers l'est. Le gradient hydraulique est de 0.0036 (figures 5.24 et 5.25).

La population de Saint-Janvier s'approvisionne à 100% à partir de l'eau souterraine. Les principaux utilisateurs de l'eau souterraine sont la municipalité qui dessert une bonne partie de la population et les agriculteurs dont les terres agricoles représentent plus de 80% du territoire de la municipalité. Les résidents vivant à l'extérieur du centre urbain possèdent chacun des puits privés pour un usage essentiellement domestique. En périphérie des puits municipaux, l'aquifère est protégé contre une contamination potentielle par une épaisse couche d'argile. Par contre, cette couche d'argile n'est plus présente à plus de 2 kilomètres au nord et à l'ouest. Ces endroits qui correspondent à la zone de recharge sont occupés par des activités agricoles. La zone de recharge est traversée aussi par la route 117 ainsi que par l'autoroute 15. L'épandage d'engrais ainsi que de sels déglaçants l'hiver sur les routes sont les principaux contaminants potentiels susceptibles d'altérer la qualité de l'eau souterraine à long terme. Cependant, l'effet de ces

pratiques n'est pas décelable à partir des tests réalisés sur la qualité de l'eau. Les puits de la région peuvent aussi faciliter le déplacement de contaminants vers l'aquifère s'ils ne sont pas bien installés et scellés convenablement. Les tests sur la qualité de l'eau souterraine au puits de pompage de la municipalité ont démontré qu'elle respecte les normes gouvernementales d'eau potable (MENVQ, 2001 et SCFP, 2001). On note toutefois que l'eau est dure (avant traitement) (188 mg/l) et dépasse de peu la limite (180 mg/l). L'eau pompée vient du roc qui est composé principalement de dolomies. Ces résultats sous-tendent un lien direct entre la nature du roc et la composition chimique de l'eau.

5.9.3 Propriétés hydrauliques

Études antérieures

Deux études hydrogéologiques ont été réalisées à Saint-Janvier aux puits municipaux Hamel (situé à 50 m du puits STJA1) et Charles en vue de l'exploitation de l'eau souterraine. Des essais de pompage de 72 heures ont été effectués afin de déterminer les propriétés hydrauliques de l'aquifère. Pour le puits Charles, l'étude entreprise par Hydrogéologie Canada Inc. a été faite en 1984. La transmissivité calculée est de 1.1×10^{-2} m²/s (conductivité hydraulique $K=3.8 \times 10^{-3}$ m/s) alors que l'emmagasinement est de 2.7×10^{-4} . Au puits Hamel, l'étude a été réalisée en 1977 par la même firme. La transmissivité déterminée par cette étude est de 2.9×10^{-3} m²/s ($K=9.7 \times 10^{-4}$ m/s).

Essai de pompage

Un essai de pompage de grande envergure a été réalisé au puits STJA1. Huit capteurs de pression ont été installés dans des puits d'observation situés en périphérie du puits de pompage, à des distances comprises entre 27 m et 800 m. Le pompage s'est échelonné sur sept jours sans interruption à un débit moyen de 5.8×10^{-3} m³/s. Suite à l'arrêt du pompage, la remontée de l'eau a été suivie pendant sept jours aussi. Les données de rabattement et de remontée de l'eau souterraine ont été analysées par le logiciel Aquifertest 2.54 (Roehrich, 1995) en appliquant les méthodes de Theis (1935) et de Cooper-Jacob (1946). La méthode de Gringarten-Witherspoon (1972) a aussi été utilisée, considérant que l'essai de pompage a eu lieu dans le roc fracturé. Les valeurs de conductivité hydraulique et d'emmagasinement de l'aquifère sont déterminées en faisant la moyenne géométrique de chacune des valeurs calculées aux puits d'observation. La conductivité hydraulique est de 3.9×10^{-4} m/s alors que l'emmagasinement est de 2.7×10^{-3} (figure 5.26). La valeur de conductivité hydraulique est élevée et est comparable à un aquifère de gravier, quoiqu'un ordre de grandeur inférieur à celui trouvé à Sainte-Anne-des-Plaines. L'aquifère de dolomie de Saint-Janvier est donc un bon conducteur pour l'eau souterraine. Les courbes de rabattement révèlent une limite imperméable de l'aquifère qui se traduit par un rabattement plus important par rapport aux courbes-types vers la fin du pompage. Les calculs effectués dans le but de localiser la limite en question ont été infructueux. Cette limite est probablement l'effet du puits Charles, situé à 1630 m à l'ouest du puits de pompage STJA1, qui est en pompage quasi permanent.

Essai à choc hydraulique

L'essai de perméabilité permet d'évaluer la conductivité hydraulique à une échelle locale de l'aquifère, plus précisément autour du puits testé. Quatre essais de perméabilité ont été réalisés au puits de pompage STJA1 ainsi qu'aux puits d'observation STJA2, STJA3 et STJA4, situés en périphérie de STJA1. Les résultats de conductivité hydraulique sont inférieurs à ceux trouvés par l'essai de pompage. La conductivité hydraulique moyenne de tous les puits est de 1.8×10^{-4} m/s,

soit une valeur deux fois moins élevée que l'essai de pompage (figure 5.26). Cela s'explique par une variation locale de perméabilité. De plus, l'essai à choc hydraulique se fait sur une infime partie de l'aquifère alors que l'essai de pompage sollicite l'aquifère sur une grande échelle. L'hétérogénéité de l'aquifère (fractures, variations de la porosité) a moins d'effet sur les tests effectués sur une grande échelle.

Essai Lugeon

L'essai Lugeon (essai d'injection à charge constante) permet de mesurer la transmissivité à différentes profondeurs entre deux obturateurs (intervalle de 3.72 m) dans un puits. Le profil de la transmissivité de l'aquifère en fonction de la profondeur peut être tracé. Il est possible de repérer dans l'aquifère les horizons qui contribuent le plus à l'écoulement de l'eau souterraine et qui alimentent le puits. Un essai a été réalisé au puits STJA1, là où a eu lieu l'essai de pompage. Le graphique de la figure 5.27 montre qu'à 48 m (21 m de profondeur), 40 m et 3 m les intervalles testés ont des transmissivités plus grandes (7.5×10^{-5} à 2.2×10^{-4} m²/s) que pour le reste du profil. Cela exclut les premiers mètres du roc fracturé qui n'ont pas été mesurés et qui forment l'horizon le plus transmissif de l'aquifère (1.2×10^{-3} m²/s selon l'essai de pompage). Le profil laisse supposer qu'à -1 m (profondeur de 70 m), on atteint une base peu perméable de l'aquifère. En effet, la transmissivité de l'aquifère à cette profondeur est très faible (1.7×10^{-8} m²/s). Les valeurs de transmissivité des essais Lugeon sont encore plus variables que les essais à choc hydraulique ou que les essais de pompage, car elles représentent des valeurs à l'échelle des fractures.

5.9.4 Modélisation

Objectifs

Pour les objectifs, se référer à la section 5.11.1.

Modèle conceptuel

Le modèle conceptuel de l'aquifère de Saint-Janvier, semblable à celui de Sainte-Anne-des-Plaines, est divisé en trois couches (figure 5.28). La première couche, d'une épaisseur de trois mètres, intègre les unités stratigraphiques les plus transmissives : le till perméable et le sommet du roc (dolomie du Groupe de Beekmantown) qui est très fracturé. La seconde couche est épaisse de 50 mètres et sa perméabilité est nettement inférieure à la première, alors que la dernière, la moins perméable, a une épaisseur de 25 mètres. Enfin, sous la dernière couche se trouve la base imperméable de l'aquifère (l'aquitard). La figure 5.28 présente aussi les valeurs attribuées à chacune des couches du modèle conceptuel (voir section 5.11.2).

Choix du code

Voir section 5.11.3.

Conditions aux limites, conditions initiales et sollicitations

La région de Saint-Janvier a été modélisée sur une superficie de 62.3 km². Les limites du modèle ont été déterminées à partir des cartes piézométrique et géologique du site d'étude. Six limites cernent la région (figure 5.29) : une limite à flux nul au nord correspond à la limite de partage des eaux (limite 1); une limite à flux nul au nord-est parallèle à l'écoulement (limite 2); une limite à charge constante au sud-est et qui suit une isopièze (limite 3); et trois limites à charge constante au sud qui concordent avec une ligne d'écoulement (limites 4,5 et 6). Les valeurs de

recharge imposées au modèle, pour simuler l'apport en eau provenant des précipitations ainsi que des couches de sable et d'argile, proviennent de l'évaluation faite par Hamel (2002). Des valeurs de recharge plus importantes se trouvent dans la région de la limite de partage des eaux (7.9 à 194.5 mm/an), là où l'aquifère est non confiné, alors que les valeurs pour les régions couvertes par l'argile sont moindres (21.6 mm/an). Le débit du pompage au puits STJA1 est de 5.8×10^{-3} m³/s. Le modèle inclut aussi le puits de la municipalité (Charles) qui pompe en permanence à un débit de 2.4×10^{-2} m³/s.

La modélisation de la région d'étude s'est faite en deux étapes. Tout d'abord, le calage de la première modélisation s'est fait en régime permanent en utilisant une charge initiale sur tout le domaine et en incorporant le pompage du puits Charles. La deuxième modélisation a été réalisée en régime permanent en incorporant le puits STJA1 afin de délimiter les périmètres rapprochés et éloignés des puits.

Calage

Afin de caler le modèle, les paramètres de conductivité hydraulique, d'emménagement et de recharge ont fait l'objet d'ajustements. Toutefois, ces trois paramètres sont demeurés sensiblement les mêmes que les valeurs initiales estimées. Le graphique de la figure 30 montre une distribution des points des charges simulées (provenant de la modélisation en régime transitoire de 7 jours) en fonction des charges observées qui est décalée vers le haut, ce qui signifie que les charges simulées sont plus élevées que les charges observées. Par contre, les points qui se trouvent en périphérie du puits de pompage STJA1 ont été bien calés, car ils se situent sur la droite de proportionnalité. Les charges hydrauliques observées près du puits en question ont plus de poids sur le calage que les points de mesure plus éloignés, car ils ont fait l'objet d'un suivi continu tout le long de l'essai de pompage. Par conséquent, les données sont plus précises. En résumé, on obtient un très bon calage en périphérie du puits STJA1. L'erreur moyenne sur tous les points est de 1.32 m; l'erreur moyenne absolue est de 1.66 m; et l'erreur sur la racine carrée de la moyenne est de 2.21, ce qui représente moins de 8% d'erreur entre les charges simulées et les charges observées. Il n'y a donc pas d'erreur systématique et ceci confirme que la modélisation représente adéquatement les conditions du terrain.

Résultats et limites du modèle

La figure 5.29 montre en plan le domaine de la modélisation à Saint-Janvier. L'aire d'alimentation est tracée pour les deux puits en pompage à partir de la modélisation avec MODFLOW/MODPATH en régime permanent. L'aire d'alimentation du puits STJA1 couvre une superficie de 2.4 km² alors que celle du puits Charles est de 9.2 km². Puisque les paramètres d'entrée pour la modélisation sont les mêmes pour les deux puits, on constate bien l'effet du débit de pompage au niveau de l'aquifère. Les aires d'alimentation se dirigent vers l'ouest et s'arrêtent à la limite de partage des eaux. Pour les limites du modèle, se référer à la section 5.11.6.

5.9.5 Délimitation de périmètres de protection

Périmètres éloignés

Équation de l'écoulement uniforme

La principale lacune dans l'application de cette méthode (contour noir aux figures 5.31 et 5.32) est qu'elle ne tient pas compte des variations spatiales de l'écoulement. Cette omission se traduit

par le traçage d'un périmètre rectiligne qui passe à côté de l'aire à protéger (en rouge) comme au puits STJA1 (figure 5.31). Même si le périmètre réussit à protéger 73% de la zone de recharge (zone en brun), qui est la région la plus vulnérable à la contamination de l'aquifère, elle surprotège exagérément le domaine avec 208% d'aire trop protégée (Tableau 5.5). Pour ce qui est du puits Charles (figure 5.32), le périmètre issu de cette équation couvre totalement la zone vulnérable. Encore une fois, la méthode surprotège latéralement la méthode étalon avec une valeur de 124%. Bien qu'elle soit efficace dans le deuxième cas, elle demeure une méthode imprécise, voire incomplète.

MODFLOW/MODPATH

La modélisation numérique (contour bleu) est la méthode la plus complexe. Par contre, elle obtient pour le puits STJA1, avec la méthode CAPZONE, les pires résultats. En effet, elle ne protège qu'un faible 1% de la zone de recharge. Au puits Charles, la modélisation donne de bons résultats avec 98% d'aire commune et couvre 95% de la zone de recharge. Bien que ce soit la méthode qui épouse le mieux la forme du périmètre étalon en périphérie des puits STJA1 et Charles, les périmètres tendent vers le nord en amont de l'écoulement. Cela est probablement dû à l'élévation des couches composant le modèle dans cette région qui est plus élevée, donc des charges plus élevées aussi. Aussi, plus on s'éloigne de l'origine des particules, plus incertaine devient la position des lignes d'écoulement.

CAPZONE/GWPATH

Au puits Charles, la méthode analytique (contour mauve) est celle qui est la plus précise en couvrant 100% de la zone vulnérable. En ce qui concerne le puits STJA1, les résultats sont tout à fait le contraire avec 53% d'aire commune avec la méthode étalon. La méthode ne protège nullement la zone de recharge (0%) en plus de surprotéger inutilement 124% de l'aire délimitée par la base de comparaison. La cause est l'échec du modèle à bien établir les charges initiales dans la région que constitue la zone de recharge.

Méthode hybride 3A2E

Au puits de pompage STJA1, la méthode hybride (contour vert) est la plus exacte. Elle couvre 95% de la zone de recharge. Même si elle surprotège avec une valeur de 80%, cette méthode est privilégiée, car dans les cas de protection des aquifères, mieux vaut surprotéger que de risquer dégrader la qualité des eaux souterraines. Même si au puits Charles la méthode la plus précise est CAPZONE, notons tout de même la bonne performance de la méthode hybride qui couvre 95% de la zone vulnérable à la contamination.

Périmètres rapprochés

Équation du cylindre

C'est la méthode la moins précise d'entre toutes, car le rayon calculé à partir de l'équation (contour jaune à la figure 5.33) ne tient pas compte de l'écoulement de l'eau souterraine. En effet, dans le cas des deux puits de la région, le périmètre tend à surprotéger en aval, alors qu'en amont, il n'en assure pas complètement l'aire à protéger, spécialement dans le cas du puits STJA1. En effet, au puits STJA1, c'est la méthode qui couvre le moins l'aire issue de la modélisation numérique (méthode étalon) avec une valeur d'aire commune de 92% (Tableau 5.6). Au puits Charles, c'est l'équation du cylindre, à égalité avec la méthode hybride, qui est la plus exacte, couvrant entièrement la zone à protéger (Tableau 5.7).

Équation du temps de transport

Dans les cas des puits STJA1 et Charles, c'est la méthode (contour brun) qui surprotège le plus avec des valeurs respectives de 127% et 94%. Par contre, des zones couvrent entièrement l'aire de la méthode étalon dans les deux cas. Puisque les limites latérales de cette méthode viennent de l'équation de l'écoulement uniforme et que celle-ci est considérée comme peu précise, la surprotection qu'elle a causée dans les périmètres éloignés se transmet au résultat de l'équation de Bear et Jacob.

Méthode hybride 3A2E

Au puits Charles, c'est la méthode (contour vert) la plus précise, avec l'équation du cylindre, avec un pourcentage d'aire commune de 100%. Au puits STJA1, le pourcentage d'aire commune est très élevé aussi avec une valeur de 96%. C'est la méthode qui, dans le cas des deux puits, épouse le mieux la forme du périmètre étalon qui tend à surprotéger toutefois en aval de l'écoulement souterrain.

CAPZONE/GWPATH

Bien qu'au puits STJA1 la méthode CAPZONE (contour mauve) arrive à égalité avec l'équation de Bear et Jacob, c'est le modèle analytique qui est le plus précis. En effet, cette méthode surprotège moins avec une valeur de 102%, comparée à l'équation du temps de transport qui obtient 127%. Au puits Charles, c'est CAPZONE qui reproduit mieux que les autres méthodes la forme du périmètre étalon. Par contre, elle ne protège pas suffisamment en aval du puits, ce qui risquerait d'offrir une moins bonne protection si la méthode CAPZONE était appliquée à ce site. L'aire commune avec la base de comparaison qu'est la modélisation numérique n'est que de 72%. C'est la méthode la moins précise qui a été appliquée au puits Charles, les autres couvrant 100% du périmètre étalon.

5.9.6 Conclusion

Cinq méthodes de détermination des PDP ont été appliquées à chacun des puits de Saint-Janvier, autant pour les périmètres rapprochés que pour les périmètres éloignés. Les méthodes employées dans le cadre de cette étude comparative varient d'applications simples à très complexes. Les méthodes les plus complexes ne sont pas nécessairement les plus précises. Ceci est le cas pour les périmètres rapprochés où la méthode de l'équation du temps de transport (Bear et Jacob) arrive au premier rang (Tableau 5.8), surclassant la méthode 3A2E au puits STJA1 qui incorpore dans ses calculs l'équation du cylindre ainsi que l'équation du temps de transport, donc plus complexe. On arrive à la même conclusion avec les périmètres éloignés où, dans ce cas-ci, ce sont les méthodes hybride et CAPZONE qui sont les plus précises pour les puits STJA1 et Charles respectivement. En effet, elles ont des valeurs supérieures à 95% pour ce qui est de la préservation de la zone de recharge. Il faut tout de même noter la bonne performance de la méthode hybride au puits Charles (95%), comparée à CAPZONE dans le cas du puits STJA1 où elle couvre 0% de la zone de recharge. Ce constat permettrait de situer la méthode hybride au premier rang au niveau de la constance de la précision des calculs de périmètres de protection. La modélisation numérique, qui nécessite beaucoup de données sur le terrain ainsi que du temps à bâtir et à calibrer le modèle, finit troisième, derrière la méthode hybride (pour le puits STJA1) et le modèle analytique CAPZONE (pour le puits Charles), ces dernières étant considérées comme plus simples d'application. À la lumière de ces constatations, l'étude comparative

démontre qu'il est possible, avec des moyens plus ou moins limités, d'assurer une détermination réaliste des périmètres de protection pour des conditions représentant les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec. Ces moyens doivent toutefois comporter un minimum de données hydrogéologiques et géologiques telles des puits d'observation, la stratigraphie et la géologie des formations présentes, les caractéristiques hydrauliques des formations et le débit des puits en opération.

5.10 Conclusion générale

Deux municipalités ont fait l'objet d'une étude hydrogéologique détaillée, soit celles de Sainte-Anne-des-Plaines ainsi que de Saint-Janvier. La présente étude a permis de définir le système aquifère des deux sites en question (écoulement, recharge, propriétés hydrogéologiques) et d'identifier le seuil d'information nécessaire qui assure une détermination réaliste des périmètres de protection pour des conditions représentant les aquifères fracturés des Basses-Terres du Saint-Laurent.

Un essai de pompage de grande envergure a été réalisé à chaque site sur une période de sept jours dans le but d'évaluer les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère à l'échelle régionale. Les résultats démontrent que les aquifères testés ont une conductivité hydraulique très élevée qui s'apparente à ce qui est obtenu dans les aquifères granulaires. Ces résultats s'expliquent par le fait que les premiers mètres du roc sont très fracturés, voire altérés, qui, associés au till perméable sus-jacent, contribue grandement à l'écoulement de l'eau souterraine. Les fluctuations du niveau de la nappe souterraine ont été relevées et enregistrées dans plus de 50 puits de chacune des régions en vue de l'élaboration de cartes piézométriques des aquifères de roc fracturé. Il ressort de ces dernières des limites hydrologiques importantes. À Saint-Janvier, par exemple, une limite de partage des eaux est située au nord-ouest de la ville et correspond à un sommet topographique du roc. À Sainte-Anne-des-Plaines, le Bouclier Canadien constitue une limite non négligeable à l'écoulement. Les travaux mentionnés ci-haut permettent une évaluation des conditions hydrogéologiques à l'échelle régionale. Au niveau local, deux types d'essais de puits ont été réalisés : les essais Lugeon et de choc hydraulique. Le premier permet, par des mesures à différents niveaux dans un puits, de tracer le profil de la transmissivité de l'aquifère en fonction de la profondeur. Cela contribue à repérer dans l'aquifère les horizons qui contribuent le plus à l'écoulement de l'eau souterraine et qui alimentent le puits. Les premiers mètres du roc ont des valeurs de transmissivité nettement plus élevées qu'en profondeur, à part certains horizons qui correspondraient à des fractures relativement importantes. L'essai par choc hydraulique (ou de perméabilité), pour sa part, permet d'évaluer la conductivité hydraulique des puits. Les valeurs obtenues sont inférieures à celles trouvées par essai de pompage. Cela peut s'expliquer par le fait que l'essai de puits n'influence qu'une infime partie de l'aquifère alors que l'essai de pompage sollicite l'aquifère à une grande échelle. L'hétérogénéité de l'aquifère (fractures, variations de la porosité) a donc moins d'influence sur une grande portion de terrain.

Dans un deuxième temps, les données recueillies provenant des essais réalisés sur le terrain ont servi aux calculs des périmètres de protection. L'étude comparative des méthodes appliquées aux sites de Sainte-Anne-des-Plaines et de Saint-Janvier a permis l'évaluation de sept méthodes ayant comme base de comparaison deux d'entre elles, soit la modélisation numérique pour les périmètres rapprochés et la cartographie hydrogéologique pour les périmètres éloignés. Ces méthodes vont de simples d'application à plus complexes et le niveau d'information nécessaire pour chacune d'entre elles varie grandement. Pour les périmètres éloignés, c'est la méthode

hybride 3A2E qui représente le niveau minimum de sophistication qui assure une détermination réaliste des périmètres de protection pour les deux sites à l'étude. Plus que les autres méthodes, celle-ci est très efficace pour protéger adéquatement les zones de recharge qui sont des fenêtres ouvertes sur l'aquifère confiné, donc vulnérables à la contamination des eaux souterraines. Cette méthode est simple d'application et peut contribuer à la préservation de la qualité de l'eau souterraine si des mesures de contrôle des sources de contamination sont appliquées à l'intérieur du périmètre. Dans l'ensemble des puits des deux sites, pour les périmètres rapprochés, ce sont l'équation du temps de transport (Bear et Jacob) et CAPZONE/GWPATH qui couvrent le mieux l'aire d'alimentation pour un temps de 60 jours. Notons toutefois la bonne performance de la méthode hybride avec des valeurs de 80% à 100% d'aire commune dans tous les puits avec la méthode étalon. Au niveau de la constance dans la précision des calculs de périmètres de protection, la méthode hybride se situe au premier rang, tant pour les périmètres éloignés que rapprochés. L'étude comparative démontre qu'il est possible, avec une méthode relativement simple, d'assurer une détermination réaliste des périmètres de protection pour des conditions représentant les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec.

5.11 Recommandations

Pour les sites de Sainte-Anne-des-Plaines et de Saint-Janvier, la zone de recharge constitue l'entrée d'eau principale qui alimente l'aquifère régional. Le secteur à protéger pour assurer une bonne qualité d'eau à long terme est donc la zone de recharge qui est recoupée par les aires d'alimentation des puits. Cette zone doit faire l'objet d'une supervision particulière, car elle forme la région de l'aquifère la plus vulnérable à la contamination. L'attention doit être portée aussi à toute l'aire d'alimentation tracée pour chaque puits de la région par la cartographie hydrogéologique. À l'intérieur de chaque périmètre, les activités humaines doivent être gérées (agriculture, épandage de sels déglacants sur les routes), même aux endroits où l'aquifère se trouve protégé par une couche d'argile. En effet, l'aquifère peut être potentiellement contaminé, dans ces zones naturellement protégées, par la présence de puits qui sont une fenêtre ouverte sur l'aquifère. Tous les puits abandonnés devraient être cimentés et on doit s'assurer que les puits en opération ont été bien installés. Ces mesures contribueraient grandement à la diminution des risques potentiels de contamination.

Pour les périmètres rapprochés, la méthode CAPZONE et l'équation du temps de transport peuvent servir de première approximation de l'aire à protéger en vue d'une étude plus détaillée. Il faudrait que ces méthodes soient appliquées dans d'autres contextes hydrogéologiques du roc fracturé pour s'assurer de leur validité avant de leur consacrer le titre de méthodes les plus précises. En ce qui concerne le périmètre éloigné, la méthode hybride se démarque facilement des autres méthodes appliquées. Elle a notamment été appliquée aux aquifères granulaires à Portneuf (Québec), donnant encore une fois d'excellents résultats. Il serait toutefois intéressant d'appliquer cette méthode, développée depuis peu au Québec, dans des contextes de roc fracturé où la fracturation et la conductivité hydraulique sont nettement inférieures à ce qu'on retrouve aux deux sites étudiés, puisque l'aquifère de la région est considéré comme un milieu poreux équivalent. Il serait aussi intéressant d'appliquer la méthode hybride dans un contexte d'aquifère fracturé à nappe libre et de voir ainsi l'influence de l'infiltration en association avec les limites hydrauliques sur la configuration du périmètre de protection.

En vue de prévenir la contamination des eaux souterraines et assurer un approvisionnement en eau de bonne qualité, la mise en place d'un programme de protection des puits s'avère essentielle. Ce programme, développé par l'EPA (1993), comporte cinq étapes :

- 1) formation d'un comité local de protection des ressources en eau;
- 2) délimitation des périmètres de protection;
- 3) inventaire de l'utilisation du sol et établissement d'un calendrier d'inspection;
- 4) gestion des aires de protection et programme d'éducation du public;
- 5) alternative d'approvisionnement en eau.

Le comité local a pour objectif de développer, de mettre en place et de réviser périodiquement le programme de protection des puits. Il est composé de représentants municipaux qui s'occupent de la gestion de l'eau et de représentants des groupes d'intérêts locaux. Ses membres devraient posséder des connaissances du sol et du sous-sol, tant au niveau de l'utilisation que de leurs caractéristiques géologiques et hydrogéologiques. Les périmètres de protection sont réalisés par l'application de méthodes qui assurent une détermination réaliste des aires à protéger. La conception des périmètres est basée sur l'analyse des données de terrain existantes ainsi que de la cueillette et l'analyse des travaux supplémentaires. L'étape trois a pour objectifs de documenter les usages du sol antérieurs et présents dans l'aire d'alimentation, d'identifier les sources potentielles de contamination et d'estimer les risques et menaces de contamination des puits et de l'aquifère. L'objectif de l'étape quatre est d'envisager des mesures de protection pour réduire les menaces de contamination et prévenir la contamination. Les mesures ont pour but de résoudre les problèmes de quantité et de qualité de l'eau souterraine à l'intérieur des périmètres, d'effectuer un contrôle de l'usage du sol par des règlements et de sensibiliser la population en général sur la problématique des eaux souterraines. La dernière étape consiste à prévenir aujourd'hui les problèmes futurs. Les problèmes éventuels reliés à une pénurie d'eau, une contamination de l'ouvrage de captage ou de bris d'aqueduc, peuvent être prévenus par l'étude approfondie de la demande en eau, de l'inventaire des sources d'approvisionnement ainsi que de l'inventaire des sources alternatives. En résumé, ces recommandations visent à préserver la ressource en eau en faisant un usage du territoire qui n'altérerait pas ses fonctions essentielles pour la population pour le présent et le futur.

5.12 Remerciements

Le premier auteur tient premièrement à remercier toute l'équipe du projet de caractérisation régionale pour le support sur le terrain. Un grand merci à M. Forget de Sainte-Anne-des-Plaines ainsi que M. Roy, M. Lajeunesse et Mme Trudeau de Mirabel pour leur appui au projet et leur grande disponibilité. L'étude a aussi été rendue possible grâce au support financier de l'INRS-ETE ainsi que de FCAR. Un merci spécial à Édith Bourque et Nathalie Fagnan pour leurs précieux conseils. Enfin, je tiens sincèrement à remercier la population des deux municipalités pour leur grande collaboration à notre projet en nous donnant l'accessibilité à leurs puits.

6. Synthèse des travaux et résultats des études locales

Martine M. Savard, Miroslav Nastev et Daniel Paradis

6.1 Introduction – Choix des secteurs d'étude

Pour compléter les connaissances du système aquifère en ce qui touche à des questions prioritaires, des secteurs restreints, soumis à une exploitation intense de l'eau souterraine et identifiés en collaboration avec les partenaires de la région, ont fait l'objet d'études détaillées. La présente section résume les thématiques abordées, les résultats obtenus et leurs implications pour les intervenants locaux. Les thématiques choisies touchent : 1) la caractérisation du comportement de l'une des principales couches aquifères – le calcaire fracturé – sous l'effet d'un pompage de longue durée (section 2); 2) la problématique de la salinité de l'eau (section 3); 3) le rôle de la fracturation au niveau régional (section 4); et 4) la protection d'ouvrage de captage de l'eau souterraine en conditions de confinement (section 5).

6.2 Cas de Chatham – Modélisation en mode transitoire à la carrière

6.2.1 Problématique et contexte

Sur le territoire de la MRC d'Argenteuil, le calcaire fracturé du Groupe de Chazy affleure sur une grande superficie ou n'est recouvert que d'une fine couche de till quaternaire n'excédant jamais 5 m. Le calcaire recouvre la dolomie du Groupe de Beekmantown et il représente la principale couche hydrostratigraphique de l'aquifère localement, dont la seule porosité connue est constituée de fractures tectoniques réparties en deux familles. Cette unité aquifère mérite une investigation approfondie puisqu'elle occupe les parties est et ouest du large territoire d'étude du projet de caractérisation hydrogéologique régional, soit environ 8% des 1500 km² étudiés. L'exploitation de la carrière de Chatham (*MARELLAN*) permet une caractérisation détaillée des propriétés hydrauliques de l'aquifère calcaire et fracturé. L'exploitation de la carrière requiert un assèchement estival que l'on envisage ici comme un essai de pompage de longue durée pour les fins de l'étude scientifique.

6.2.2 Approche – Modélisation en mode transitoire

Des essais d'injection à charge constante et de perméabilité *in situ* ont été exécutés afin de connaître les propriétés hydrauliques du calcaire. Lors de l'assèchement de la carrière, à l'été 2000, cinq puits d'observation ont été utilisés pour faire le suivi de nappe. Un modèle à saturation variable a été développé pour simuler l'assèchement de la carrière. Les simulations numériques ont été exécutées en régime transitoire pour une période de 26 jours.

6.2.3 Résultats – Révision du modèle hydrostratigraphique

On estime que la recharge annuelle dans ce secteur est de 200 mm/an, que l'aquifère est en conditions de nappe libre, et que l'écoulement se fait du nord au sud. On estime aussi que l'utilisation anthropique locale de l'eau souterraine ne représente que 1.2% de la recharge annuelle estimée à cet endroit.

La distribution verticale de la conductivité hydraulique montre une augmentation abrupte par deux ordres de grandeur, à une profondeur de 35 mètres, et ce pour une couche d'environ 24 mètres se terminant au contact entre les groupes de Chazy et de Beekmantown.

Les simulations numériques montrent que l'utilisation d'un modèle numérique poreux équivalent ne permet pas d'expliquer les rabattements mesurés au cours de l'assèchement de la carrière.

Seul l'ajout au modèle initial d'un système de fractures verticales, orientées N50° et la modélisation d'une infiltration rapide des précipitations vers la nappe permettent de bien reproduire les rabattements dans les cinq puits.

6.2.4 Implications pour l'étude régionale

L'étude du profil de conductivité hydraulique obtenu à Chatham implique que la perméabilité de l'aquifère de roches fracturées est plus importante au-dessus du contact entre les groupes de Chazy et de Beekmantown. Cette analyse montre que des écarts existent sur le territoire d'étude par rapport au modèle conceptuel régional stipulant que les valeurs de la conductivité diminuent avec la profondeur dans la séquence rocheuse.

L'extrapolation des résultats des simulations numériques suggère que le système de failles régional puisse constituer une cible pour la recherche d'eau souterraine.

6.3 Cas de Saint-Benoît – Débit durable en conditions restreintes

6.3.1 Problématique

Le secteur de Saint-Benoît est approvisionné en eau potable principalement par un ouvrage de captage d'eau de surface situé dans les collines d'Oka. Un puits de pompage d'eau souterraine aménagé en bordure du Rang Grand Brûlé, au nord du village, permet de répondre à l'augmentation de la demande en eau surtout pour la période de mai à décembre. Dans ce secteur une contamination naturelle par de l'eau souterraine saline a été identifiée depuis longtemps. Une formation argileuse d'une épaisseur moyenne de 20 m, couvre la majeure partie du secteur étudié. Plus au nord, à la Côte Saint-Vincent, l'argile est absente et le till, dont l'épaisseur varie entre 5 et 25 m, est exposé. Ce till constituerait l'unité perméable qui agirait comme zone de recharge de l'aquifère exploité (roc fracturé et l'unité de sable et gravier). L'objectif de l'étude était d'évaluer la possibilité de trouver de l'eau souterraine de bonne qualité et en quantité suffisante pour répondre aux besoins à venir de la population du secteur de Saint-Benoît. Un deuxième objectif de l'étude est d'évaluer la qualité de l'eau souterraine du secteur relativement à la problématique de salinité de l'eau.

6.3.2 Approche

L'étude détaillée du secteur Saint-Benoît comprend divers essais hydrauliques (essais de perméabilité *in situ*, deux essais de pompage d'une durée de 7 et 8 jours, essais d'injection à charge constante), levés piézométriques, levés géologiques et géophysiques, et levés hydrogéochimiques composite et multi-niveaux. L'ensemble des données recueillies est intégré dans un modèle numérique exécuté entièrement en régime transitoire.

6.3.3 Résultats

La salinité de l'eau souterraine dans le secteur résulte du recul de la Mer de Champlain. En effet, le mélange d'eau marine et de fonte glaciaire aurait été piégé dans les pores et les fractures des formations géologiques. Par la suite, les cycles de recharge et d'écoulement souterrain auraient dilué cette eau saline. Dans les formations plus perméables et situées plus près de la zone de recharge, la salinité est presque inexistante. L'analyse des échantillons d'eau interstitielle provenant d'échantillons d'argile montre que la salinité de l'eau y est 3 fois plus importante que celle de l'eau souterraine provenant de la formation rocheuse sous-jacente. Puisque l'aquifère se trouve confiné entre ces deux formations, un pompage excessif contribuerait à augmenter la

salinité de l'aquifère par lixiviation de l'eau plus saline provenant des formations moins perméables (argiles, roches moins fracturées) et par un apport latéral de l'eau saline.

La durabilité de la ressource a été estimée en régime transitoire en termes de rabattements et du pourcentage du taux de la recharge. Les résultats des simulations numériques suggèrent que la productivité de l'aquifère est soutenable pour un pompage de 180 m³/j dans un seul puits de pompage ou pour un pompage simultané des deux puits d'au maximum de 140 m³/j pour chacun des deux puits. C'est le scénario d'extraction continue de 140 m³/j dans chacun des deux puits de pompage qui permet une exploitation maximale de l'aquifère sans que le niveau minimal de 35 m, retenue comme limite de sécurité, ne soit pas dépassé. Un niveau en dessous de 35 m pourrait entraîner la désaturation de la formation aquifère à l'endroit du puits de pompage et signifierait un passage à des conditions aérobies et une dégradation possible de la qualité de l'eau souterraine. De plus, il faudrait éviter que le taux de pompage ne dépasse 40% du taux de la recharge locale.

6.3.4 Implication pour l'étude régionale

L'origine de l'eau saline dans la région résulte du recul de la Mer de Champlain. L'analyse du temps de transport indique qu'il faudrait entre 1 et 5 ans pour que l'eau infiltrée dans la zone de recharge ne se rende au puits de pompage. La protection de l'aquifère devrait consister en un inventaire des principales sources potentielles de contamination, en un contrôle de leur utilisation, et en un suivi de la qualité de l'eau en amont des puits de pompage afin de prévenir une avancée éventuelle de la contamination.

6.4 Cas de Saint-Eustache - Étude des systèmes de fractures

6.4.1 Problématique et contexte

On désigne communément le système aquifère régional par l'épithète «fracturé» suggérant ainsi que l'écoulement régional s'opère par de multiples mais fines ouvertures générées par cassure de la roche solide. Toutefois, plusieurs types de fractures existent dans les roches sédimentaires paléozoïques. Sont-ils tous impliqués dans l'écoulement de l'eau souterraine? Pourquoi la conductivité hydraulique des roches diminue-t-elle en profondeur (section 2.3) ? Pour répondre à ces questions, des travaux très localisés à l'intérieur de la carrière de Saint-Eustache ont été menés pour évaluer l'influence des différents types de fractures sur l'écoulement de l'eau souterraine.

L'exploitation des carbonates à la carrière Saint-Eustache assèche les strates rocheuses sur une superficie approximative de 1 km² et une profondeur maximale de 60 mètres sous la surface du sol. Ce dénoyage favorise l'étude de la Formation de Beauharnois composée de dolomie, une importante unité hydrostratigraphique de l'aquifère régional, en conditions de nappe libre à ce site d'étude (Savard et al., sous presse).

6.4.2 Approche

Des examens visuels et des levés structuraux effectués sur les affleurements des 1500 km² de la région d'étude ont d'abord permis de regrouper les fractures des Basses-Terres du Saint-Laurent (secteur des Basses Laurentides) en deux à cinq familles, d'après leur type et leur géométrie (Lemieux, 2000, 2001). Récemment, la carrière a fait l'objet de caractérisations structurale, hydrostratigraphique, piézométrique, géophysique et hydraulique, par la suite intégrées en un

modèle numérique à petite échelle incorporant les fractures actives identifiées à l'endroit d'un forage. La modélisation a été effectuée à l'aide du code FRAC3DVS (Therrien et Sudicky, 1996).

6.4.3 Résultats – Types de fractures et modélisation discrète

Les travaux récents à la carrière Saint-Eustache confirment les premières observations qui suggéraient trois types distincts de fractures à cette localité : 1) petites failles de décrochement, 2) plans de dissolution parallèles aux strates de dolomie et 3) joints verticaux.

Les résultats piézométriques à l'échelle régionale indiquent que l'effet du pompage de la carrière Saint-Eustache est visible à l'échelle de 1/100 000 (Savard et al., sous presse). Les rabattements causés par l'exploitation de la carrière sont de l'ordre de 40 m.

La moyenne géométrique de la conductivité hydraulique de la Formation de Beauharnois dans sa partie la plus perméable à la carrière se situe à 5.9×10^{-5} m/s. On estime sa transmissivité à 1×10^{-4} m²/s et son emmagasinement à 2.3×10^{-4} , alors que la partie aquitard (plancher imperméable) aurait une conductivité de 1.9×10^{-7} m/s et un emmagasinement de 1.8×10^{-4} .

Le rôle des fractures varie avec la profondeur de l'unité rocheuse, mentionnons que malgré une densité de fractures élevée, la partie aquitard de la Formation de Beauharnois se situe à la limite supérieure de l'intervalle de conductivité typique de la dolomie non fracturée rapportée dans la littérature. En d'autres termes, le rôle de conduit des fractures n'est pas régi par leur type, mais par les contraintes lithostatiques, i.e. les forces verticales imposées par le poids des roches de recouvrement.

Le calage du modèle numérique a fait varier l'ouverture de la fracture efficace, la conductivité hydraulique et l'emmagasinement des aquitards pour l'essai de pompage réalisé à l'aide d'obturateurs pneumatiques de manière à isoler la fracture. La correspondance des courbes de rabattement mesurée et simulée se produit pour une ouverture de fracture de 7×10^{-4} m, une conductivité hydraulique de 5×10^{-7} m/s et un coefficient d'emmagasinement de 1×10^{-3} .

6.4.4 Implications pour l'étude régionale

Les résultats obtenus à la carrière Saint-Eustache impliquent que tous les types de fractures peuvent agir comme conduit de l'eau souterraine, toutefois ce sont l'ouverture et l'interconnectivité de ces dernières qui contrôlent la conductivité de l'aquifère, ces paramètres quant à eux dépendent de la profondeur et de l'état des contraintes verticales. La perméabilité et la conductivité seront donc plus élevées vers la surface du roc qu'en profondeur.

6.5 Cas de Sainte-Anne-des-Plaines et de Saint-Janvier - Périmètres de protection dans des secteurs de captage

6.5.1 Problématique et contexte

Tout ouvrage de captage des eaux souterraines constitue à la fois un outil indispensable pour l'utilisation de la ressource et un point de contamination possible de l'eau potable et de la nappe aquifère. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les aires à protéger afin d'assurer la pérennité de la ressource. Toutefois, ces méthodes s'appliquent pour des aquifères en conditions

de nappe libre. Comme mentionné dans la section précédente, une grande partie de la superficie du système aquifère à l'étude se caractérise par des conditions de nappe confinée. Le but de la présente section est donc d'identifier le seuil d'information nécessaire pour assurer une détermination réaliste des périmètres de protection, et ce, pour des conditions représentant les aquifères fracturés des Basses-Terres du Saint-Laurent.

Les populations de Saint-Janvier et de Sainte-Anne-des-Plaines s'approvisionnent à 100% à partir de l'eau souterraine, elles exploitent des portions de l'aquifère régional en conditions de nappe confinée. Des ouvrages de captage des deux municipalités ont ainsi fait l'objet d'une étude détaillée visant à déterminer leur périmètre de protection. Les contextes hydrostratigraphiques varient légèrement au deux localités. À Saint-Janvier, le puits de pompage choisi pour l'étude traverse depuis la surface du sol 1.5 m de sable moyen, 13.1 m d'argile imperméable, 1.2 m de till et 57.3 m de dolomie de la Formation de Beauharnois, l'unité aquifère. Au puits de pompage de Sainte-Anne-des-Plaines, 9.4 m d'argile sur 1.5 m de till argileux non perméables recouvrent cette fois-ci le calcaire du Groupe de Chazy fracturé sur 5.8 m et non fracturé sur les 2.7 m suivants, qui constitue bien entendu la principale unité aquifère.

6.5.2 Approche

Des essais de pompage sur une période de sept jours ont été réalisés à chaque localité dans le but d'évaluer les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère. De plus, des essais à choc hydraulique et des essais de perméabilité ont servi à évaluer la transmissivité à une échelle locale de l'aquifère.

Plusieurs méthodes de complexité d'application et de coûts variables existent pour déterminer les périmètres de protection. On dira d'une méthode qu'elle montre un haut degré de précision si elle permet d'intégrer les caractéristiques géologiques et hydrauliques de la région étudiée. Sept méthodes, de simples à plus complexes et propres à la délimitation de périmètres rapprochés, éloignés ou les deux, ont été appliquées pour la présente étude: 1) l'équation du cylindre, 2) l'équation de l'écoulement uniforme, 3) le calcul du temps de transport, 4) la méthode hybride 3A2E, 5) la cartographie hydrogéologique, 6) le modèle analytique CAPZONE et 7) la modélisation numérique MODFLOW.

6.5.3 Résultats – Comparaison des méthodes d'évaluation des périmètres de protection

Les résultats des essais de pompage de longue durée démontrent que les portions aquifères évaluées ont une transmissivité très élevée, typique des aquifères granulaires, ceci puisque les premiers mètres du roc montrent une haute densité de fractures efficaces. La transmissivité moyenne obtenue à l'aide des essais de perméabilité est de 1.35×10^{-2} m²/s, soit une valeur dix fois plus élevée que l'essai de pompage (figure 5.26). Cela s'explique par une variation locale de perméabilité. L'essai à choc hydraulique se fait sur une infime partie de l'aquifère alors que l'essai de pompage sollicite l'aquifère sur une grande échelle et englobe plus d'hétérogénéité (fractures, variations de la porosité).

Pour les périmètres de protection éloignés, la méthode hybride 3A2E implique un minimum de sophistication tout en assurant une détermination réaliste des périmètres pour les deux sites étudiés. En effet, la méthode hybride requiert de connaître un minimum de données hydrogéologiques et géologiques comme la stratigraphie et la géologie des unités, leurs caractéristiques hydrauliques et le débit des puits en opération. En retour, la méthode permet une

protection efficace des zones de recharge qui constituent des points vulnérables de l'aquifère confiné. Cette méthode est aussi plus simple d'application que les autres méthodes et elle peut contribuer à la préservation de la qualité de l'eau souterraine si des mesures de contrôle des sources de contamination sont appliquées à l'intérieur du périmètre. Pour les périmètres rapprochés, ce sont l'équation du temps de transport et CAPZONE/GWPATH qui couvrent le mieux l'aire d'alimentation pour un temps de 60 jours.

6.5.4 Implications pour la protection des ressources en eau pour les Basses Laurentides

Au niveau de la constance dans la précision des calculs de périmètres de protection éloignés ou rapprochés, la méthode hybride se situe clairement au premier rang. L'étude comparative démontre qu'il est possible, avec cette méthode, d'assurer une détermination réaliste des périmètres de protection pour des conditions représentant les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec.

La zone de recharge doit faire l'objet d'une supervision étroite, puisqu'elle est très vulnérable à la contamination. En plus, à l'intérieur de toute l'aire d'alimentation du puits tracée par la cartographie hydrogéologique, les activités humaines doivent être gérées, même aux endroits où l'aquifère se trouve protégé par une couche d'argile.

7. Références

- Bair, E.S., et Roadcap, G.S.**, 1992. Comparison of Flow Models Used to Delineate Capture Zones of Wells : Leaky-Confined Fractured-Carbonate Aquifer. vol.30, p.199-211.
- Bair, E.S., Springer, A.E., et Roadcap, G.S.**, 1991. Delineation of Travel Time-Related Capture Areas of Wells Using Analytical Flow Models and Particle-Tracking Analysis. *Groundwater*, vol.29, no.3, may-june, p.387-397.
- Bear, J.**, 1972. Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications, Inc. New-York, 764 p.
- Bear, J., et Jacob, M.**, 1965. On the Movement of Water Bodies Injected into Aquifers *Journal of Hydrology*, vol. 3, p. 37-57.
- Beaubien, C.**, 2001. Géochimie de l'eau interstitielle des argiles, Projet AF50Q. Rapport de stage, INRS-Géoresources, 16 novembre, 19 p. + 9 annexes.
- Beckers, J., et Frind, E.O.**, 2000. Simulating groundwater flow and runoff for the Oro Moraine aquifer system. Part I. Model formulation and conceptual analysis. *Journal of Hydrology*, vol. 229, p. 265-280.
- Bernstein, L.**, 1992. A revised lithostratigraphy of the lower – Middle Ordovician Beekmantown Group, Saint-Lawrence Lowlands, Quebec and Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29, 2677-2694.
- Birsoy, Y.K. et Summers, W.K.**, 1980. Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data. *Ground Water*, vol. 18, 137-146
- Bolduc, A.M. et Ross, M.**, 2001, Géologie des formations superficielles, région de Lachute, Québec, Commission géologique du Canada, dossier public, 1:50,000.
- Bourque, E., Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M., Nastev, M., et Martel, R.**, 2001. Résultats initiaux de la caractérisation hydrogéochimique des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec. *Geological Survey of Canada, Current Research*, 2001-D8,9.
- Bouwer, H. H., et Rice, R. C.**, 1976. A Slug Test Method for Determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers, with Completely or Partially Penetrating Wells. *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, p. 423-428.
- Bradbury, K.R., et Muldoon, M.A.**, 1993. Preliminary Comparison of a Discrete Fracture Model with a Continuum Model for Groundwater Movement in Fractured Dolomite. Wisconsin Geological and National History Survey, WGNHS open-file report 93-6, december, 43 p.
- Bradbury, K.R., et Muldoon, M.A.**, 1994. Effects of Fracture Density and Anisotropy on Delineation of Wellhead-Protection Areas in Fractured Rock Aquifers. *Applied hydrogeology*, Wisconsin, p.17-23.

- Clark, I., et Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, Boca Raton, new York, p. 328.
- Cloutier, V., Bourque, É., Lefebvre, R., Savard, M., Nastev, M., Martel, R., et Therrien, R., 2001. Regional groundwater hydrogeochemistry of fractured rock aquifers in south-western Quebec. Proceedings, 2nd *Joint IAH-CNC and CGS, Groundwater Specialty Conference*, 54th, Canadian Geotechnical Conference, Sept. 16-19, 2001, Calgary, Canada, pp 1068-1076.
- Consedine, R.L., 2001. Quebec's Saint-Eustache quarry aims for quantity and quality. *Aggregates and Roadbuilding Magazine*.
- Cooper, Jr. H.H., et C.E. Jacob, 1946. A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History. *Trans. Am. Geophysical Union* 27 (4), p. 526-534.
- Dessau, 1991. Étude hydrogéologique du site de la montée Barrette. Rapport sur l'étude en approvisionnement en eau potable, Les consultants Dessau Inc., Laval (Qc), 14 p.
- Dierch, H-J. G., 1998 a. Feflow – Reference Manual. WASI - Institute of Water Resources Planning and System Research Ltd., Berlin, p. 294.
- Drever, J.I., 1997. *The geochemistry of natural waters*. Prentice-Hall, 437 p.
- Environnement Canada, 1998. Normes climatiques au Canada 1961-1990.
- EPA, 1987. Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas. U.S.EPA, Office of groundwater, Washington, DC.
- EPA, 1991. Delineation of Wellhead Protection Areas in Fractured Rocks. U.S.EPA, Office of groundwater, Washington, DC, 144 p.
- EPA, 1993. Wellhead Protection : A Guide for Small Communities. Seminar publication, EPA/625/R-93-002.
- EPA, 1994. Ground Water and Wellhead Protection Handbook. EPA, Office of Research and Development, Washington, DC, 269 p.
- Etienne, M., 2002. *Caractérisation in situ des milieux fracturés à l'aide de diagraphies géophysiques*. Mémoire de maîtrise, Université Laval.
- Globensky, Y., 1987. Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Technical Report MM 85-02, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.
- Gringarten, A.C., et P.A. Witherspoon, 1972. A Method of Analyzing Pump Test Data from Fractured Aquifers. *Int. Soc. Rock Mechanics and Int. Ass. Geol., Proc. Symp. Rock Mechanics*, Stuttgart, vol.3-B, p.1-9.
- Hamel, A., 2002. *Évaluation de la recharge et des patrons d'écoulement régionaux des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec*. Mémoire de maîtrise, Université Laval.

- Hamel, A.**, 2002. *Détermination de la recharge des aquifères de roc fracturé du sud-ouest du Québec*. Mémoire présenté à la faculté des études supérieures de l'Université Laval pour l'obtention du grade maître ès Sciences (M.Sc.), Département de géologie et génie géologique. 47 p.
- Hantush, M. S.**, 1956. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifer. *Transactions of the American Geophysical Union*, 32, 702-714.
- Hantush, M. S.**, 1960. Modification of the theory of leaky aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 65, 3713—3725.
- Hantush, M. S., et Jacob, C. F.**, 1955. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Trans. Amer. Geophys. Union*. Vol 36, pp 95-100.
- HFontaine**, 1979. Épreuve de pompage, Sainte-Anne-des-Plaines. 6p.
- Hydrogéocanada Inc.**, 1984. Rapport final sur l'alimentation en eau, Ville de Mirabel (Saint-Janvier). 10 p.
- Hydrogéocanada Inc.**, 1988, Étude hydrogéologique, Alimentation en eau, Village de Saint-Benoît, Ville de Mirabel.
- Lapcevic, P.A., Novakowski, K.S., et Paillet, F.L.**, 1993. Analysis of flow in an observation well intersecting a single fracture. *Journal of Hydrology*, vol. 151, p. 229-239.
- Lemieux, J.-M.**, 2000. Caractérisation locale et régionale des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec. Projet de fin d'études, Université Laval.
- Lemieux, J.-M.**, 2000. Caractérisation structurale locale et régionale des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec. Mémoire de baccalauréat, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval. p. 16.
- Lemieux, J.-M.**, 2001. Compte rendu des travaux réalisés à l'été 2000 dans le cadre du projet d'Hydrogéologie des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec.
- Lemieux, J.-M., Kirkwood, D. et Therrien, R.**, 2001. Detailed hydrogeological study of a fractured dolostone. In *Proceedings of the Fractured Rock 2001*, Toronto, ON, Canada. March 26-28.
- Lemieux, J.-M., Kirkwood, D. et Therrien, R.**, 2001. Detailed Hydrogeological Study of a Fractured Dolostone. *Fractured Rock 2001*, 26-28 march, Toronto, 4 p.

- Marquis, S.A., Jr., R.G., R.E.A., Stewart, E., 1992.** The Delineation of Wellhead Protection Areas in Fractures Bedrock Terrains Using Groundwater Flow Models. McLaren/Hart Environmental engineering, California, p.327-341.
- Marsily, G. de, 1986.** Quantitative hydrogeology, Groundwater hydrology for engineers. Academic Press, San Diego. 440 p.
- Martel, R., Bourque, É., 1999.** Protection et conservation de l'eau souterraine. 129 p.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988.** A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations Book, 6, Chapter A1, 586 p.
- MEQ, 1995.** Guide : Les périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau souterraine. Direction des politiques des secteurs agricole et naturel, Publications du Québec, Sainte-Foy (Qc).
- MENVQ, 2001.** Règlement sur la qualité de l'eau potable. Bibliothèque Nationale du Québec, 32 p.
- Mualem, Y., 1976.** A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12 (3), 513-522.
- Murat, V., Paradis, D., Savard, M.M., Nastev, M., Bourque, É., Hamel, A., Lefebvre, R., Martel R., 2003** Vulnérabilité à la nappe du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec - Application des méthodes d'évaluation DRASTIC et GOD. Geological Survey of Canada, Current Research, 14 pages, 13 figures, 16 tables.
- Nastev, M. et al, 2002,** Étude quantitative des ressources en eau souterraine du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec. Rapport final .
- Nastev, M., Savard, M.M., Lapcevic, P., Paradis, D., Lefebvre, R. et Martel, R. 2001.** Investigation of hydraulic properties of regional fractured rock aquifers. In *2nd Joint CGS-IAH Groundwater Speciality Conference*, pages 1058-1066, Calgary.
- Nastev, M., Lapcevic, P., Girard, F., Étienne, M., Voralec, J., Savard, M.M., 2000.** Hydraulic Characterisation of Fractured Aquifers of Saint-Lawrence Lowlands in South-Western Quebec. 53rd Canadian Geotechnical Conference, October 15-18, Montréal, 1st Joint IAH-CNC and GSC Groundwater Speciality Conference Proceedings, session GW1, p. 33-39.
- Paradis, D., 2000.** Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire de maîtrise, INRS-Géoressources, 138 p.
- Piper, A.M., 1944.** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Transactions, American Geophysical Union, 25, 914-923.

- Pollack, D.W., 1989. Documentation of Computer Programs to Compute and Display Pathlines Using Results from the U.S. Geological Survey Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey open-file report 89-381, 188 p.
- Price, N. J., 1959. Mechanics of jointing in rocks. *Geological Magazine*, 96 (2), 149-167.
- Ramsey, J. G., et Huber, M. I., 1987. *The techniques of modern structural geology*, volume 2. Academic press.
- Rochette, P., et Dubé, P.-A., 1989. Calibration d'une intégrale simple pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle. *Naturaliste canadien*.
- Roehrich, T., 1995. Aquifertest. Version 2.54, Waterloo hydrogeologic Inc.
- Rocher, M., Salad-Hersi, O., et Castonguay, S., 2001. Carte géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent – Secteur Ouest de Montréal, mise à jour. Commission géologique du Canada.
- Ross, M., Parent, M., Bolduc, A.M., Hunter, J., et Benjumea, B., 2001, Étude préliminaire des formations quaternaires comblant les vallées des basses laurentides, nord-ouest de Montréal, Québec, Recherche en cours, Commission géologique du Canada, 8p.
- Ross M., Martel R., Parent M., Lefebvre R., et Savard M.M., 2003. The use of a 3D geologic framework model of surficial sediments to define bedrock aquifer vulnerability in the St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canada. In: Rodriguez R, Civita M, de Maio M (eds), proceedings of the First International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk, Salamanca, Mexico, v. 1, p. 157-168.
- Ross, M., Parent, M., et Lefebvre, R., 2004. 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*.
- Savard, M.M., Lefebvre, R., Martel, R., Ouellet, M., et Lamontagne, C., éditeurs (2003 en édition). Guide méthodologique pour la caractérisation hydrogéologique régionale des systèmes aquifères en roches sédimentaires fracturées. Ministère de l'Environnement du Québec, 7 chapitres.
- Savard, M.M., Nastev, M., D. Paradis, R. Lefebvre, R. Martel, V. Cloutier, V. Murat, E. Bourque, M. Ross, K. Lauzière, M. Parent, A. Hamel, J.-M. Lemieux, R. Therrien, D. Kirkwood, et P. Gélinas (sous presse). **Inventaire canadien des ressources en eau souterraine – Caractérisation hydrogéologique intégrée et régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec. Bulletin de la Commission géologique du Canada**
- Savard, M.M., Nastev, M., Lefebvre, R. Martel, R., Fagnan, N., Bourque, E., V. Cloutier, K. Lauzière, P. Gélinas, D. Kirkwood, P. Lapcevic, G. Karanta, A. Hamel, A. Bolduc, M. Ross, M. Parent, J.-M. Lemieux, E. Boisvert, O. Salad Hersi, D. Lavoie, F. Girard, K. Novakowski, R. Therrien, M. Etienne, et R. Fortier, 2000. Regional hydrogeology of fractured rock aquifers in Southwestern Quebec (St.Lawrence Lowlands). 53rd Canadian Geotechnical Conference, October 15-18, Montréal, 1st Joint IAH-CNC and GSC Groundwater Specialty Conference Proceedings, session GW6, p. 247-253.

- SCFP, 2001. Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail, mars 2001, Résumé des recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, 8 p.
- Steenhuis, T.S. et *al.*, 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. *Journal of irrigation and drainage engineering*, mai-juin pp. 234-237.
- Theis, C.V., 1935. The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground Water Storage. *Trans. Am. Geophysical Union* 16 (Pt2), p.519-524.
- Therrien, R. et Sudicky, E. A., 1996. Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 23(1-2), 1-44.
- Todd, D.K., 1980. *Groundwater Hydrology*. Second Edition, USA.
- Uffink, G.J.M., 1984. Theory of the Oscillating Slug Test. Nat. Institute for Public Health and Environmental Hygiene, Bilthoven, Unpublished research report, 18 p.
- Van der Kamp, G., 1976. Determining Aquifer Transmissivity by Means of Well Response Tests: The Underdamped Case. *Water Resources Res.*, vol.12, p.71-77.
- Walton, W. C., 1962. Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. *Illinois State Water Survey Bulletin* 49.
- Wardlaw, N.C., et Mckellar, M., 1981. Mercury porosimetry and the interpretation of pore geometry in sedimentary rocks and artificial models. *Powder Technology*, vol. 29, p. 127-143.
- Zeigler, T.W., 1976. Determination of rock mass permeability. US Army Engineer Waterways experiment Station. AD-A021 192, pp.88

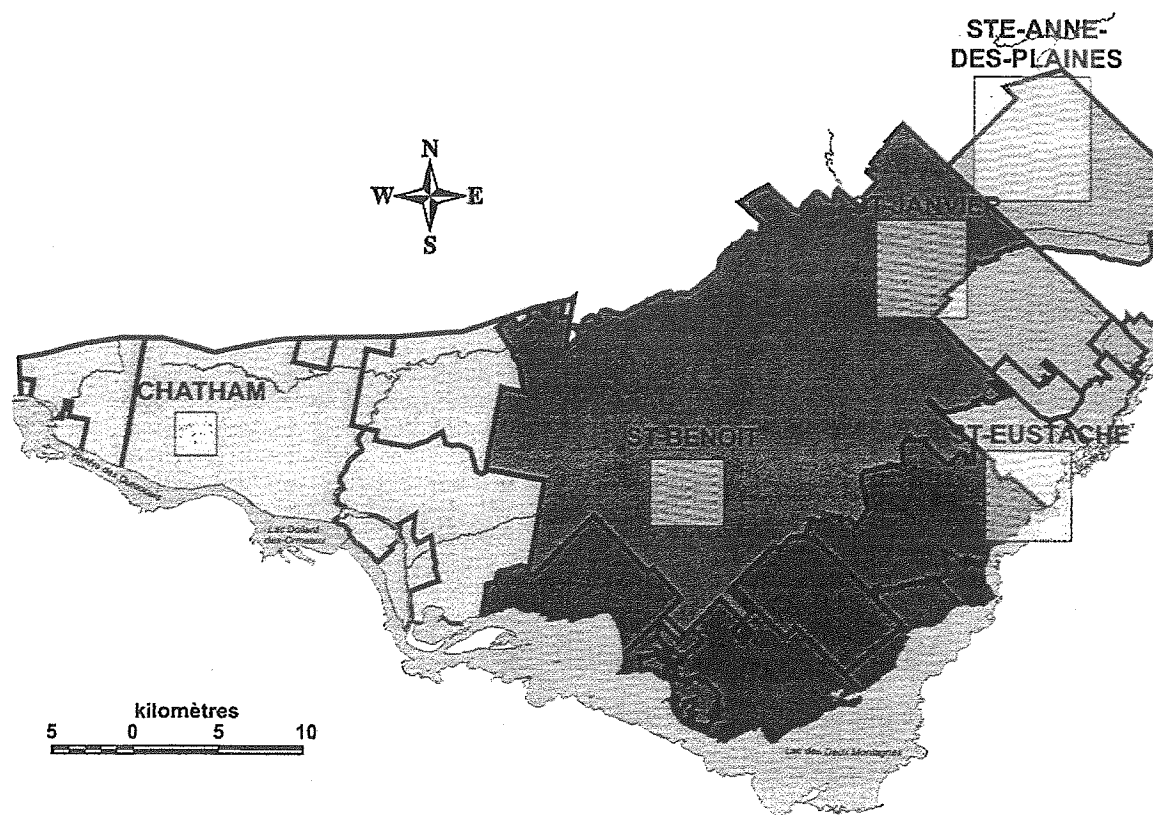


Figure 1.1 – Distribution des zones d'étude locale.

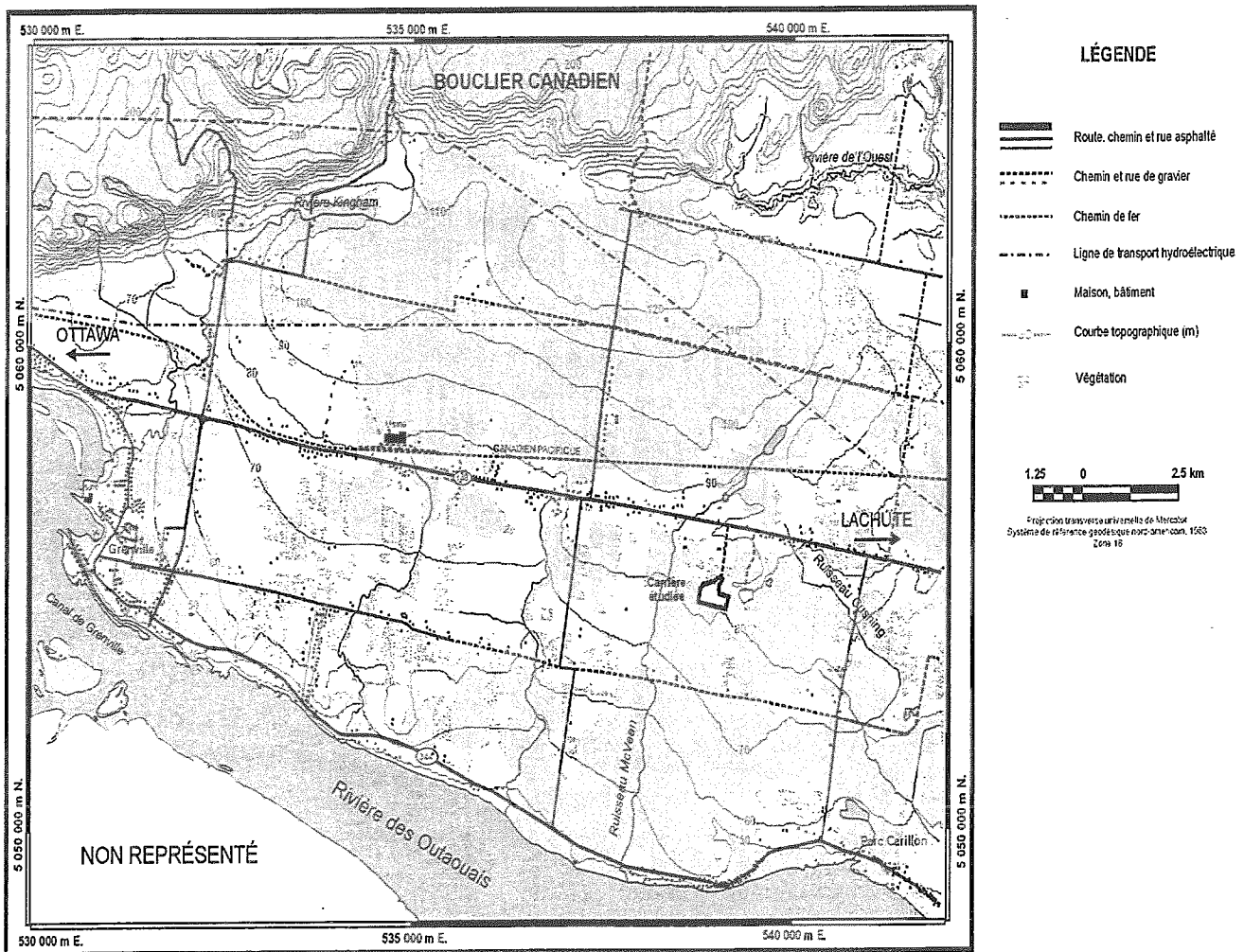


Figure 2.1 - Localisation et physiographie de la région de la carrière étudiée à Chatham.

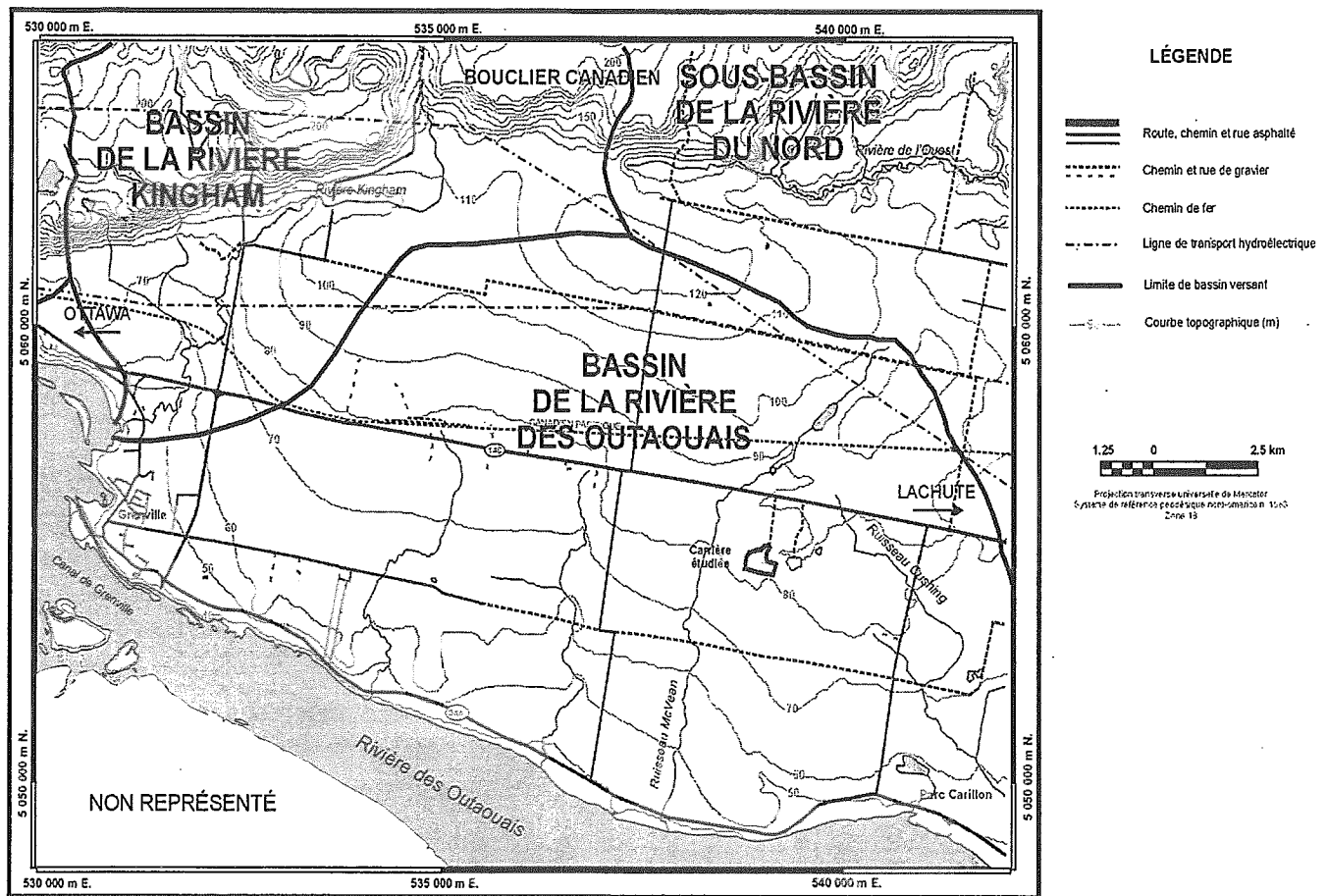


Figure 2.2 - Contexte hydrographique et hydrologique de l'étude locale.

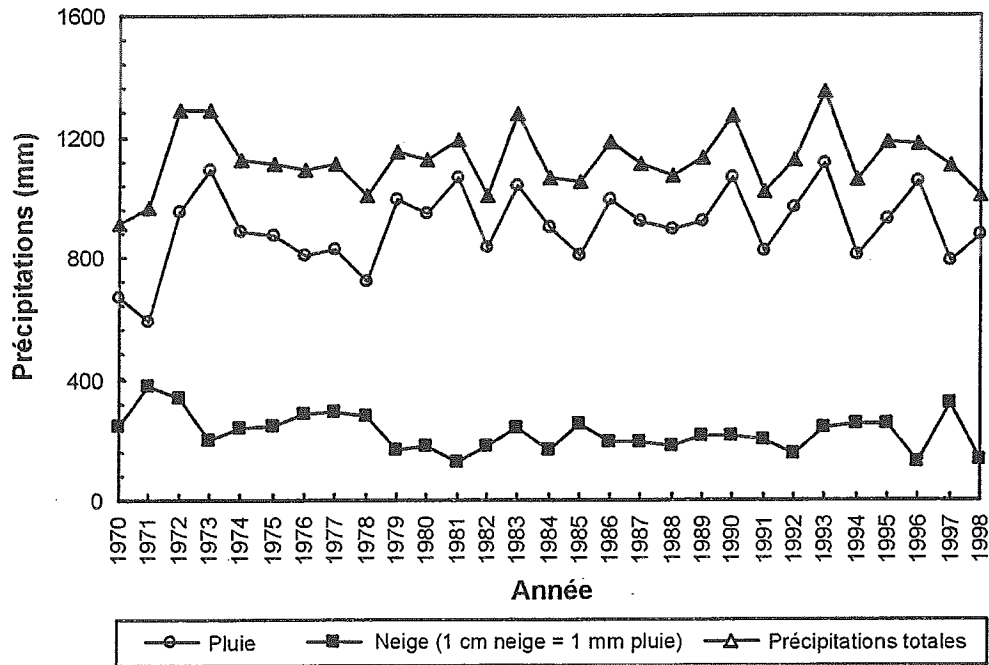


Figure 2.3 - Précipitations annuelles en pluie, en neige et totale calculées à partir des enregistrements de la station météorologique de Lachute pour la période de 1970 à 1998.

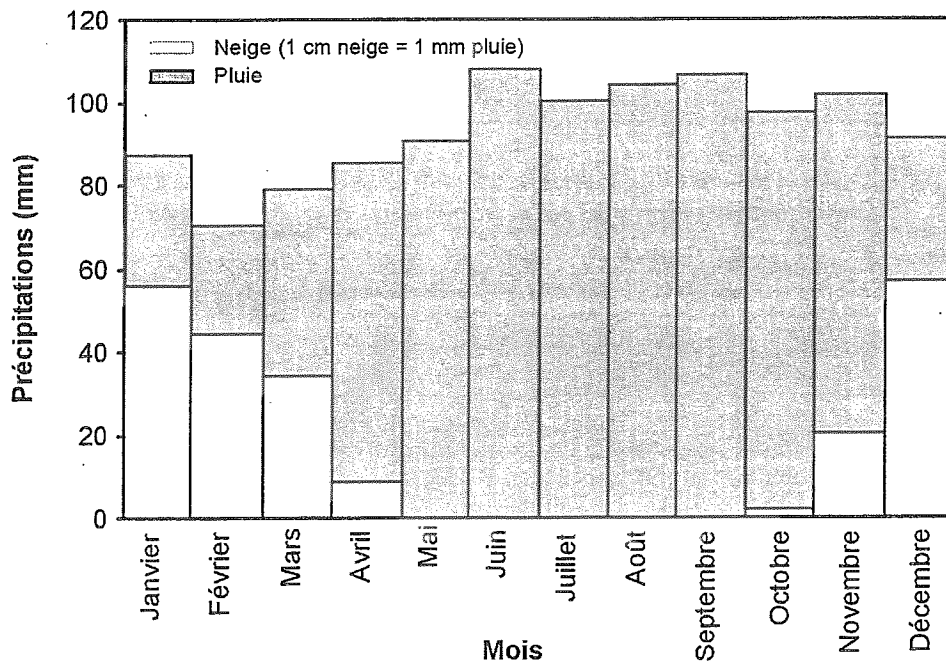


Figure 2.4 - Précipitations moyennes mensuelles en pluie, en neige et totale calculées à partir des enregistrements de la station météorologique de Lachute pour la période de 1970 à 1998.

Groupe	Formation	Membre	Description
Chazy	Laval	Beaconsfield	Calcilutite argileuse.
		Ste-Thérèse	Grès interstratifié avec des shales.
Beekmantown	Beauharnois		Dolomie.
	Theresa		Grès quartzitique, grès dolomitique et dolomie.

Figure 2.5 - Stratigraphie du socle rocheux observée dans le secteur de la carrière étudiée.

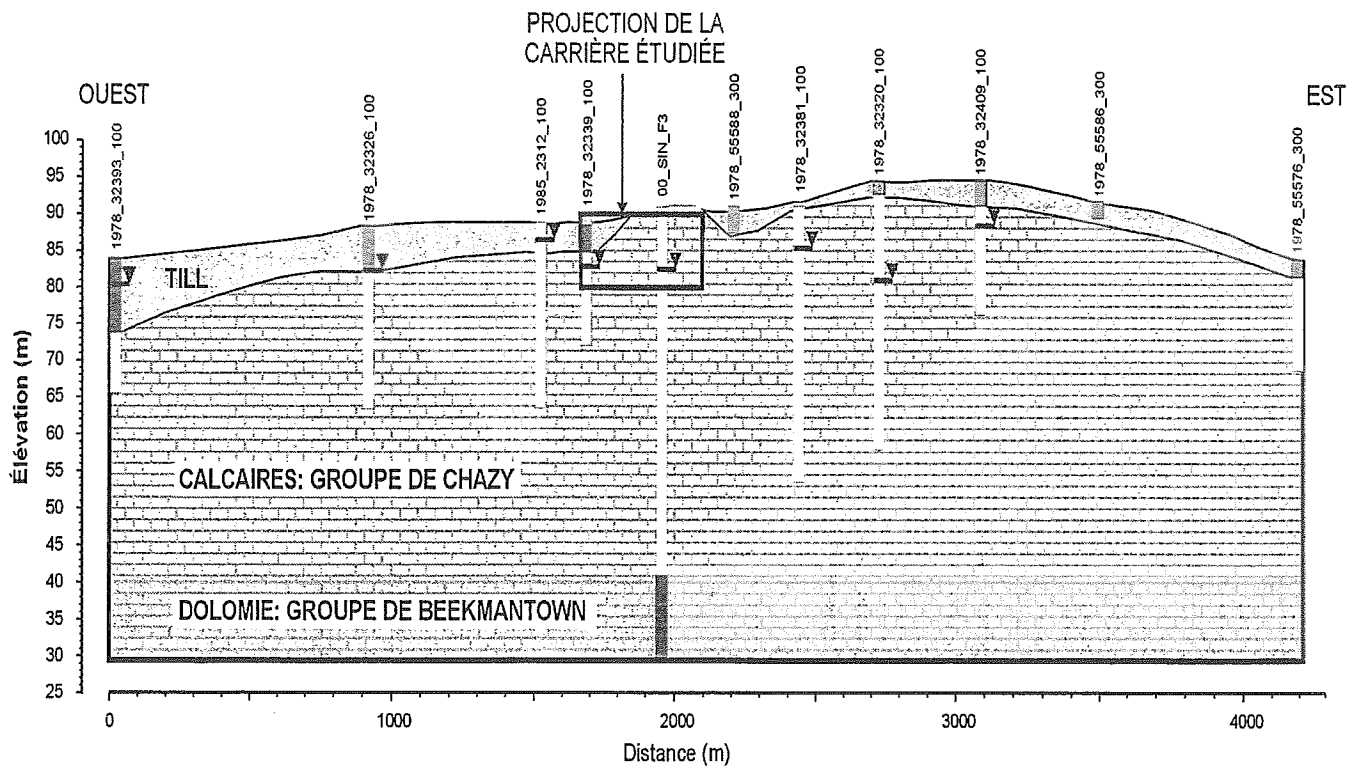


Figure 2.6 - Coupe géologique passant par la carrière étudiée à Chatham et montrant la distribution des dépôts de surface et le contact entre les calcaires du Groupe de Chazy et les dolomies du Groupe de Beekmantown.

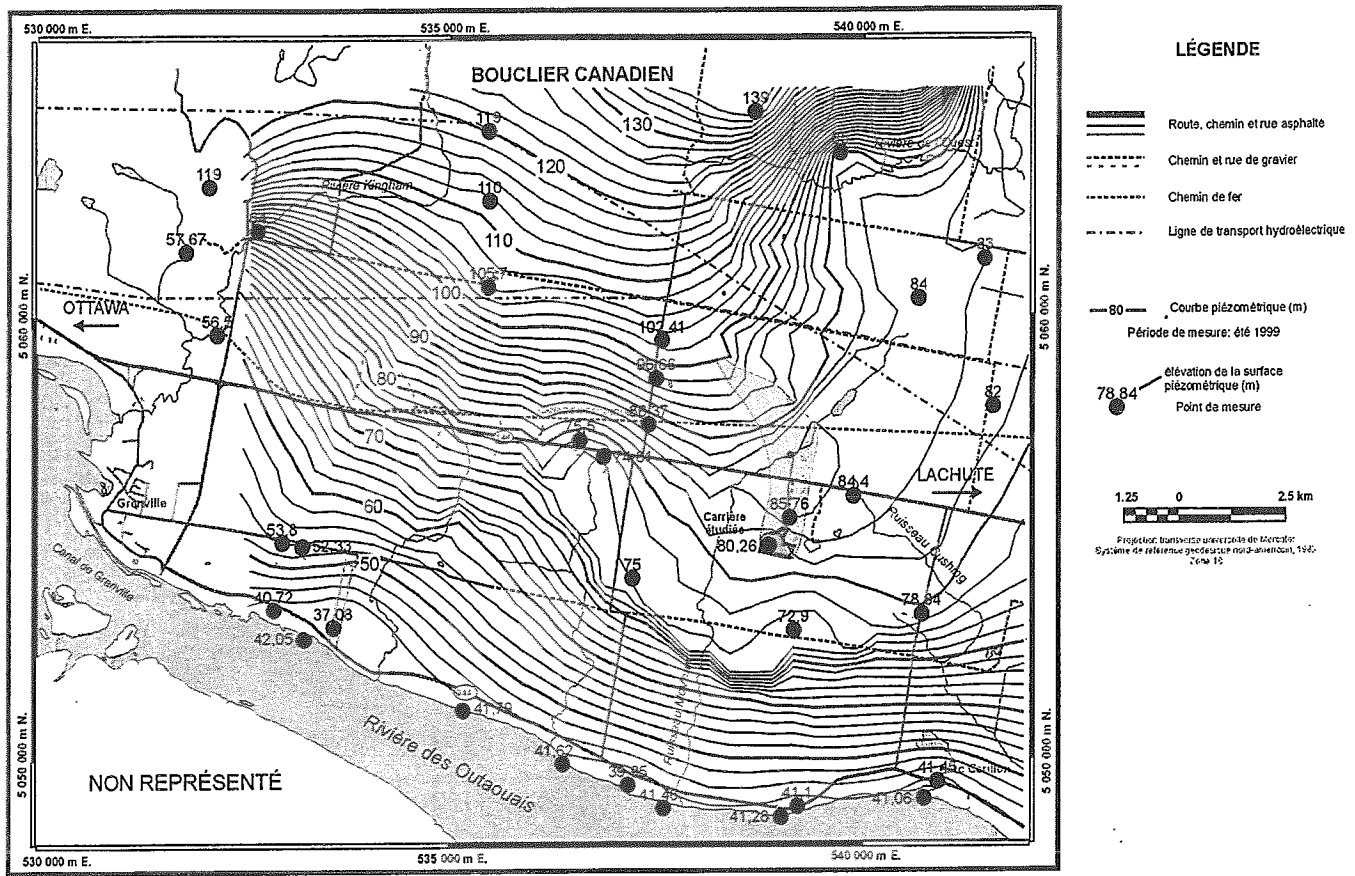


Figure 2.7 - Carte piézométrique de l'aquifère libre de calcaires du Groupe de Chazy, et aire d'alimentation de la carrière étudiée pendant l'été 1999.

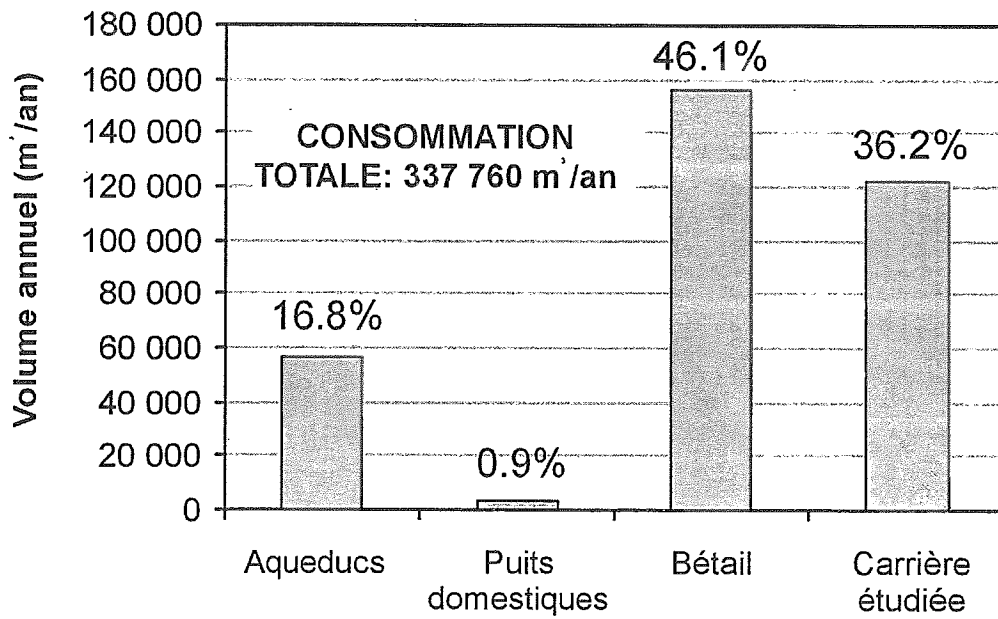


Figure 2.8 - Bilan de la consommation d'eau souterraine par type d'utilisation pour la municipalité de Brownsburg-Chatham pour la période de 1998-2000.

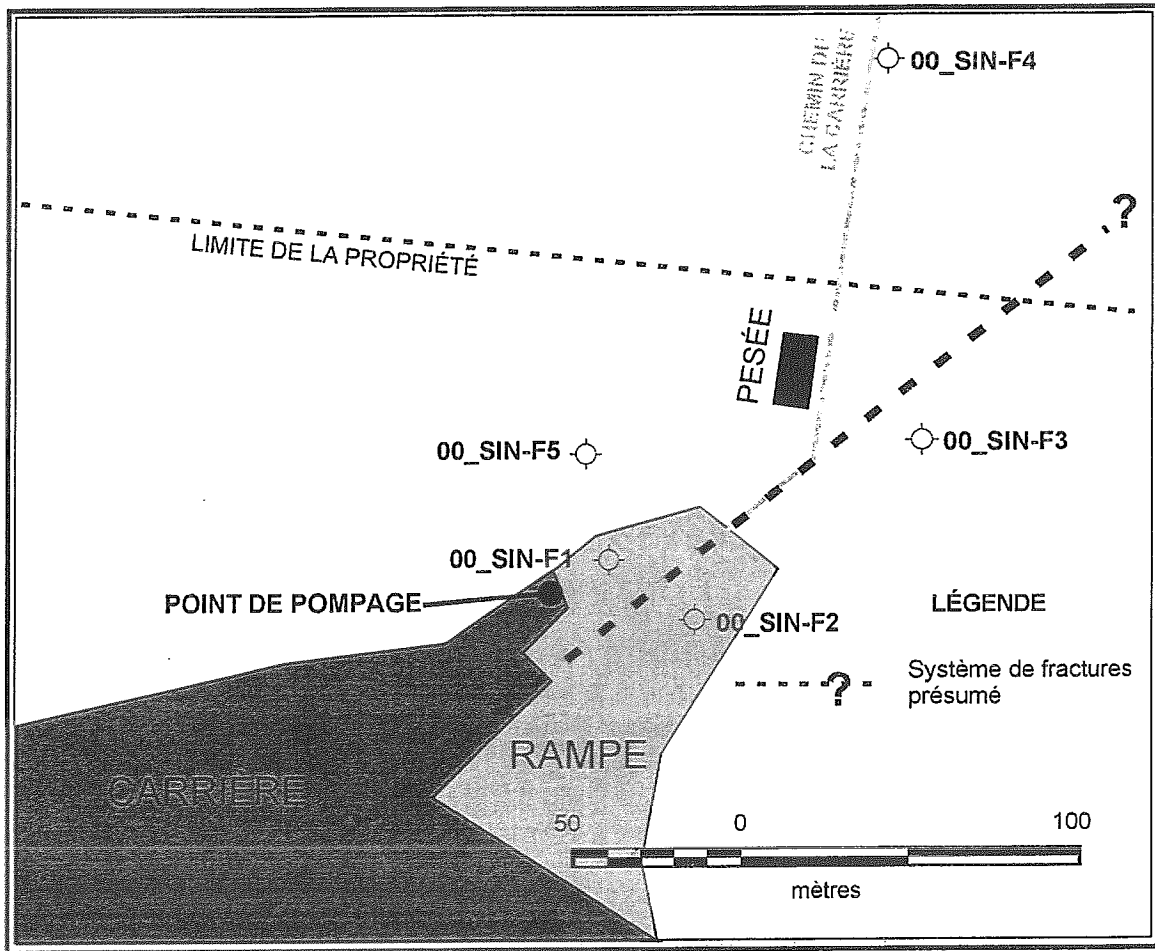


Figure 2.9 - Localisation des puits d'observation utilisés pour les essais à charge constante (Lugeon) et les essais de perméabilité *in situ* aux différents puits d'observation de la carrière étudiée.

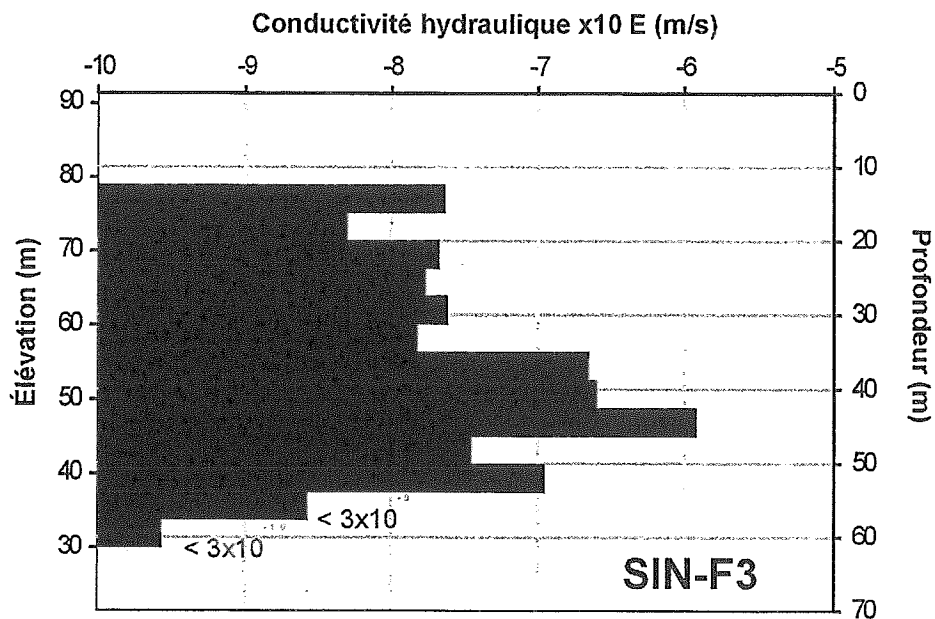


Figure 2.10 - Profil de conductivité hydraulique selon l'élévation ou la profondeur pour le puits d'observation 00_SIN-F3.

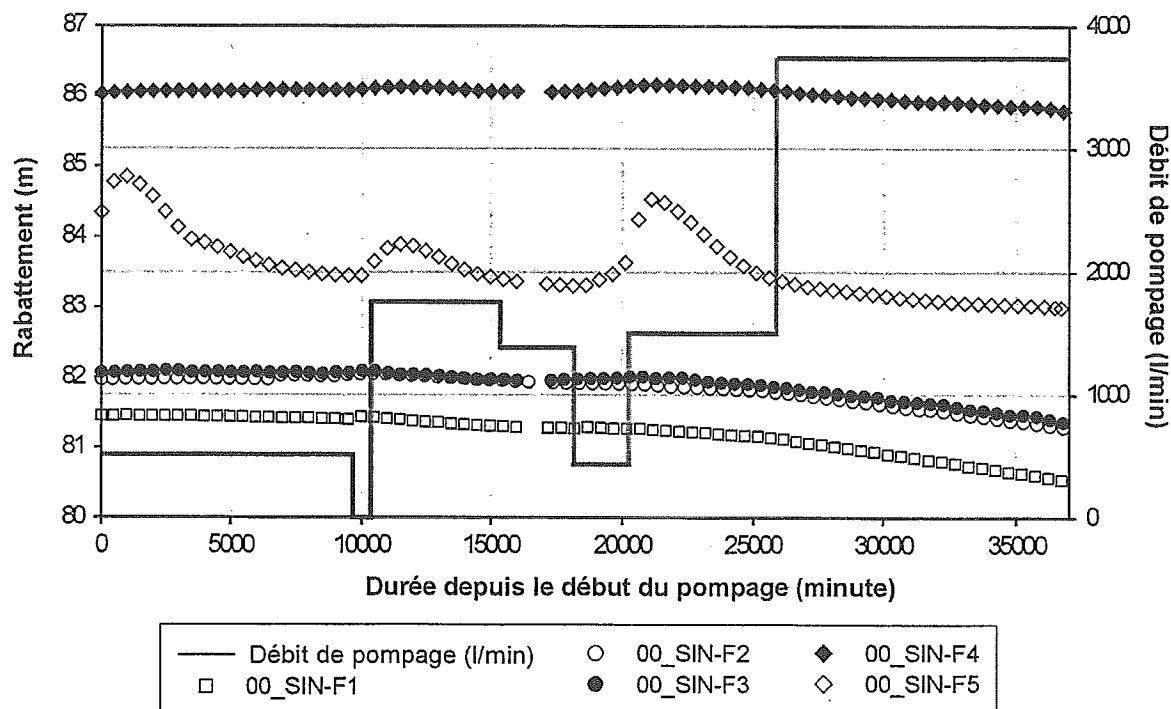


Figure 2.11 - Fluctuations des niveaux piézométriques dans les puits d'observation 00_SIN-F1 à F5 et du débit de pompage de la carrière étudiée.

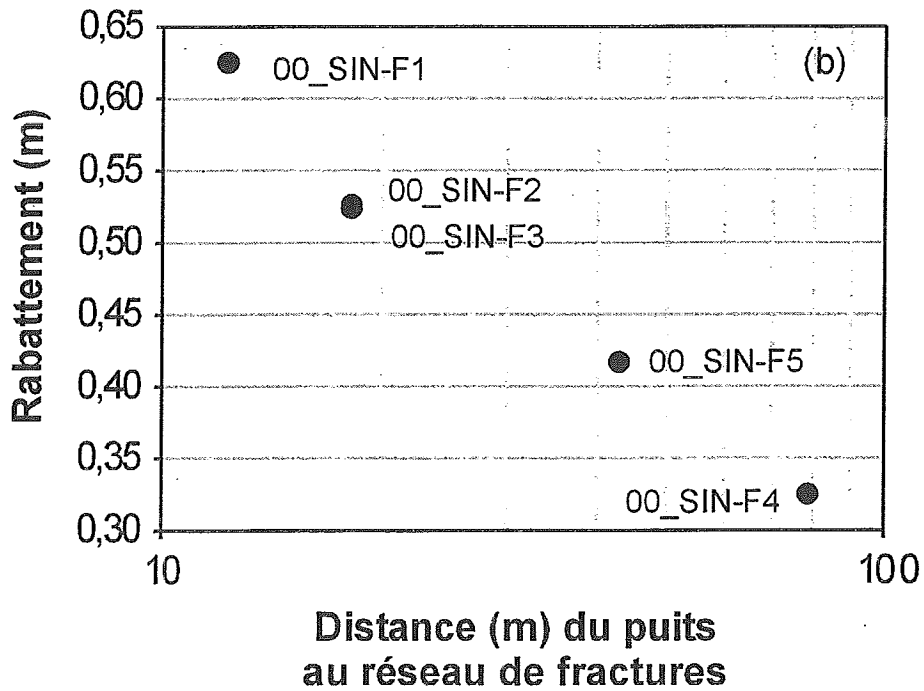
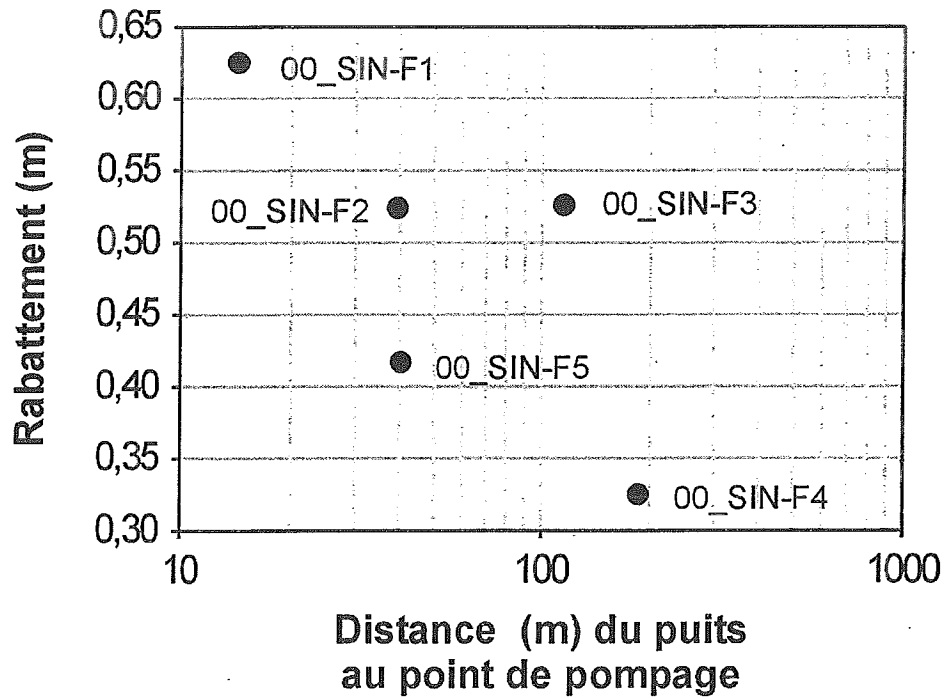


Figure 2.12 - Rabattements aux puits d'observation 00_SIN-F1 à F5 par rapport : (a) au point de pompage de la carrière étudiée, et (b) au réseau de fractures orienté N50°.

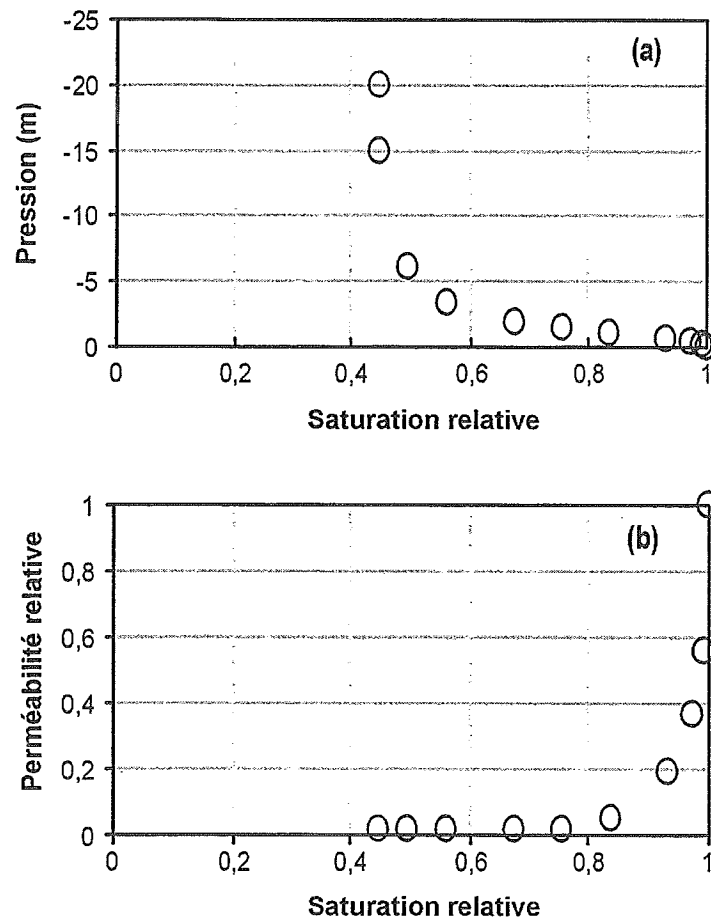


Figure 2.13 - Courbe de capillarité (a) et de perméabilité relative (b) des calcaire du Groupe de Chazy.

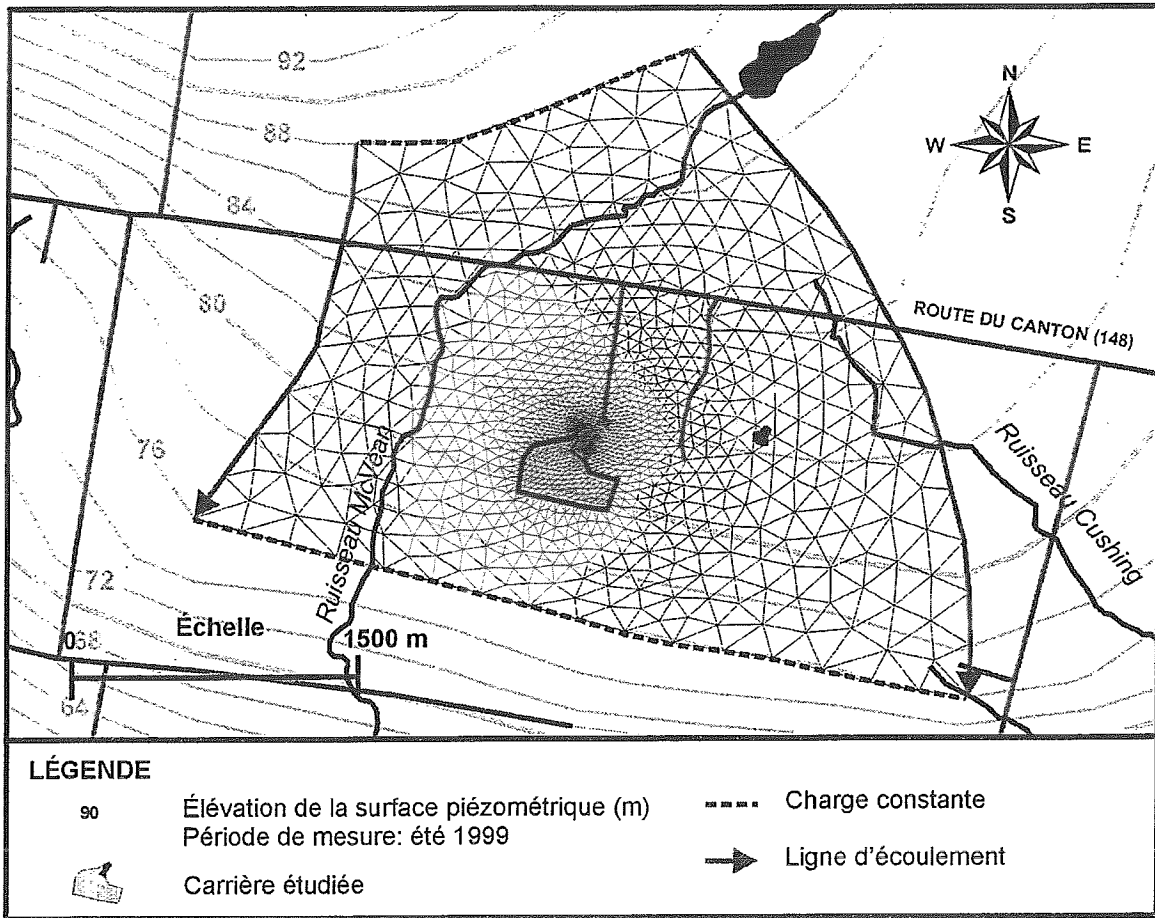


Figure 2.14 - Limites latérales et maillage horizontal du modèle numérique de la carrière étudiée.

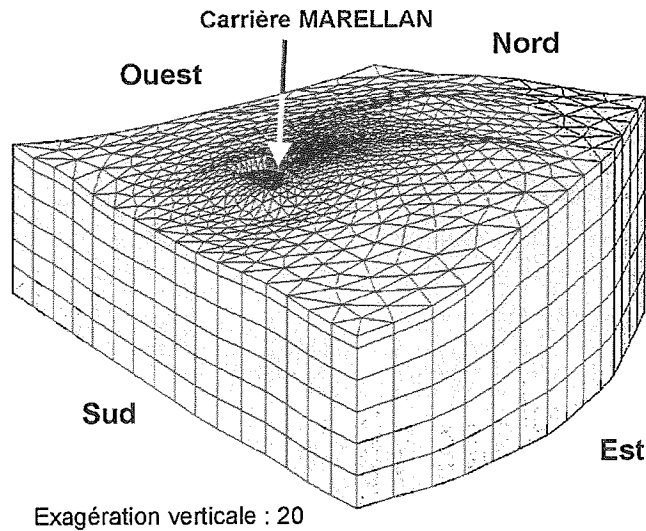


Figure 2.15 - Maillage tridimensionnel du modèle numérique de la carrière étudiée.

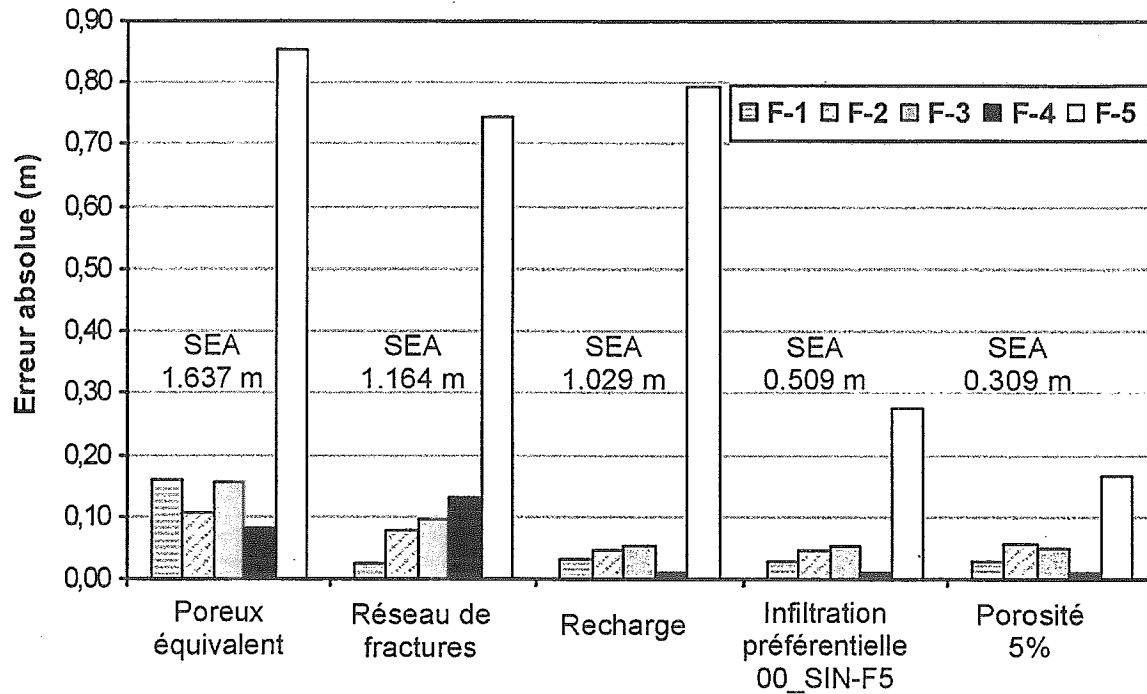


Figure 2.16 - Évolution de l'erreur absolue en fonction des différents modèles conceptuels testés pour l'aquifère de la carrière étudiée. Note: SEA = Somme des Erreurs Absolues.

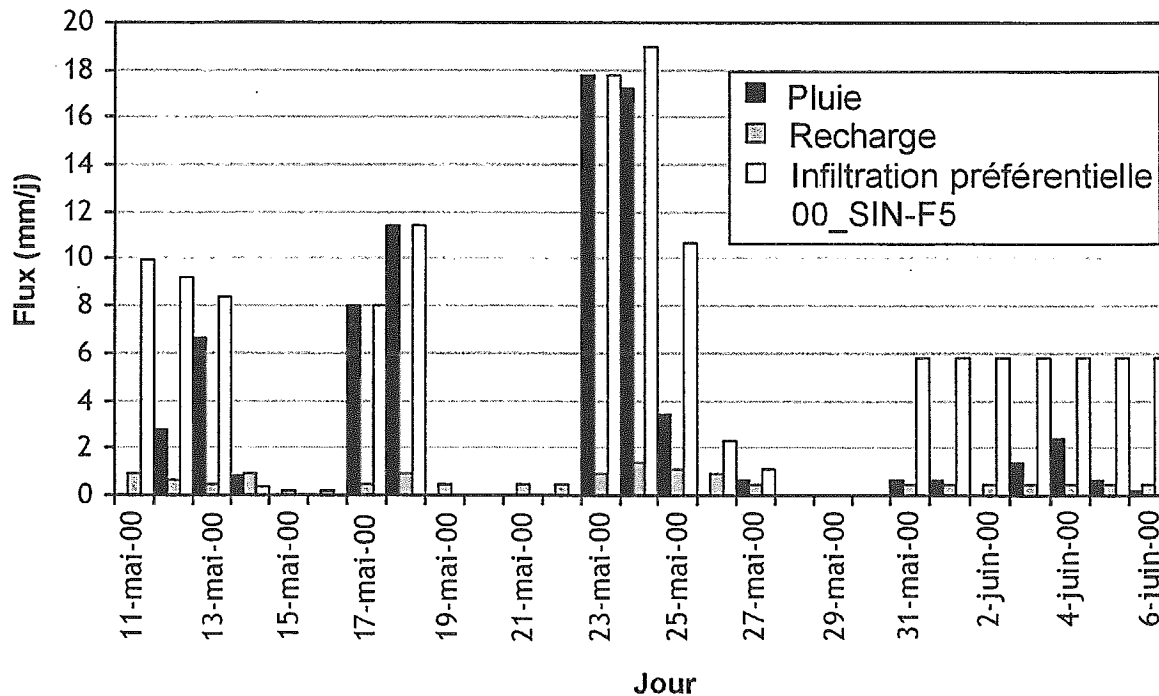


Figure 2.17 -Recharge et infiltration préférentielle calibrées et précipitations mesurées au cours de l'essai de pompage du 11 mai au 6 juin 2000.

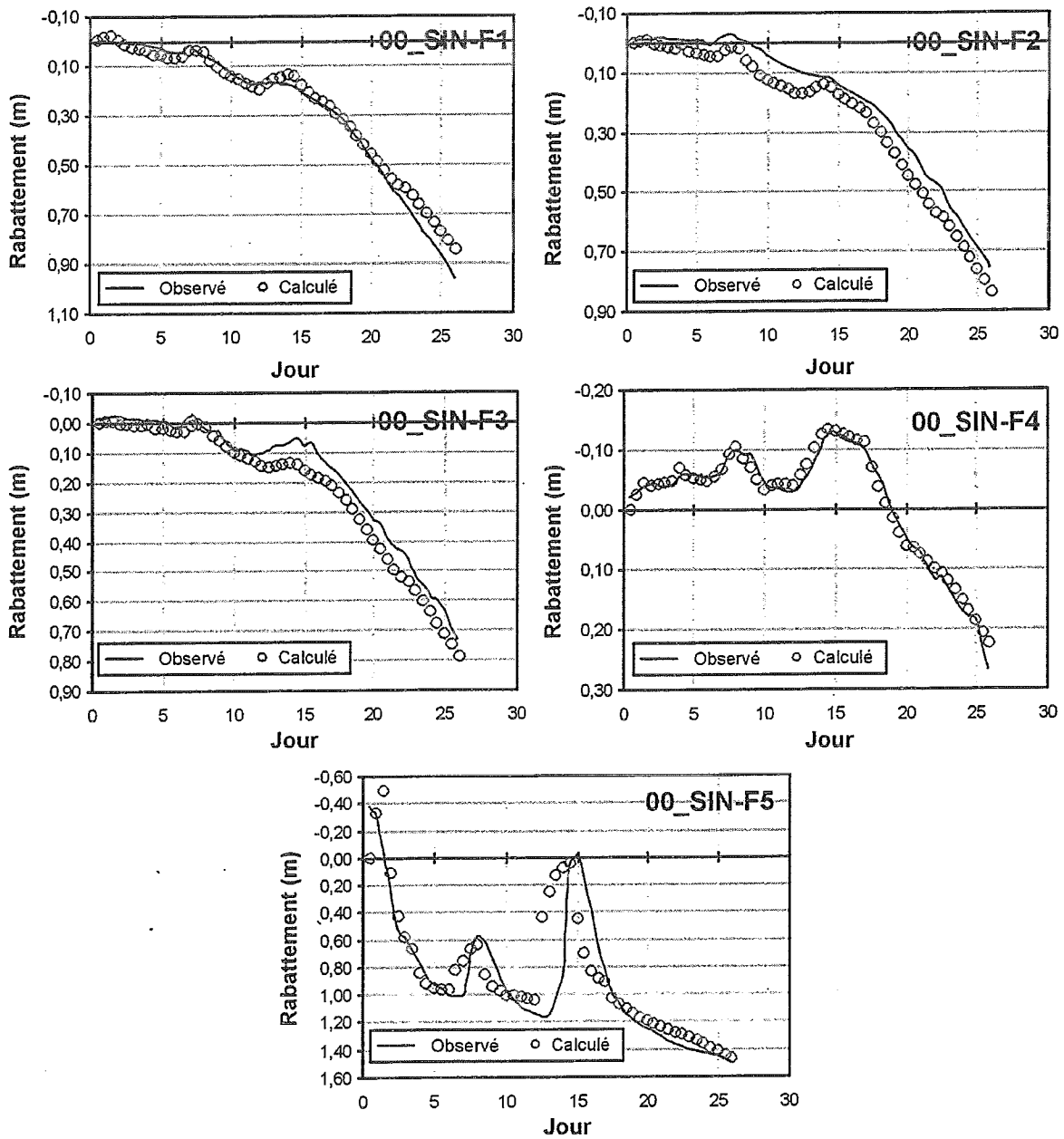


Figure 2.18 - Courbes de rabattement observées en fonction du temps pour les puits 00_SIN-F1 à F5, superposées aux meilleurs résultats simulés impliquant un modèle conceptuel avec un réseau de fractures, une recharge et une infiltration préférentielle variables et une porosité de 5%.

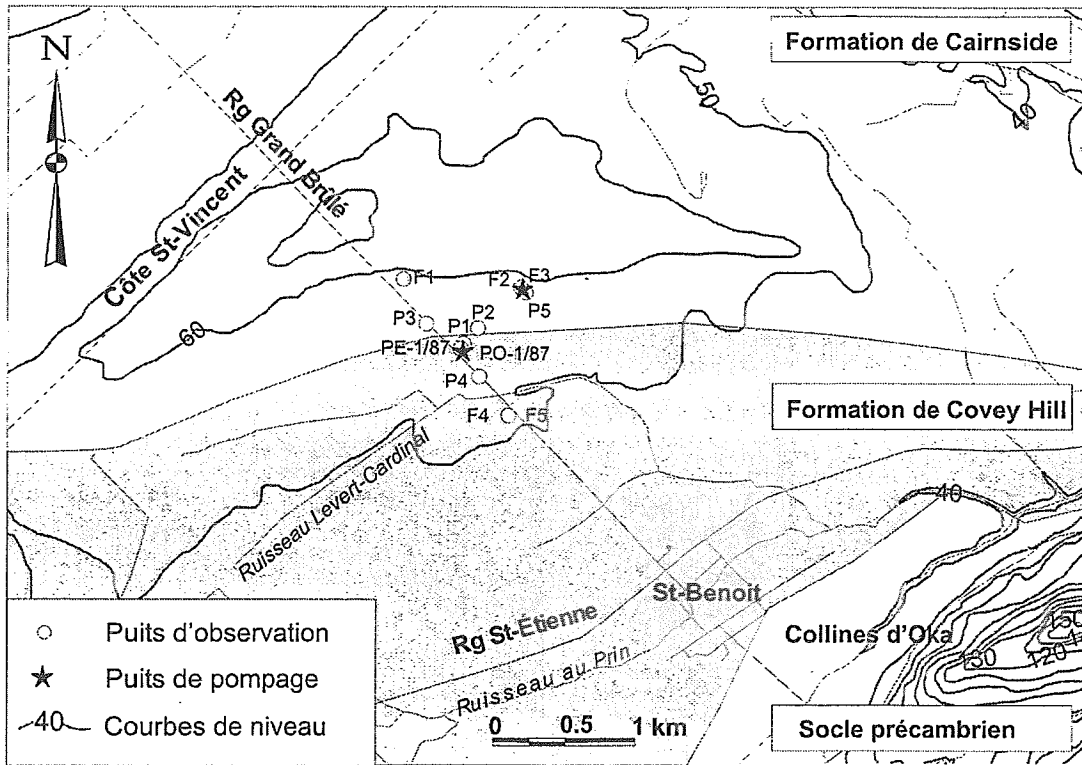


Figure 3.1 - Localisation de la zone étudiée, topographie, géologie, et installations à l'endroit du puits de pompage actuel PE-1/87.

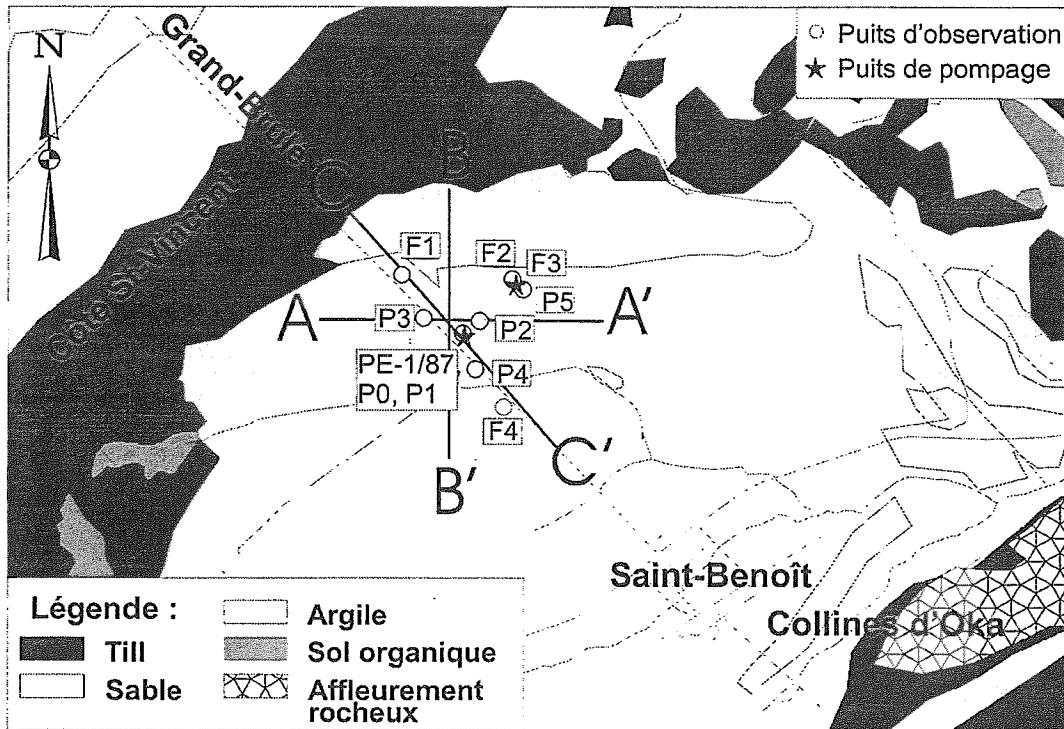


Figure 3.2 - Géologie quaternaire simplifiée et localisation des coups

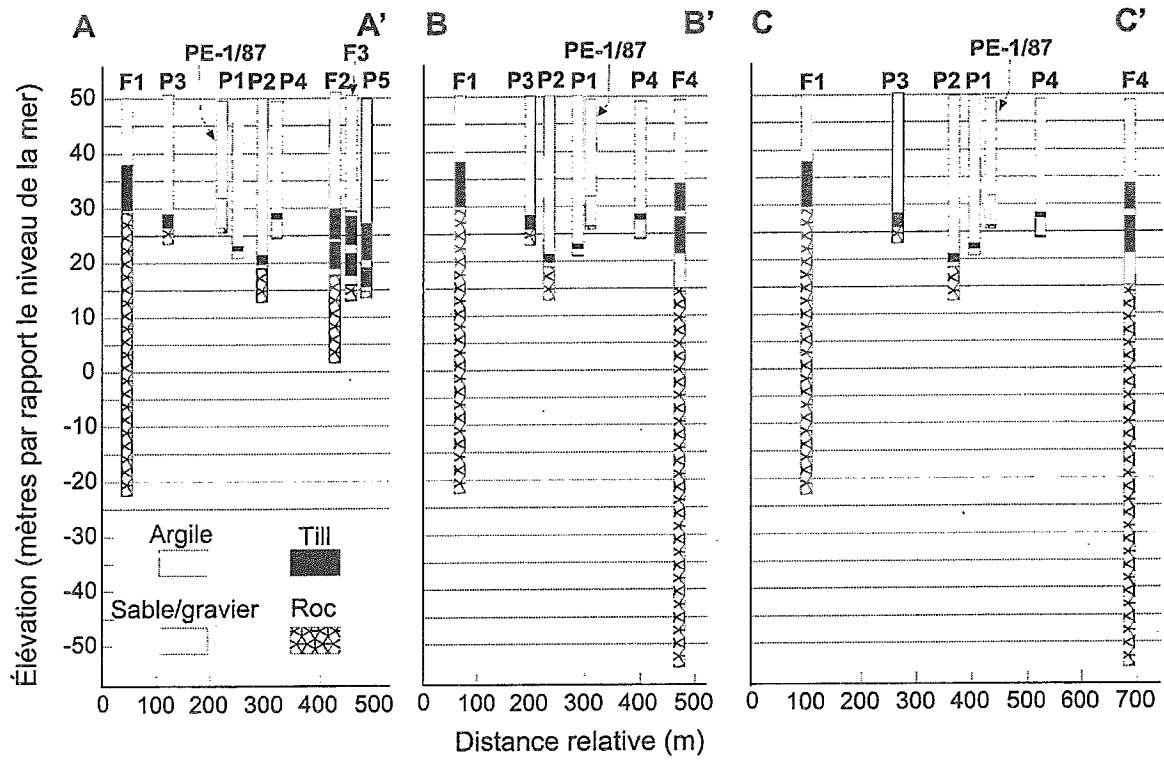


Figure 3.3. - Coupes stratigraphiques.

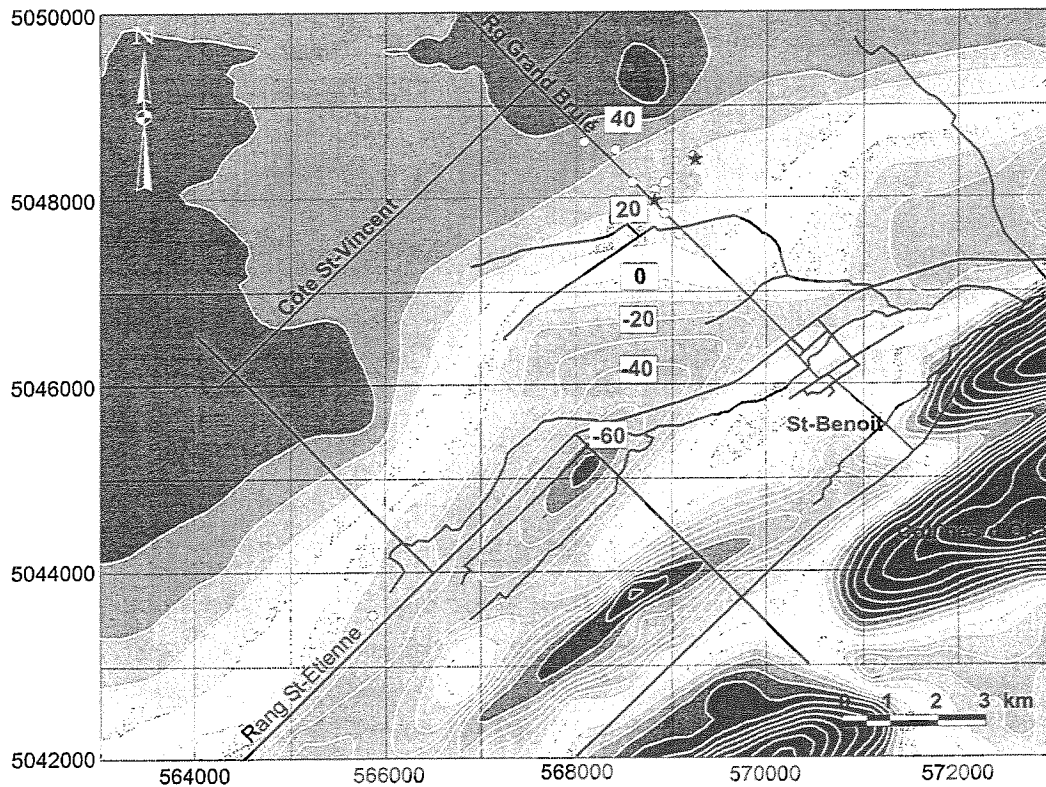


Figure 3.4 - Topographie de la séquence rocheuse.

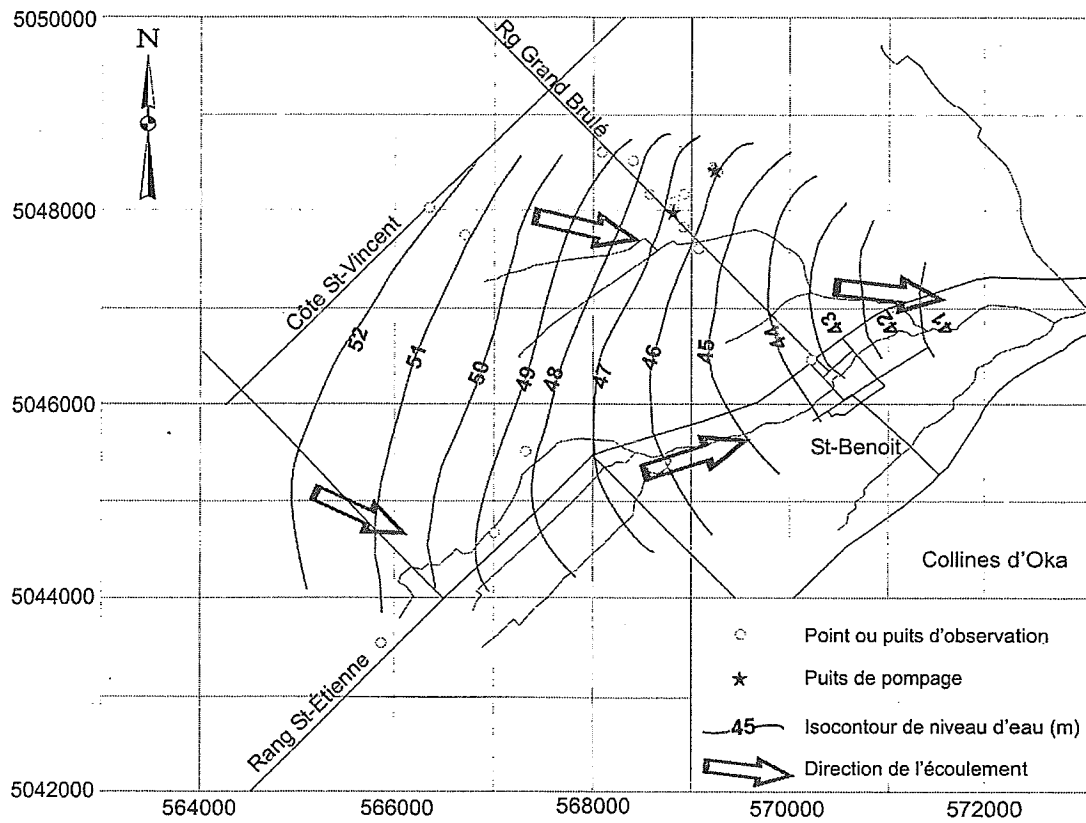


Figure 3.5 - Piézométrie tel qu'observé en début mai 2000.

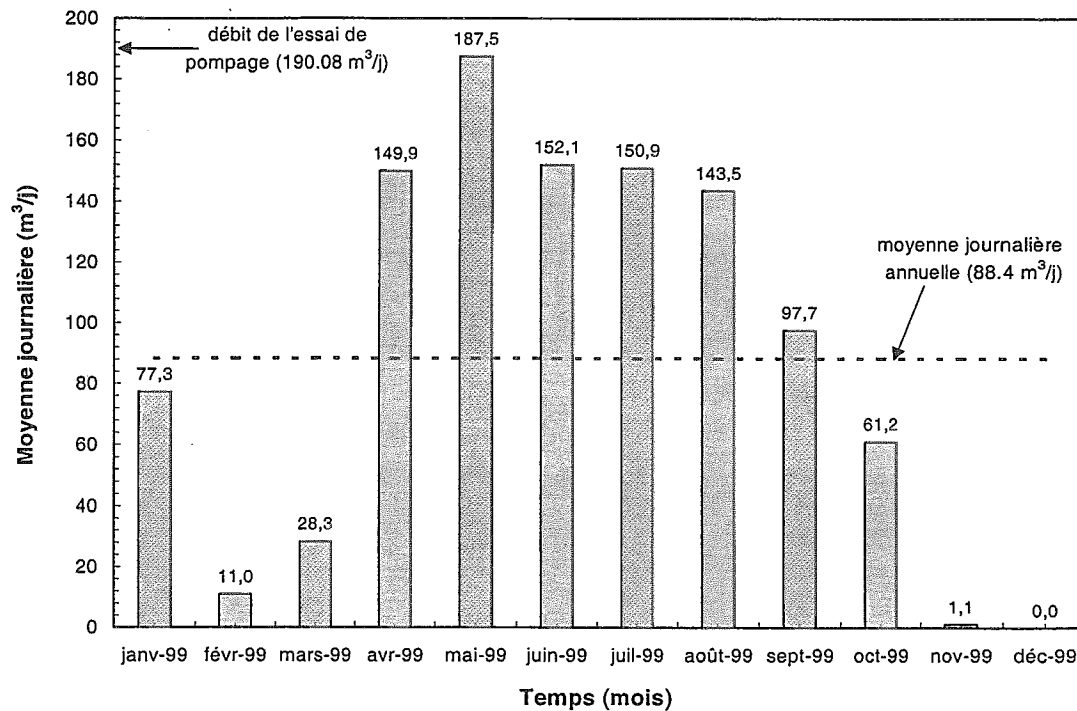


Figure 3.6 - Pompage d'eau souterraine au puits municipal PE-1/87 en 1999.

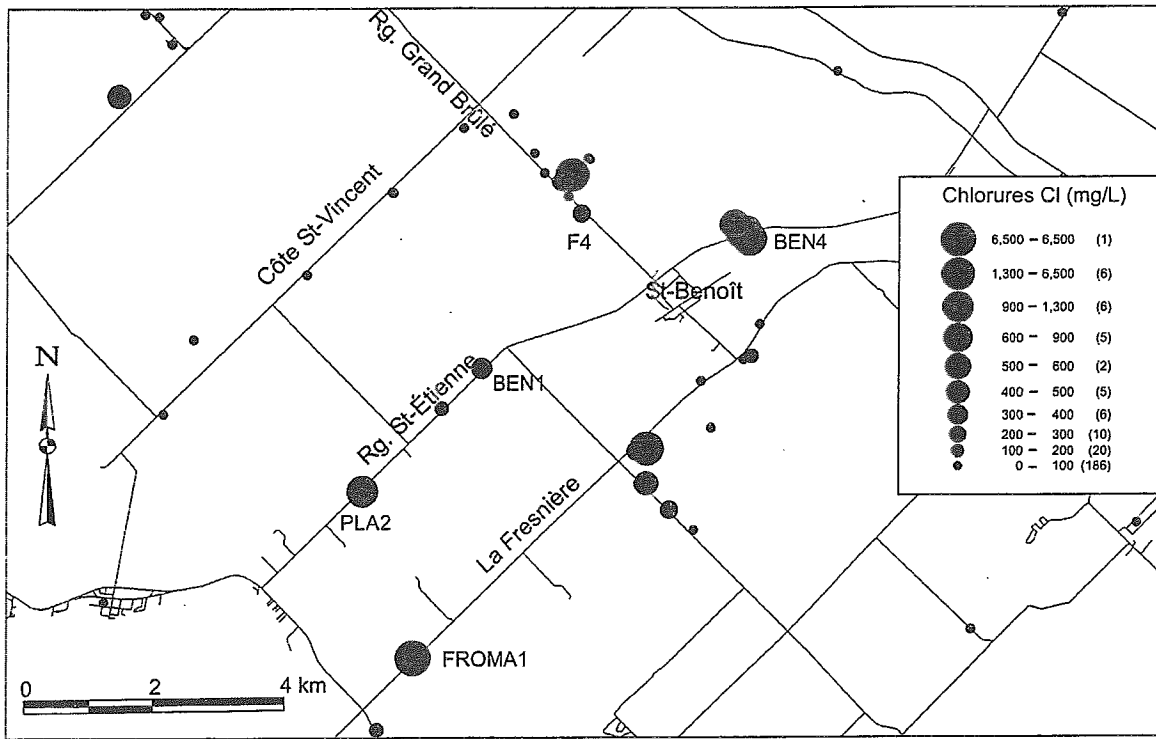


Figure 3.7 - Concentrations de chlorures (mg/L) dans le secteur.

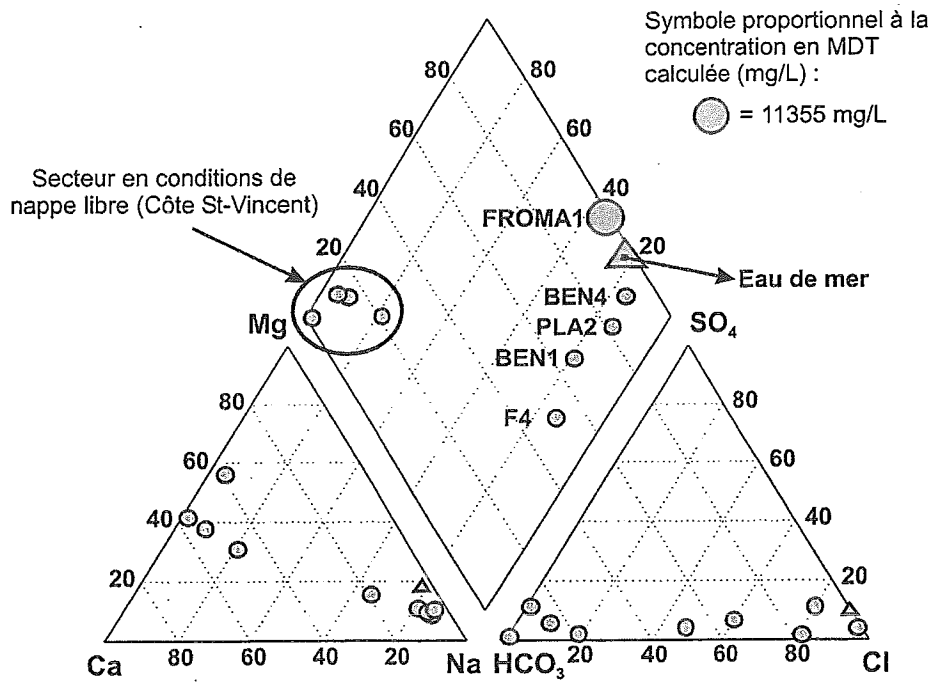


Figure 3.8 - Diagramme Piper de la région de Saint-Benoît.

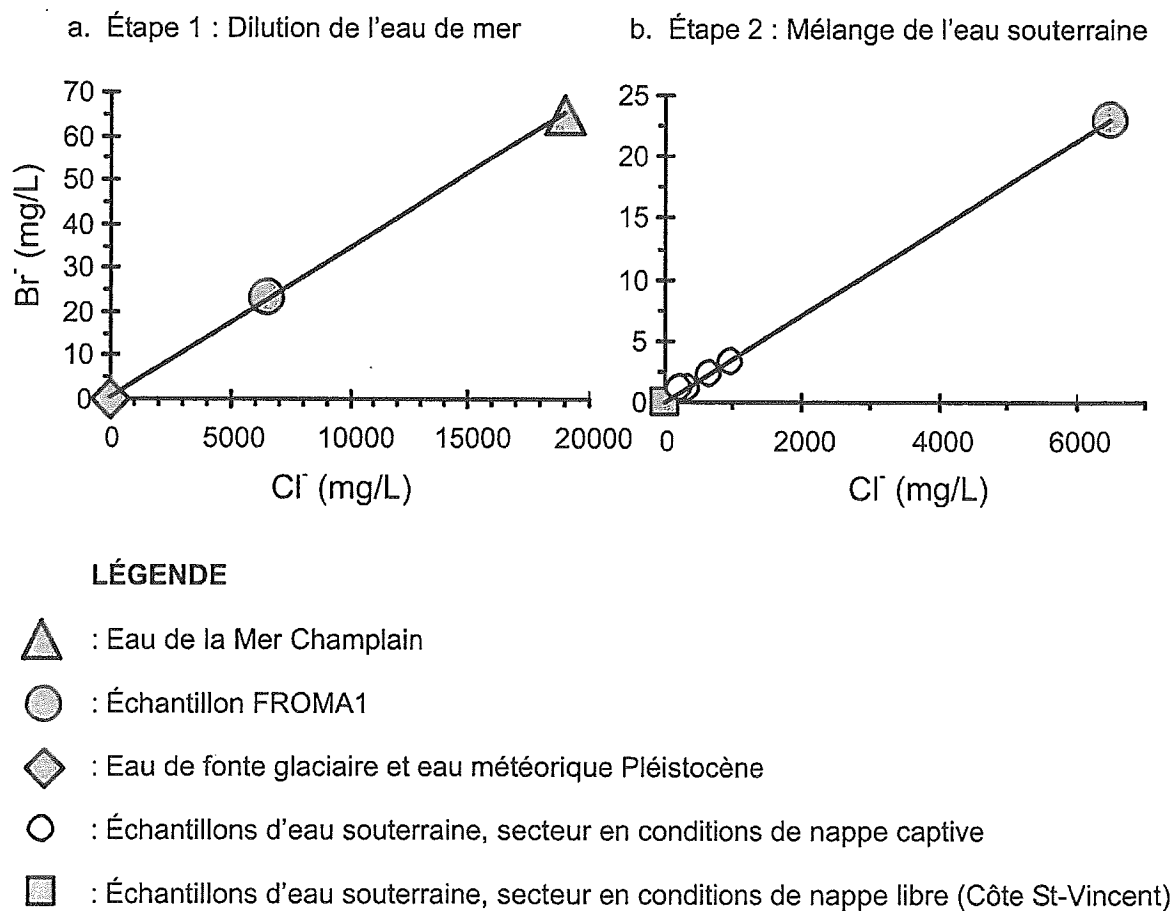


Figure 3.9 - Modèle sur l'origine de la salinité dans la région de Saint-Benoît.

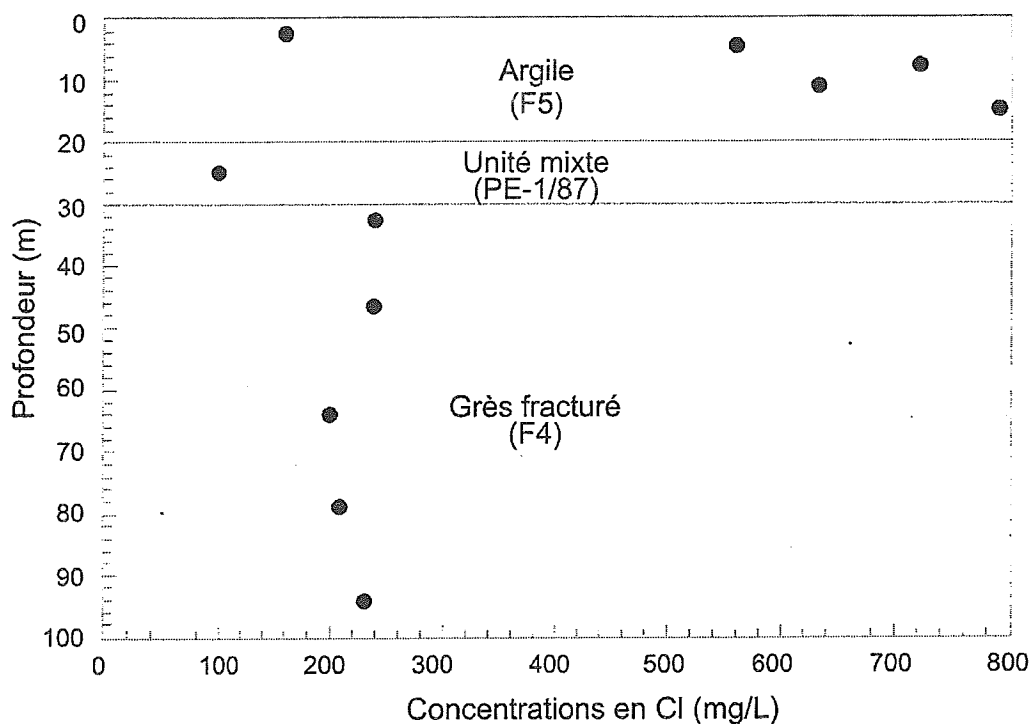


Figure 3.10 Profil vertical des concentrations en Cl.

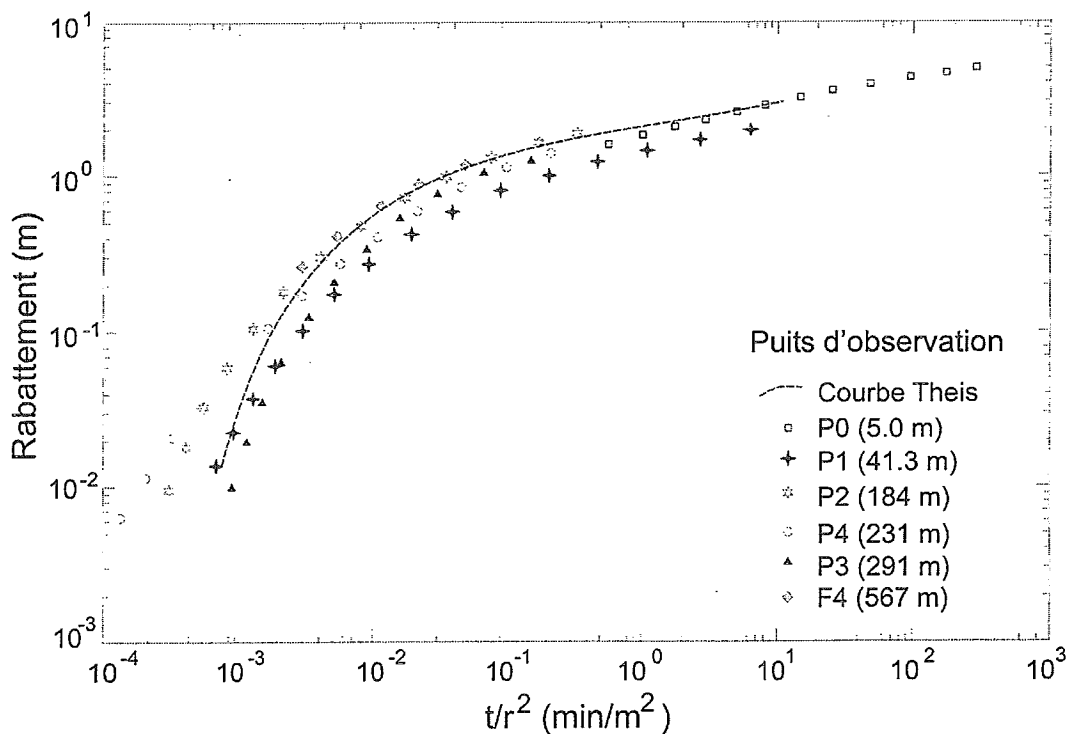


Figure 3.11 Rabattement en fonction de t/r^2 pour l'essai de pompage au puits PE-1/87 dans la formation mixte pour un débit de pompage: $190.8 \text{ m}^3/\text{j}$.

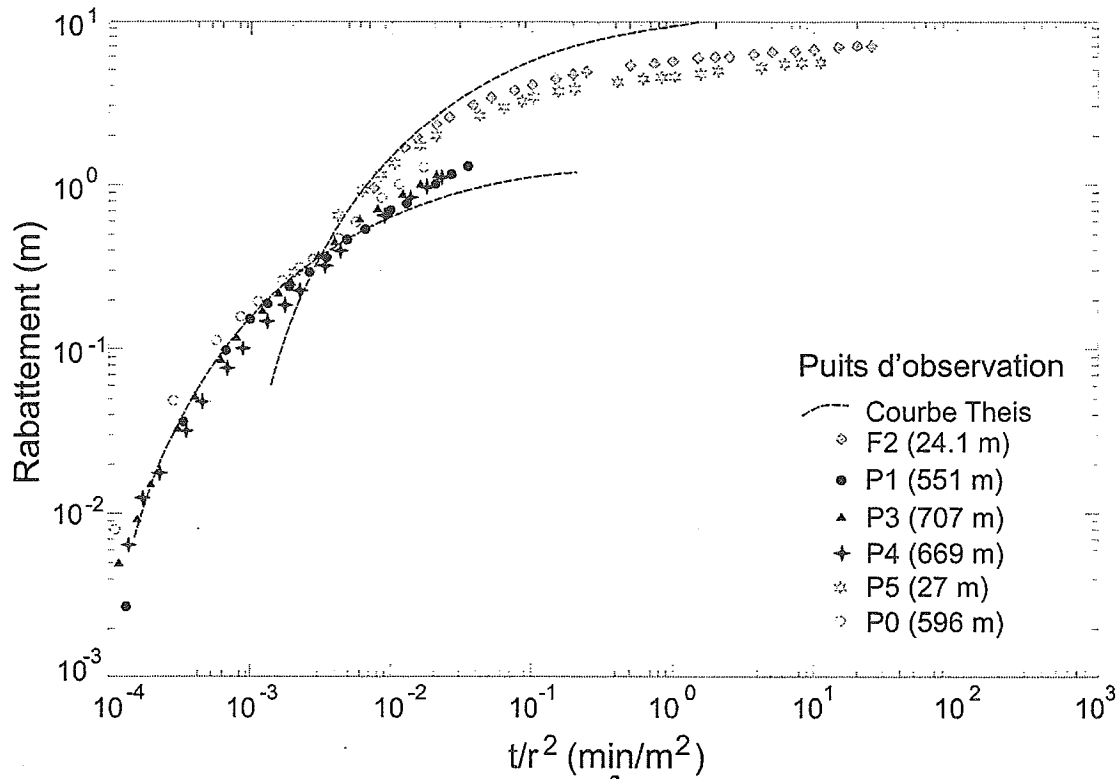


Figure 3.12 Rabattement en fonction de t/r^2 pour l'essai de pompage au puits F3 dans la formation de roc fracturé pour un débit de pompage: $218.1 \text{ m}^3/\text{j}$.

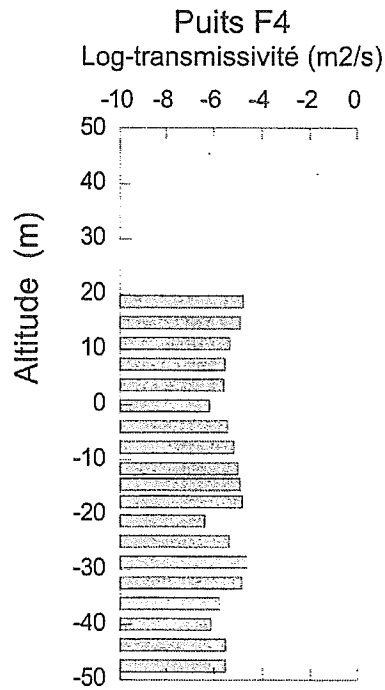


Figure 3.13 - Profil de la transmissivité dans le puits F4 déterminé par des essais Lugeon

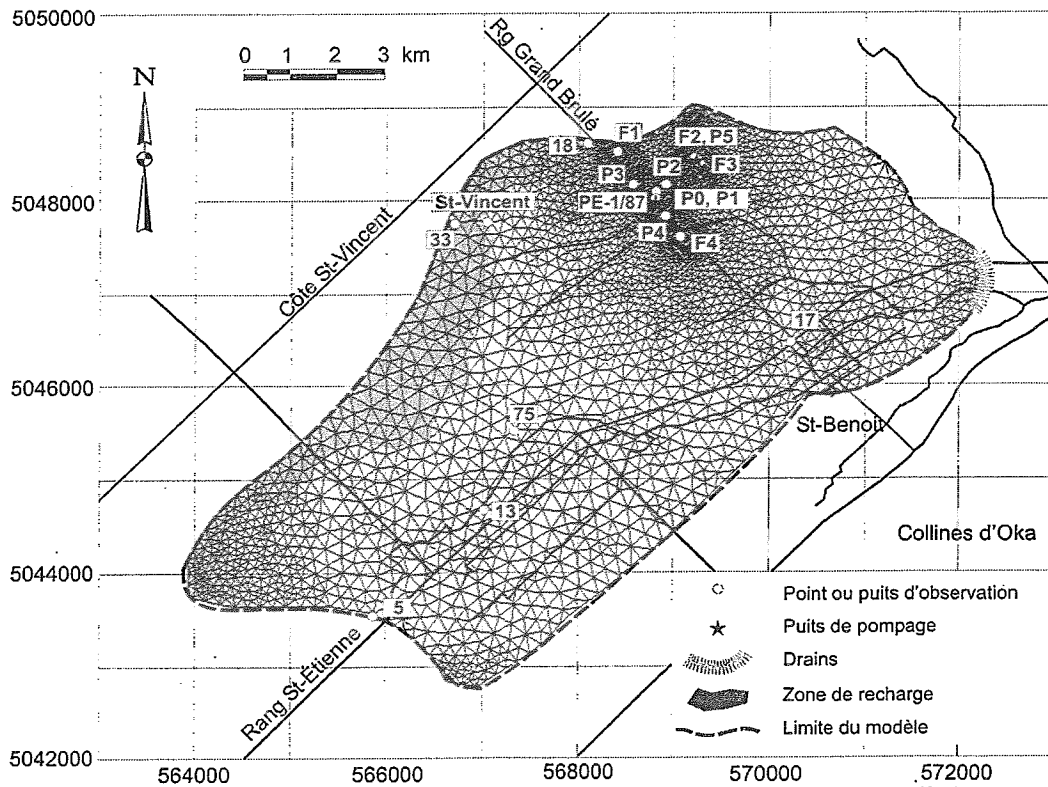


Figure 3.14 - Maillage d'éléments finis, conditions aux limites et points d'observation.

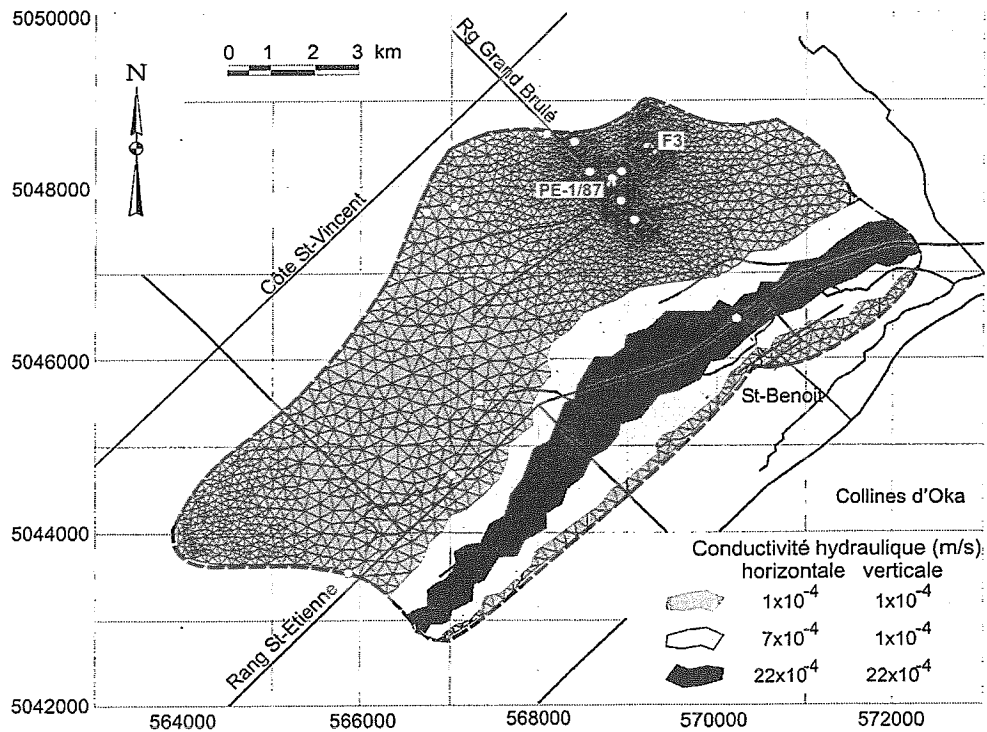


Figure 3.15 - Distribution de la conductivité hydraulique calée de la couche I.

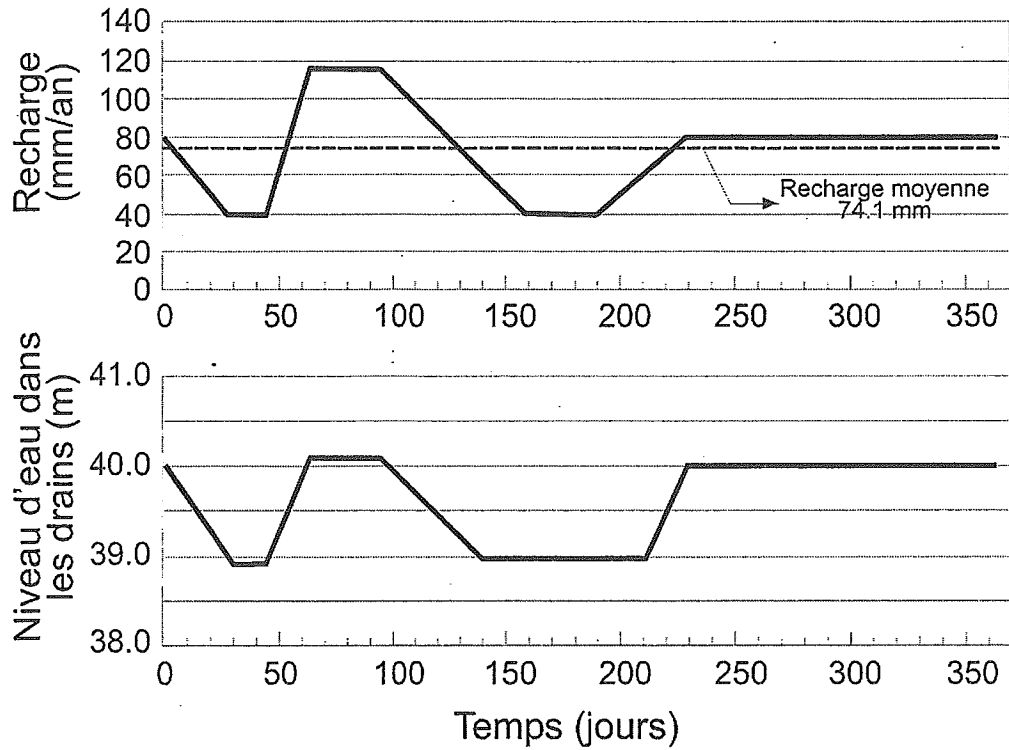


Figure 3.16 - Variations saisonnières du taux de la recharge et des niveaux piézométriques à la sortie du bassin versant (drains dans le modèle numérique).

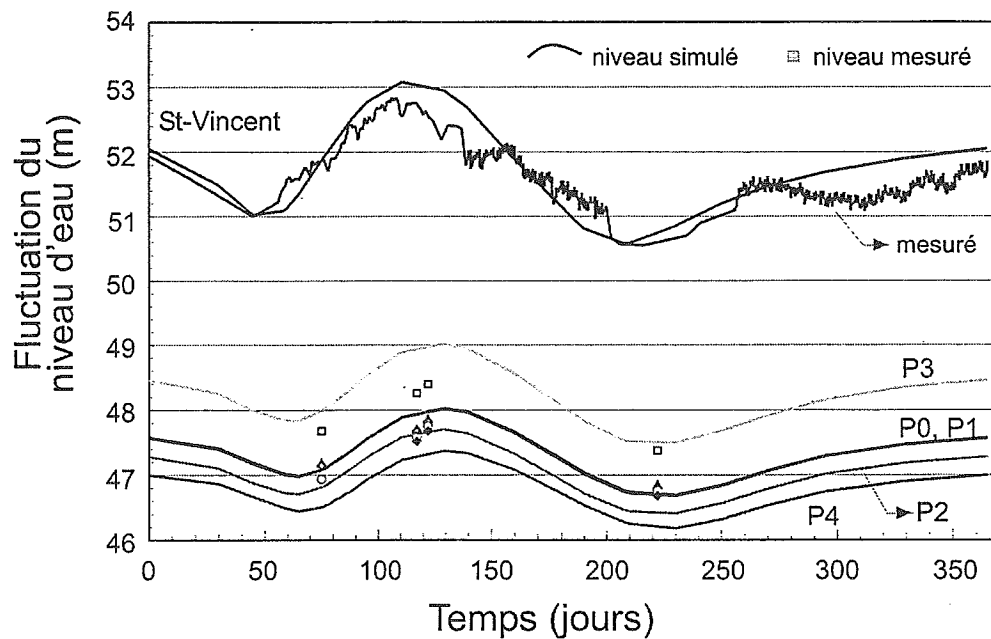


Figure 3.17 - Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés.

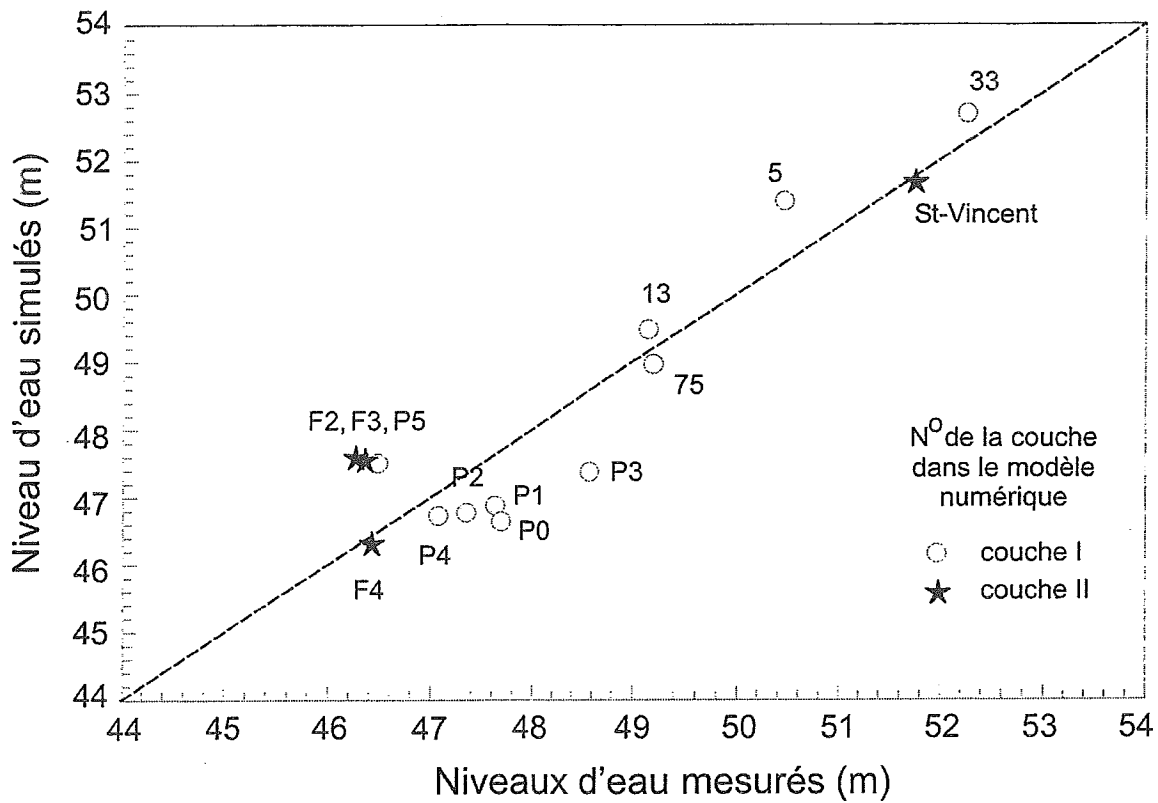


Figure 3.18 - Relation entre les niveaux d'eau mesurés et simulés le 10 août 2000.

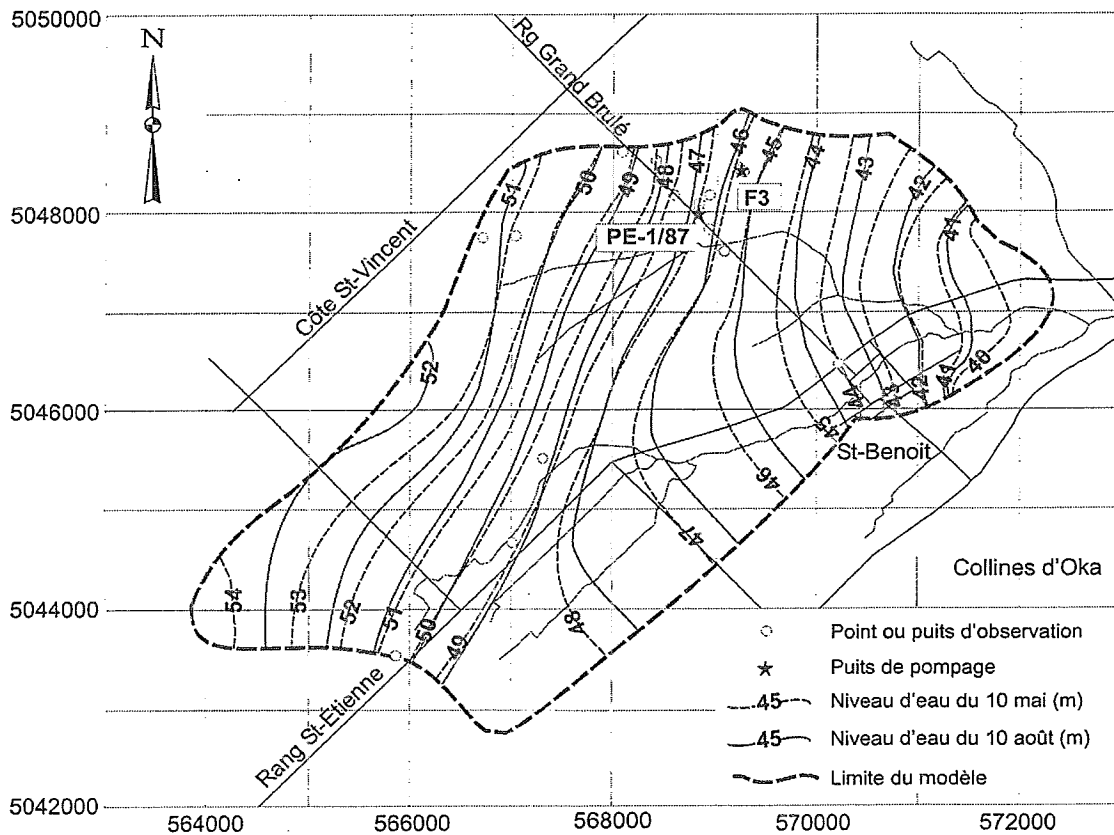


Figure 3.19 - Charge hydraulique simulée en régime transients pour la couche I, pour le 10 mai et le 10 août, 2000.

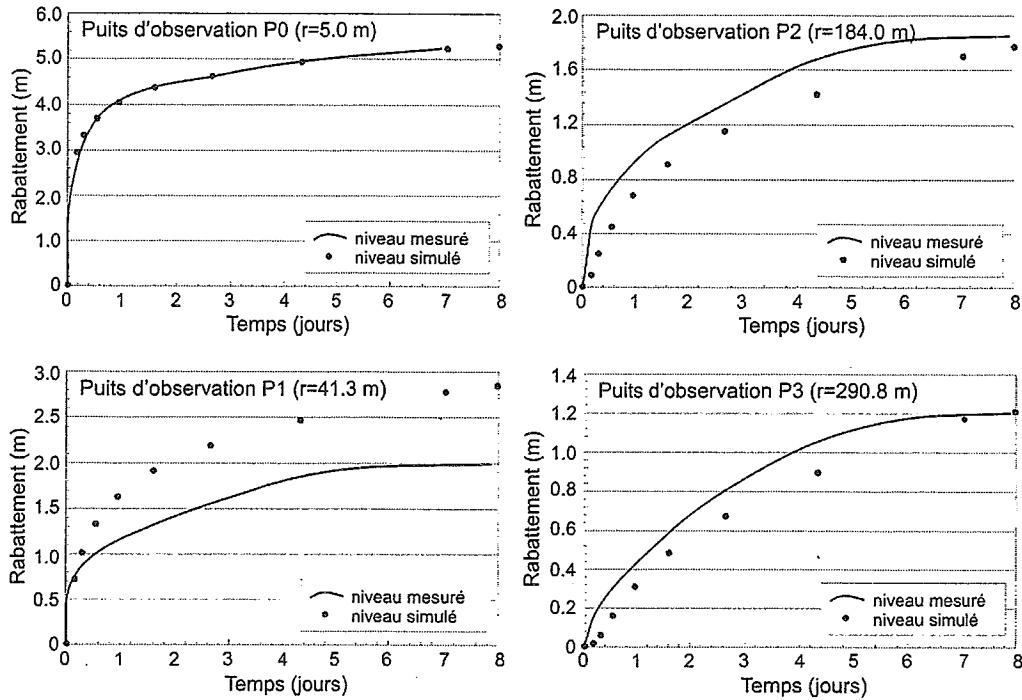


Figure 3.20 - Rabattements observés et simulés lors de l'essai de pompage au puits PE-1/87, 2 à 10 mai, 2000 (r =distance du puits pompé).

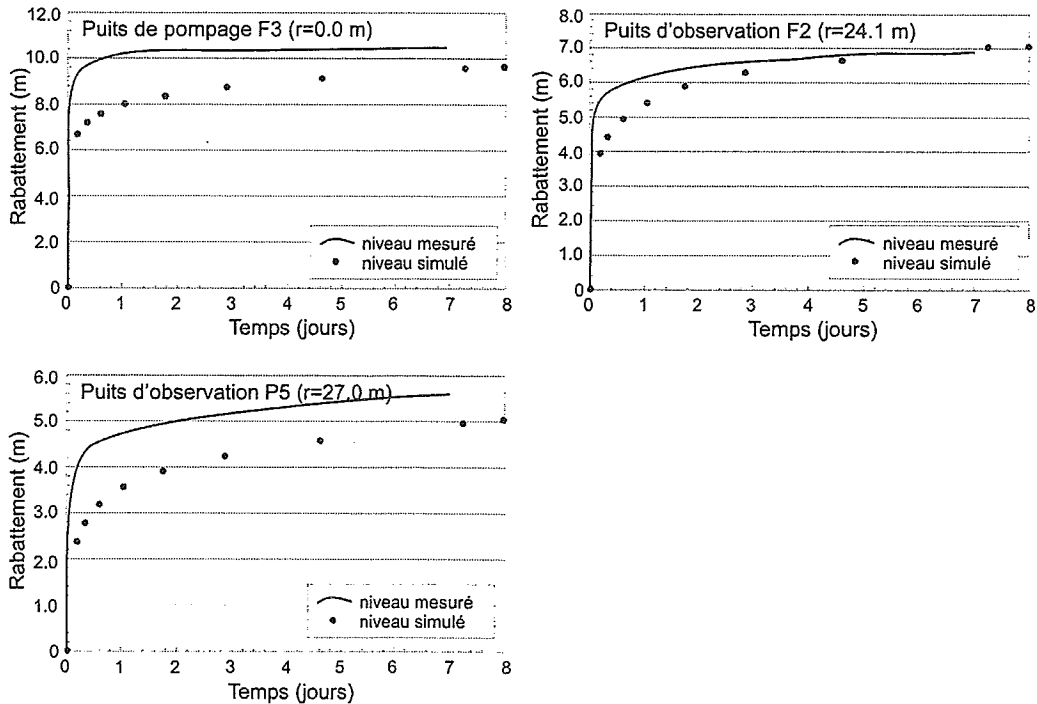


Figure 3.21 - Rabattements observés et simulés lors de l'essai de pompage au puits F3, 15 à 22 août, 2000 (r =distance du puits pompé).

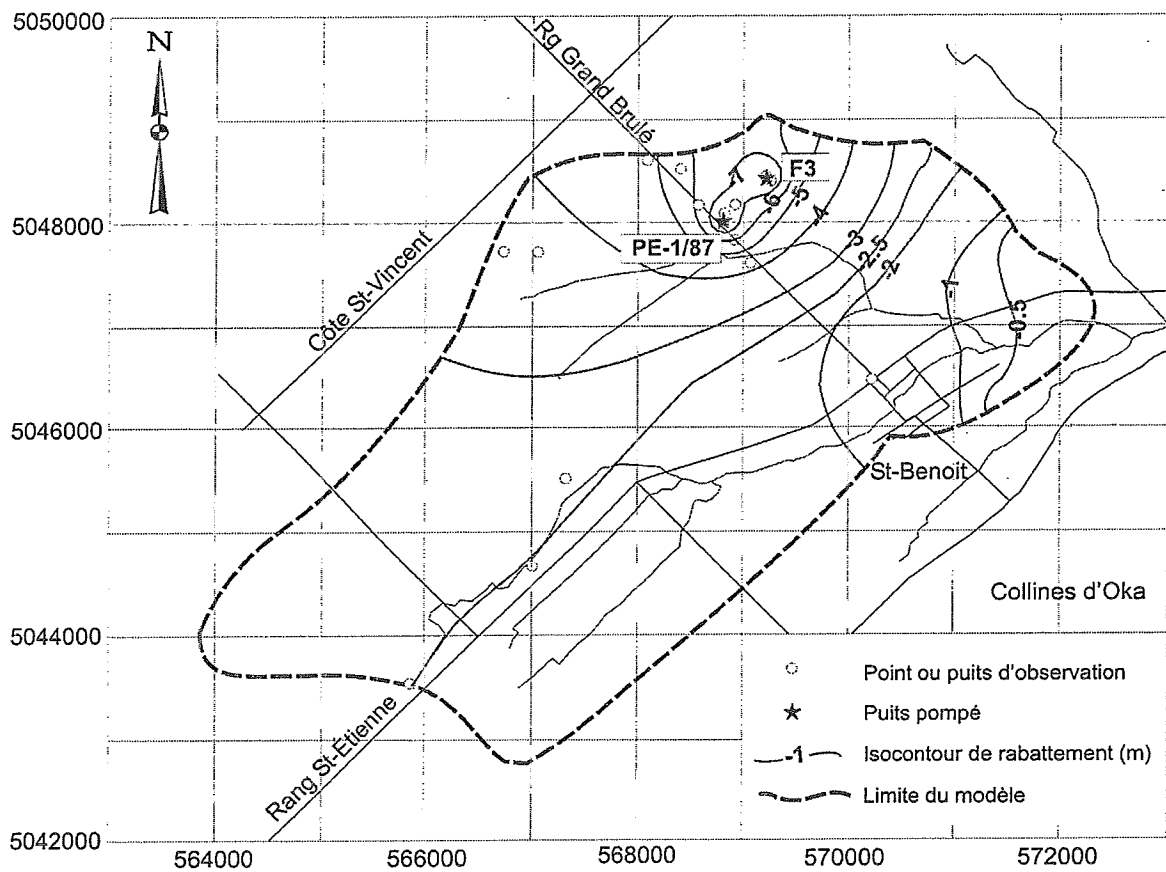


Figure 3.22 - Rabattements provoqués par le pompage simultané aux deux puits de pompage le 20 août. Le taux appliqué est de $180 \text{ m}^3/\text{j}$ pour les deux puits sur une base continue (scénario #9).

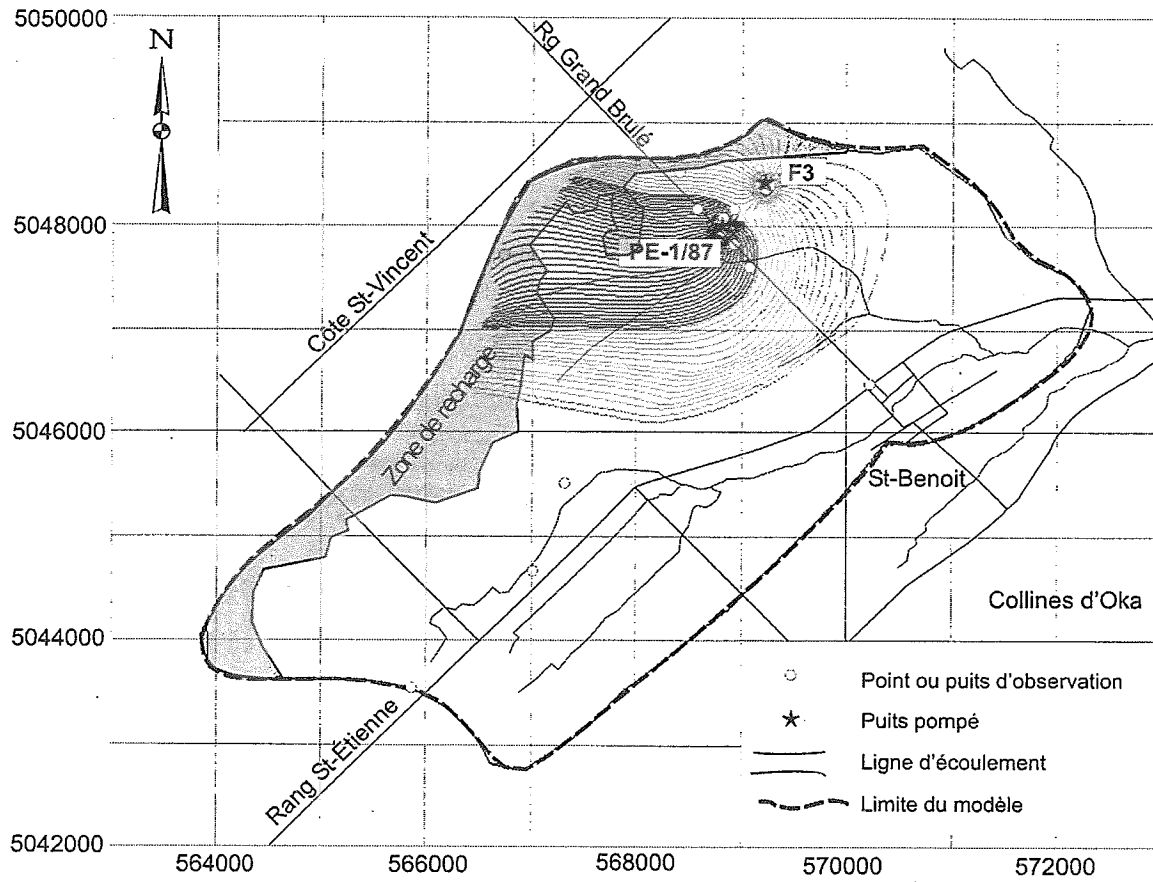


Figure 3.23 - Traçage des particules pour le pompage de $180 \text{ m}^3/\text{j}$ pour les deux puits sur une base continue, le 20 août (scénario #9).

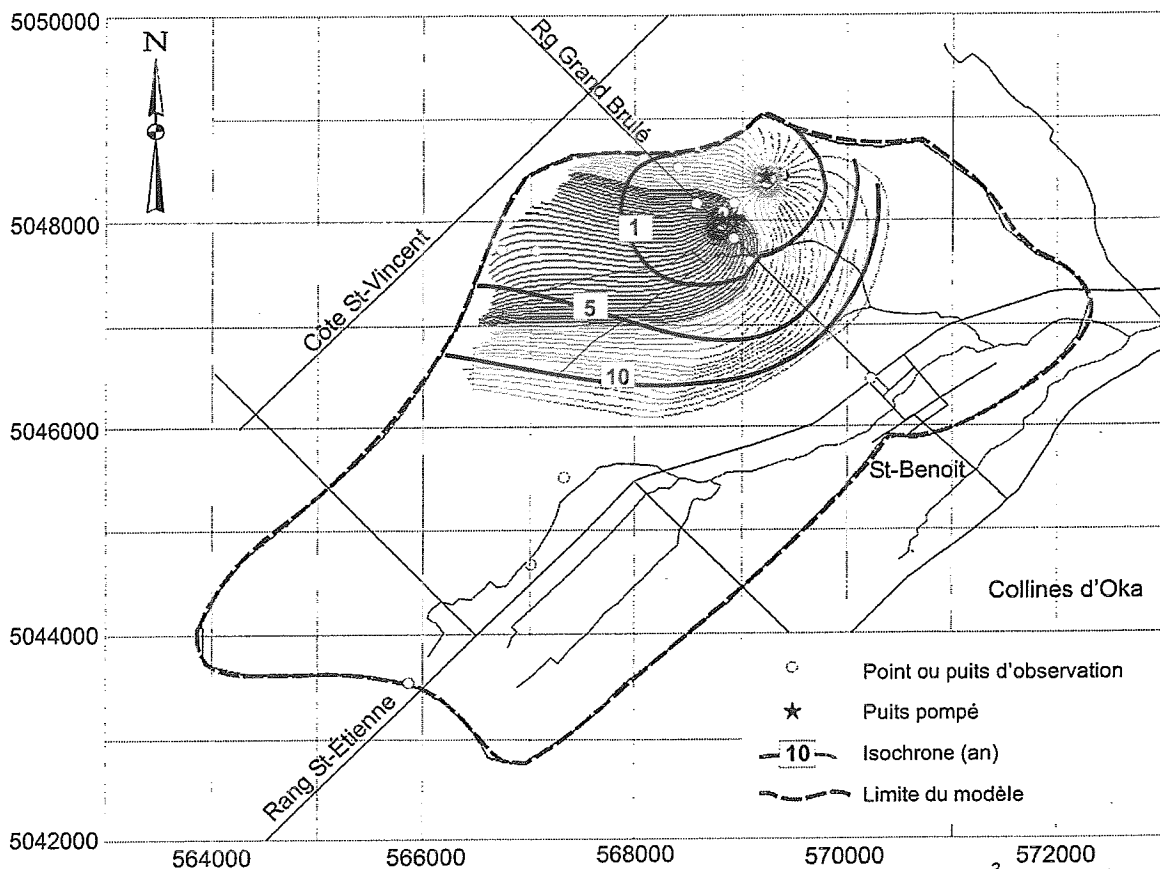


Figure 3.24 -Traçage des particules et isochrones pour le pompage de $180 \text{ m}^3/\text{j}$ pour les deux puits sur une base continue (scénario #9).

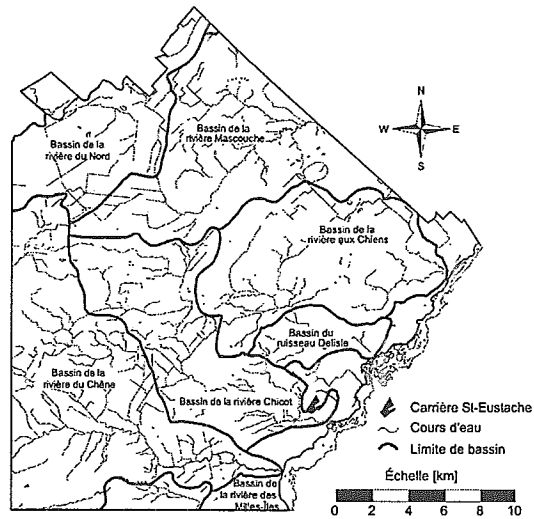


Figure 4.1- Hydrographie et bassins de drainage de la région à l'étude.

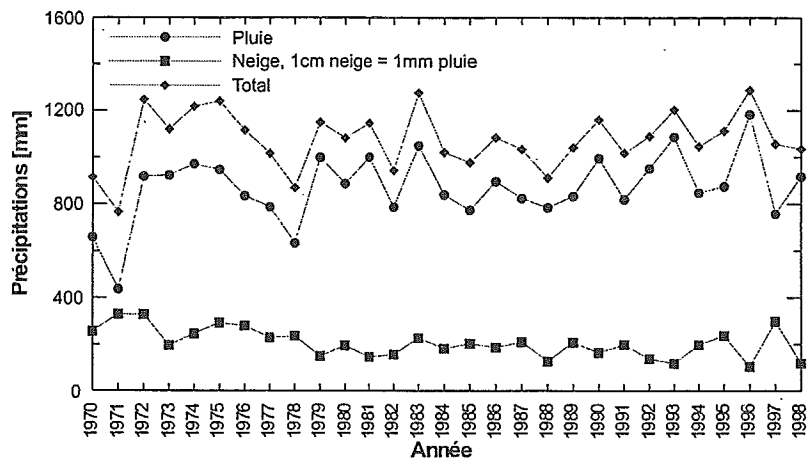


Figure 4.2 - Précipitations annuelles de pluie, de neige et le total pour les années 1970 à 1998 telles que mesurées à la station météorologique de Ste-Thérèse de Blainville.

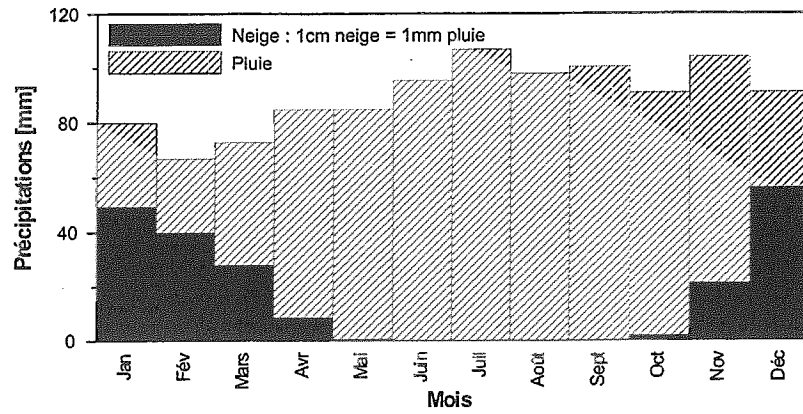


Figure 4.3 - Précipitations mensuelles moyennes de pluie, de neige et totale calculées à partir des données comprises entre 1970 et 1998 telles que mesurées à la station météorologique de Ste-Thérèse de Blainville.

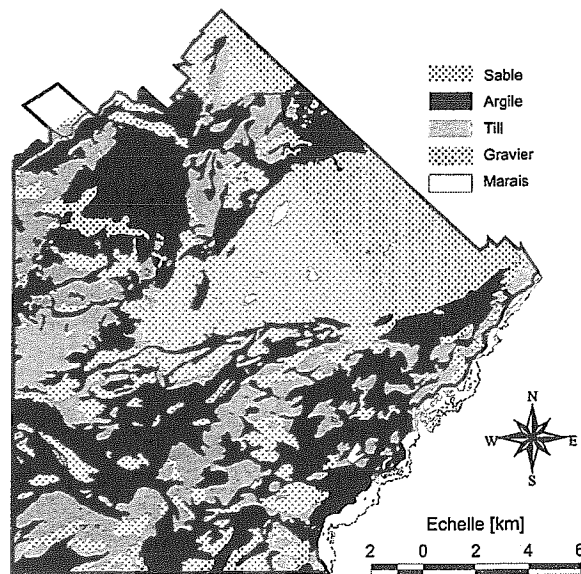


Figure 4.4 - Carte des dépôts de surface, tiré de Hamel (2002).

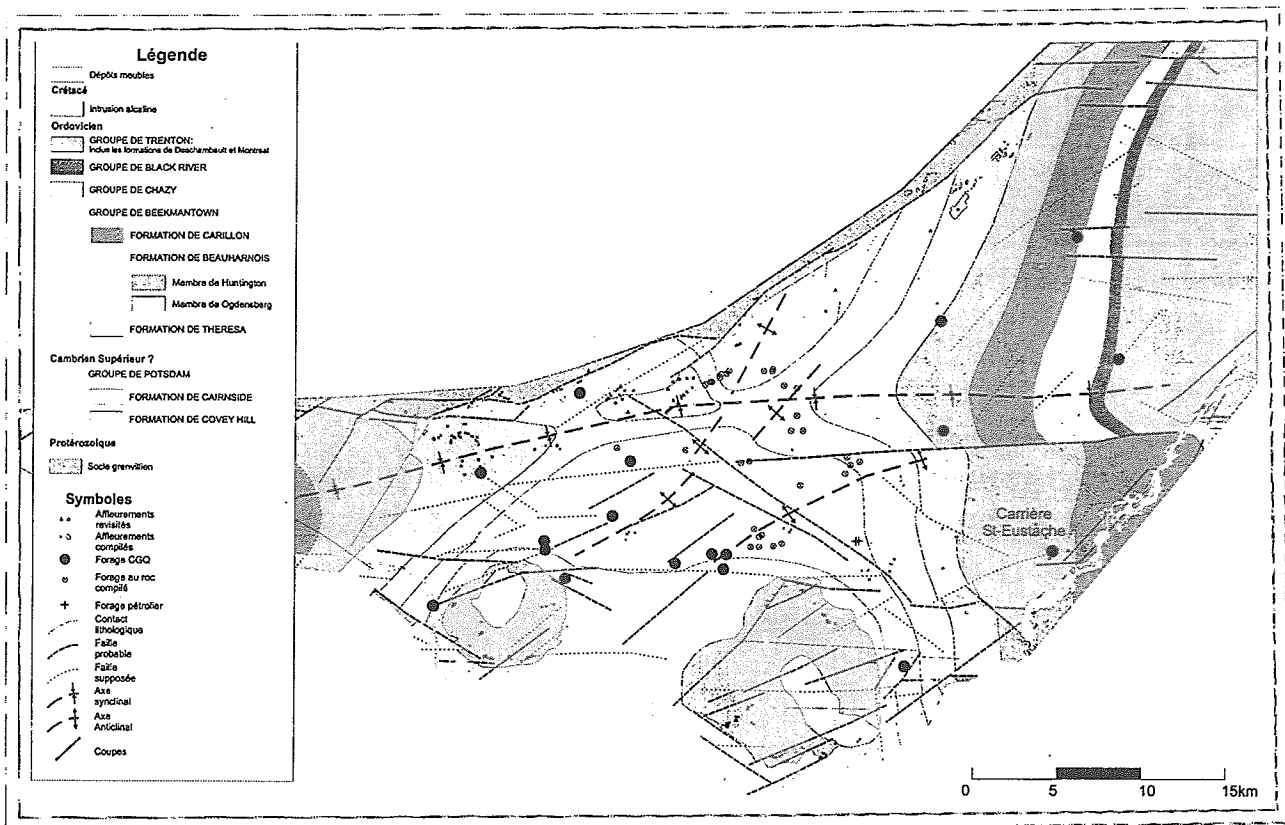


Figure 4.5 - Carte géologique des Basses Terres du Saint-Laurent, sud-ouest du Québec. [Carte géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent, sud-ouest du Québec. Compilée et mise à jour par M. Rocher, O. Salad-Hersi, S. Castonguay, 2001. En révision interne, CGC-Québec

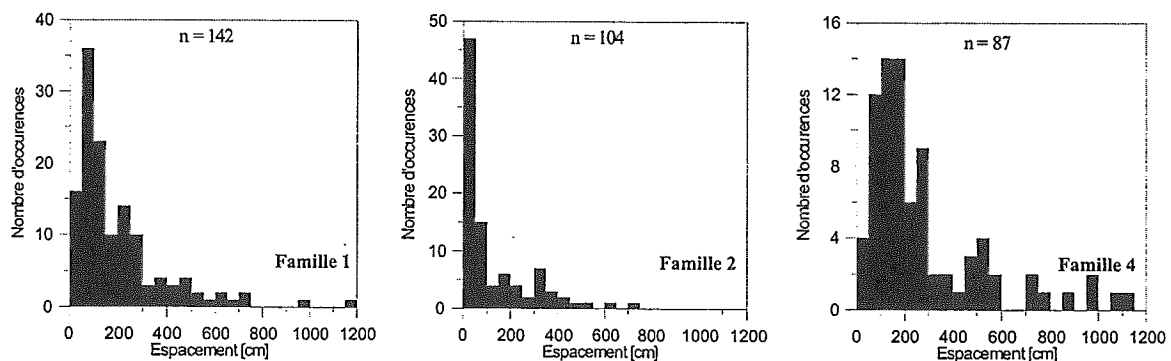


Figure 4.6 - Distribution de l'espacement des joints pour chaque famille de joints. L'orientation des familles 1, 2 et 4 est 2° , 80° et 30° , respectivement.

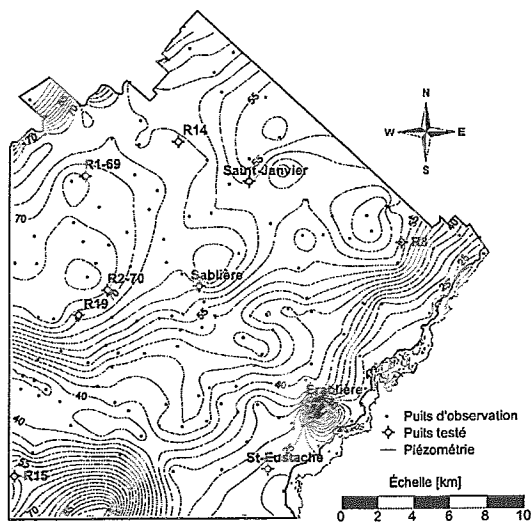


Figure 4.7 - Piézométrie de la région à l'étude (équipotentielle aux 3 mètres).

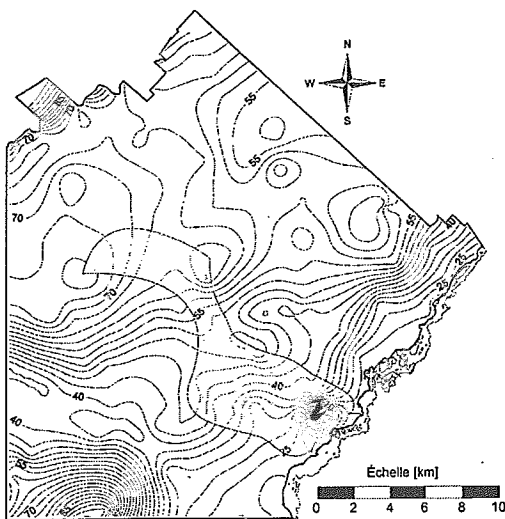


Figure 4.8 - Zone d'appel de la carrière.

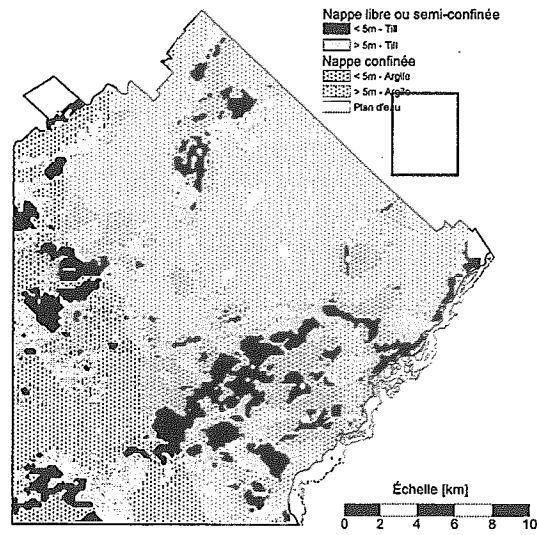


Figure 4.9 - Contextes hydrogéologiques de la région à l'étude, tiré de Hamel (2002).

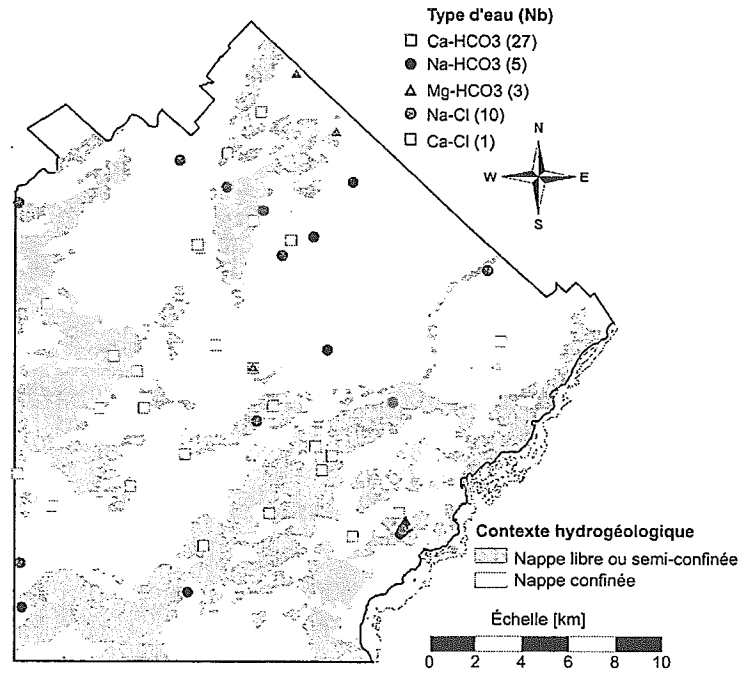


Figure 4.10 - Distribution des types d'eaux souterraines et leurs relations avec le contexte hydrogéologique.

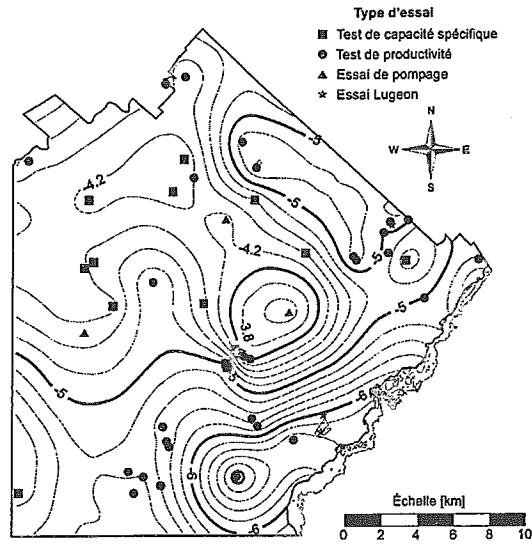


Figure 4.11.- Distribution spatiale du log de la conductivité hydraulique horizontale (m/s) de l'aquifère de roc fracturé (équipotentiels aux 0.2 cycles.)

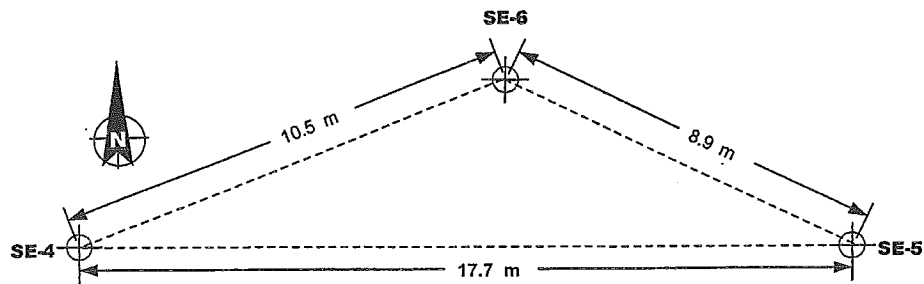


Figure 4-12 - Position relative des trois puits dans la carrière Saint-Eustache.

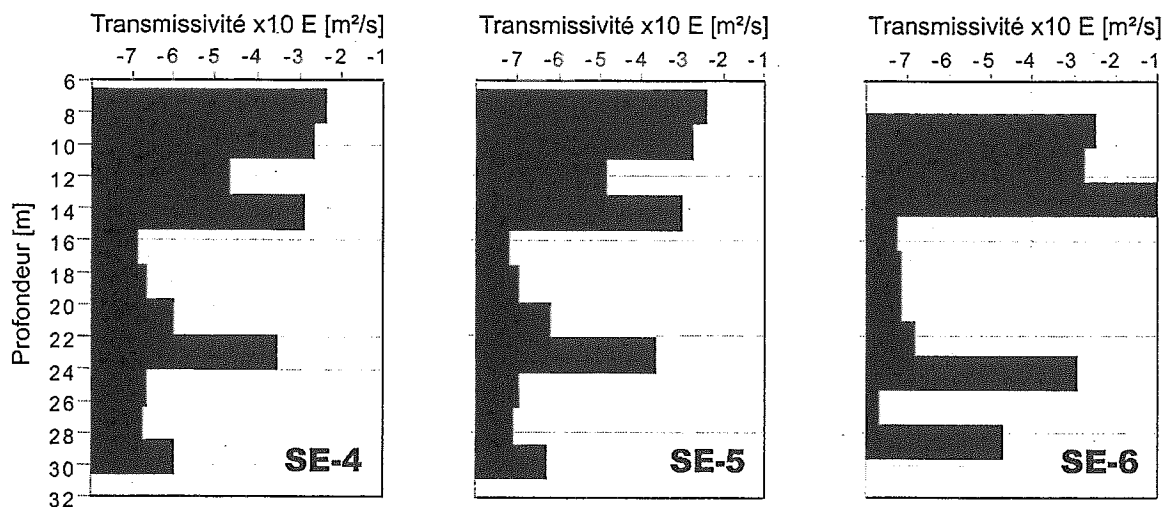


Figure 4.13 - Profils de transmissivité selon la profondeur pour chacun des trois puits

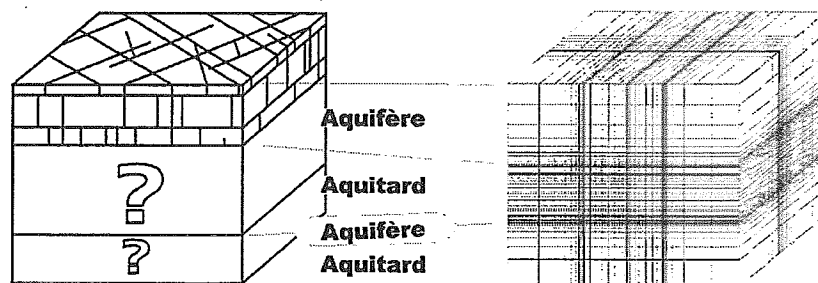


Figure 4.14 - Modèle hydrostratigraphique

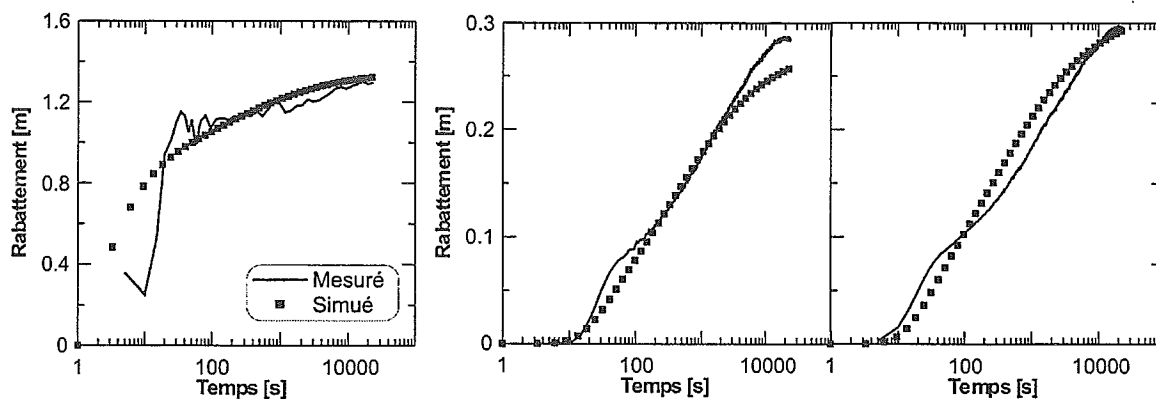


Figure 4.15 - Rabattement en fonction du temps pour le puits de pompage et les puits d'observations mesuré et simulé.

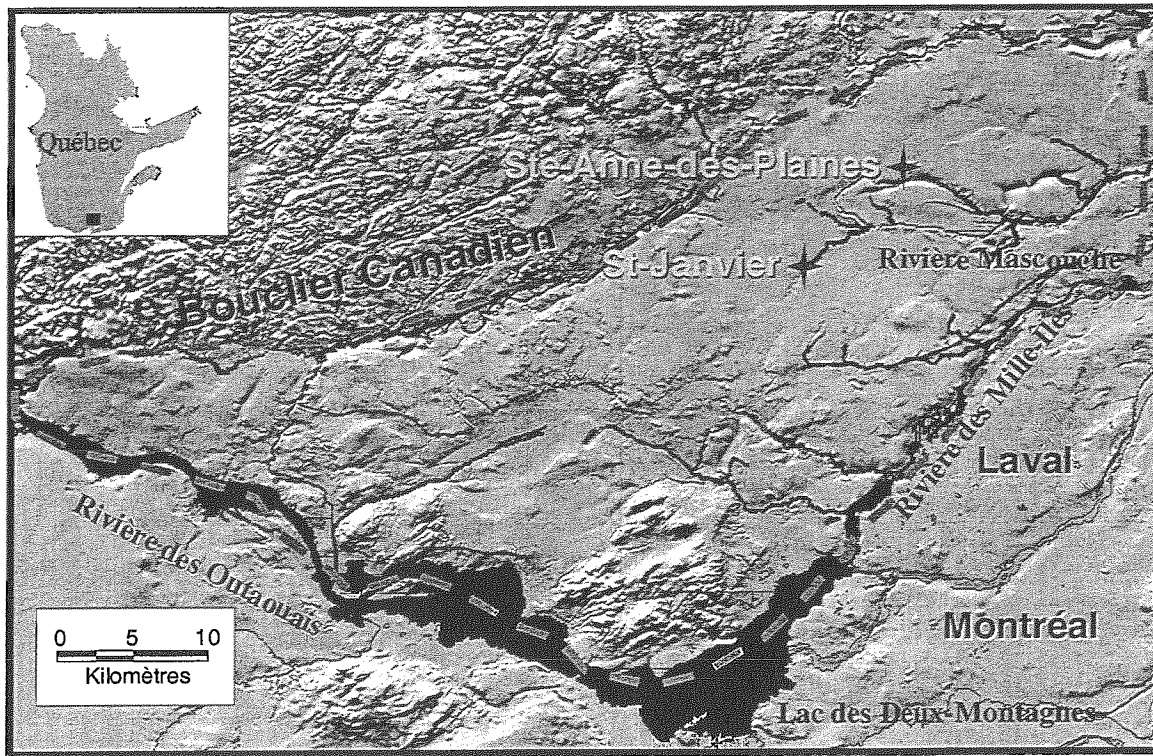


Figure 5.1 - Physiographie régionale et localisation des sites d'étude de Sainte-Anne-des-Plaines et de Saint-Janvier.

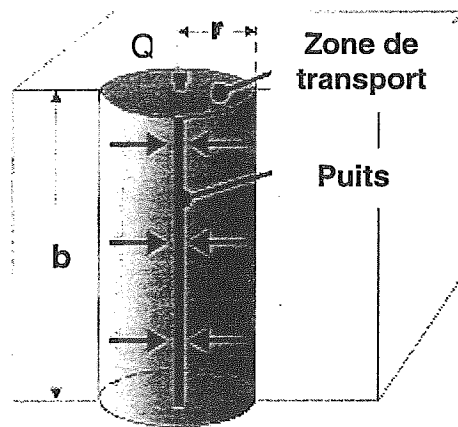


Figure 5.2 - Représentation du cylindre dont le rayon calculé est fixe sur l'épaisseur de l'aquifère (modifié de EPA, 1994).

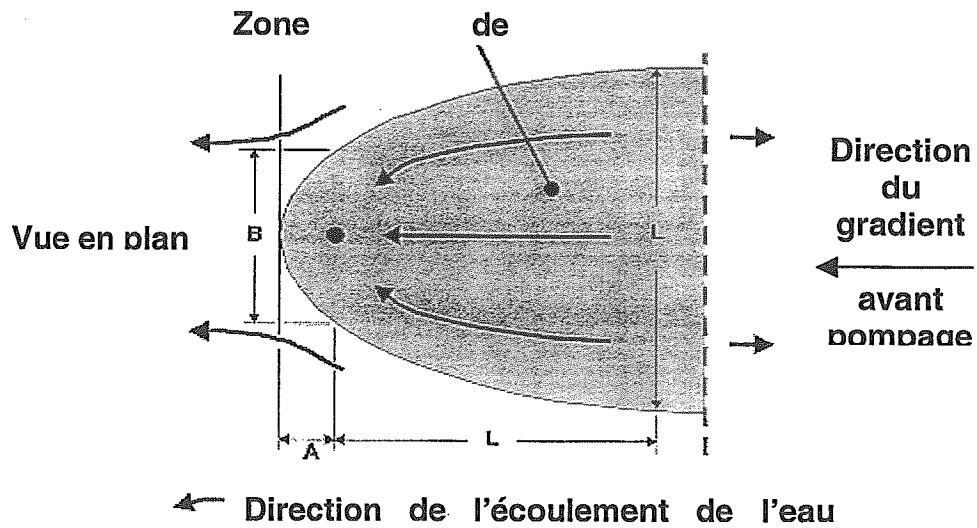


Figure 5.3 - Représentation du périmètre de protection déterminé par l'équation de l'écoulement uniforme (modifié de Paradis, 2000).

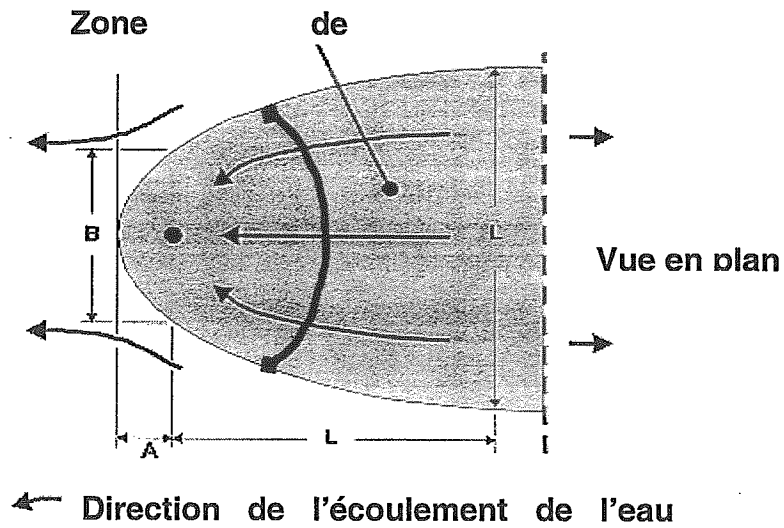


Figure 5.4 - Délimitation du périmètre de protection avec le calcul du temps de transport (modifié de Paradis, 2000).

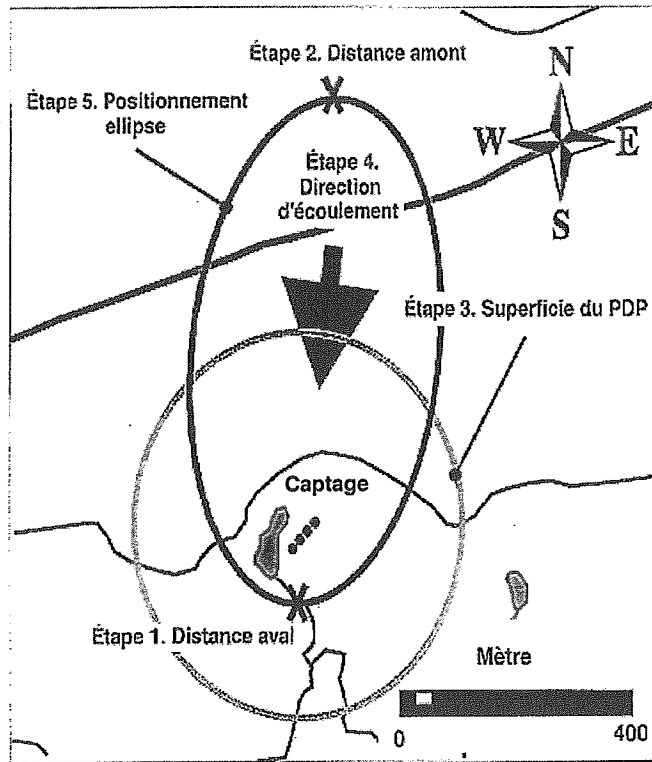


Figure 5.5 - Démonstration des cinq étapes de la méthode hybride 3A2E (d'après Paradis, 2000).

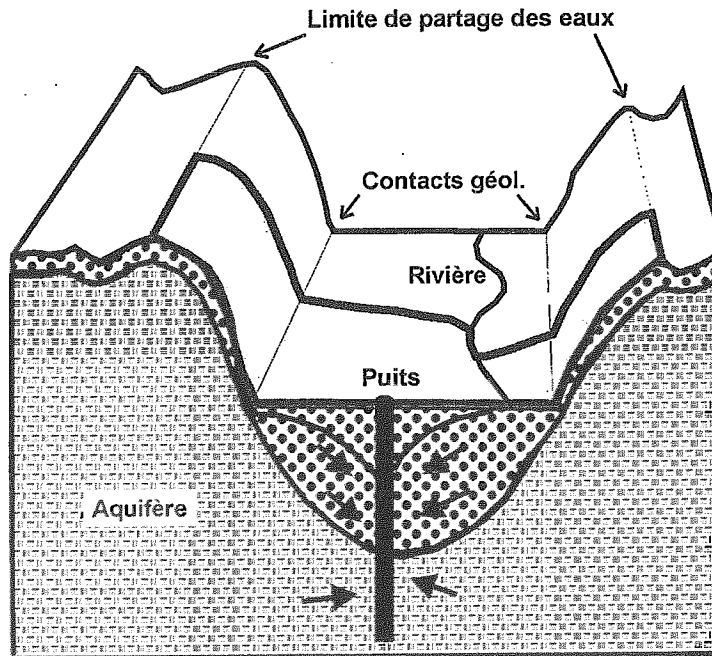


Figure 5.6 - Représentation 3D des caractéristiques de la cartographie hydrogéologique.

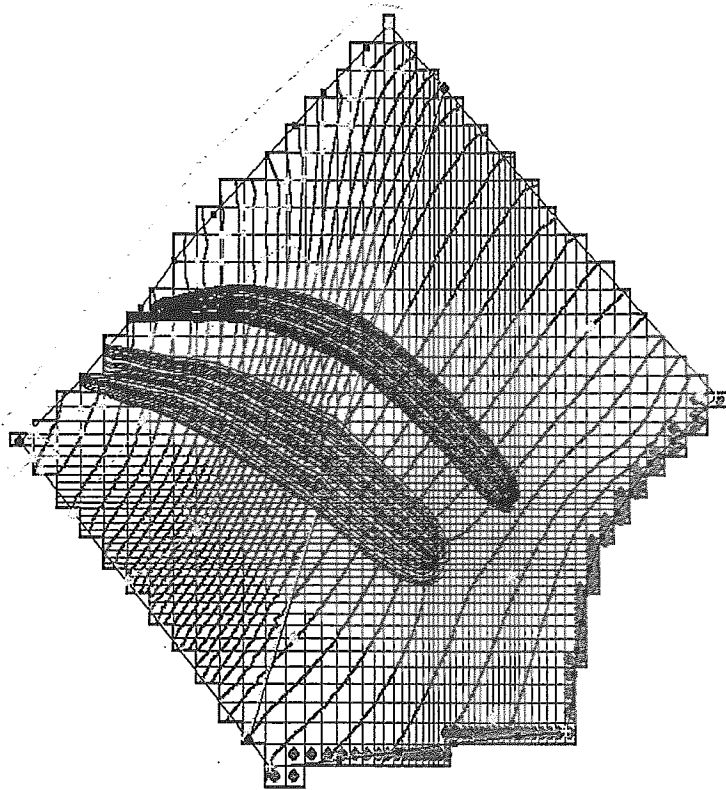


Figure 5.7 - Exemple de l'application du modèle MODFLOW/MODPATH à Ste-Anne-des-Plaines.

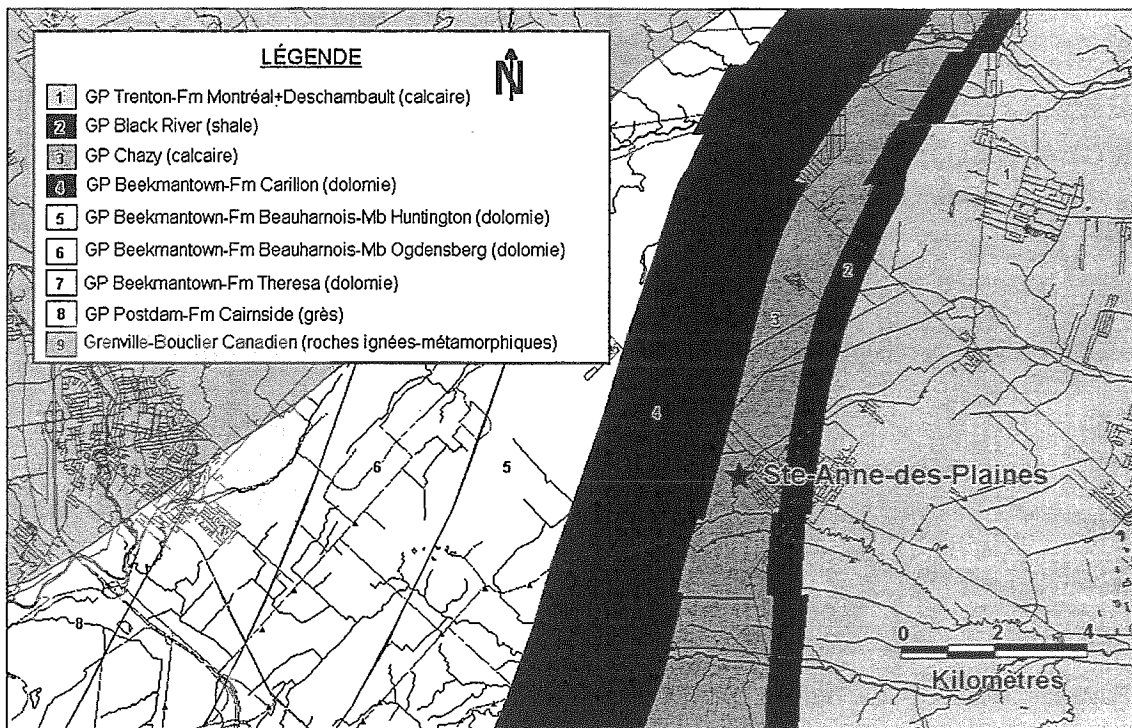


Figure 5.8 - Carte des formations géologiques du roc dans le secteur de Sainte-Anne-des-Plaines.

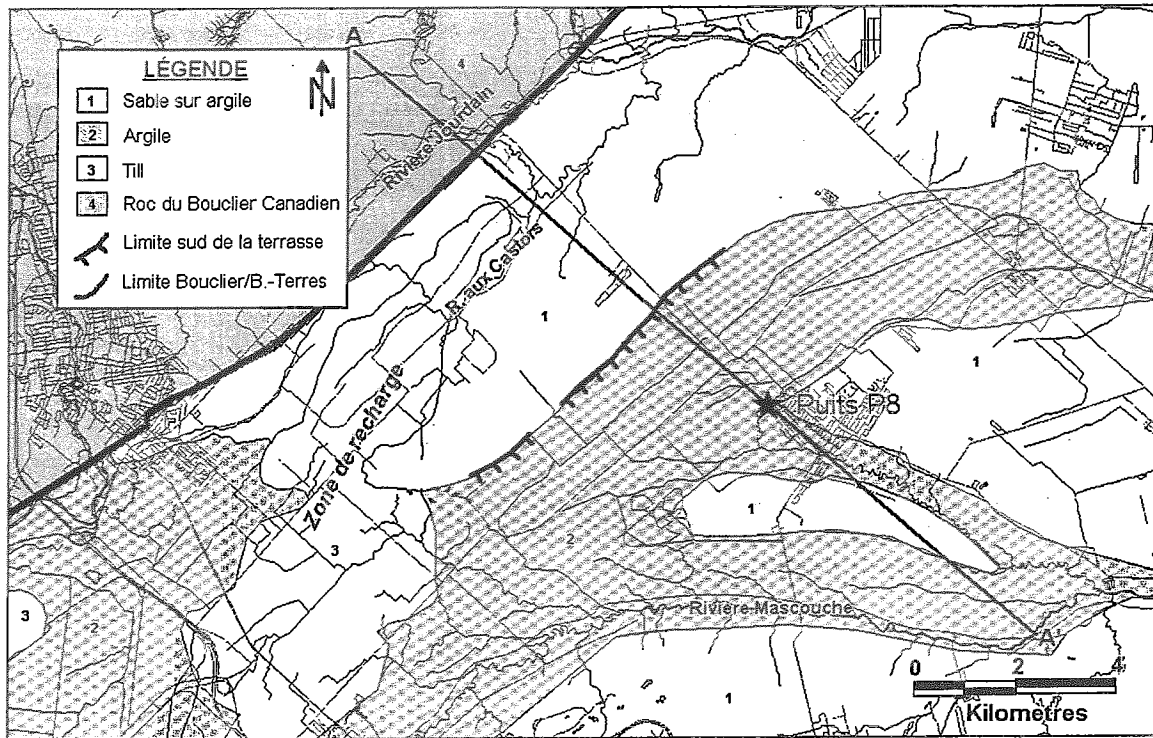


Figure 5.9 - Carte simplifiée des formations superficielles dans le secteur de Ste-Anne-des-Plaines.

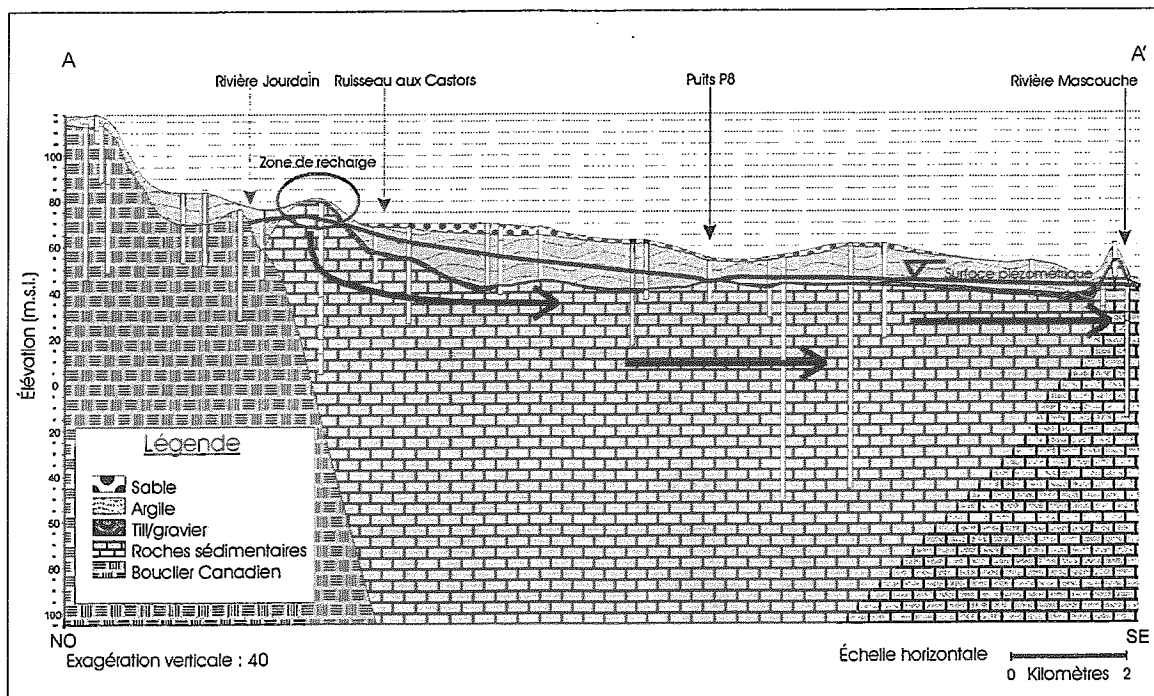
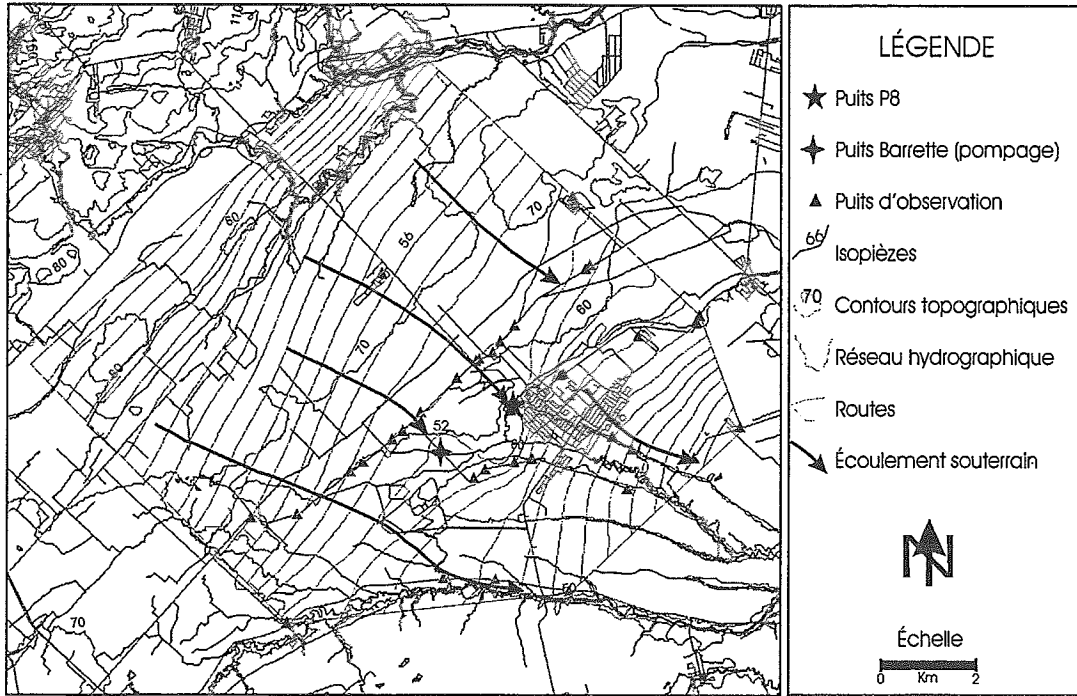
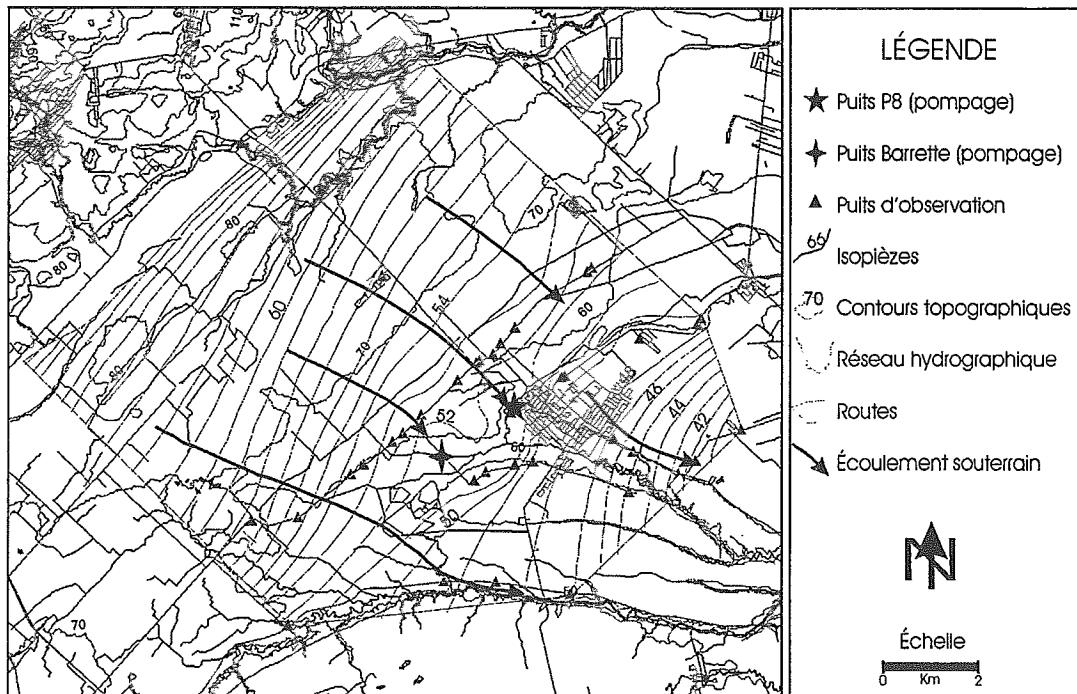


Figure 5.10 - Coupe stratigraphique A-A' nord-ouest sud-est de Sainte-Anne-des-Plaines (voir localisation de la coupe à la figure 9).



Figures 5.11 et 5.12 - Cartes piézométriques dans le roc avant et après l'essai de pompage de Ste-Anne-des-Plaines.



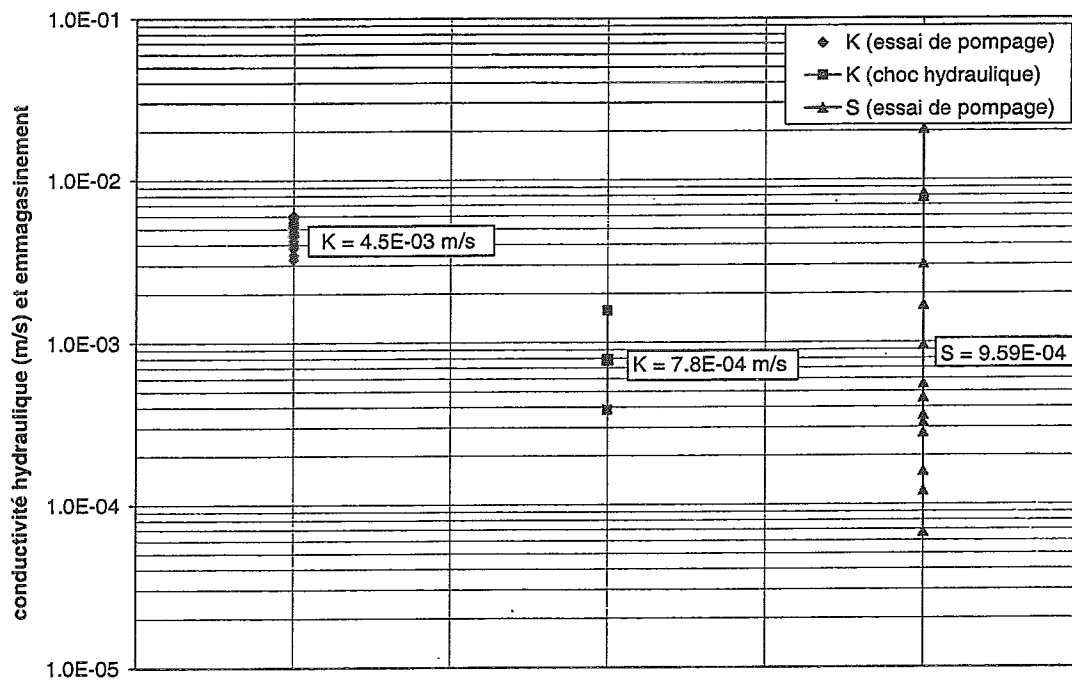


Figure 5.13 - Graphique des écarts des valeurs des propriétés hydrauliques de l'aquifère.

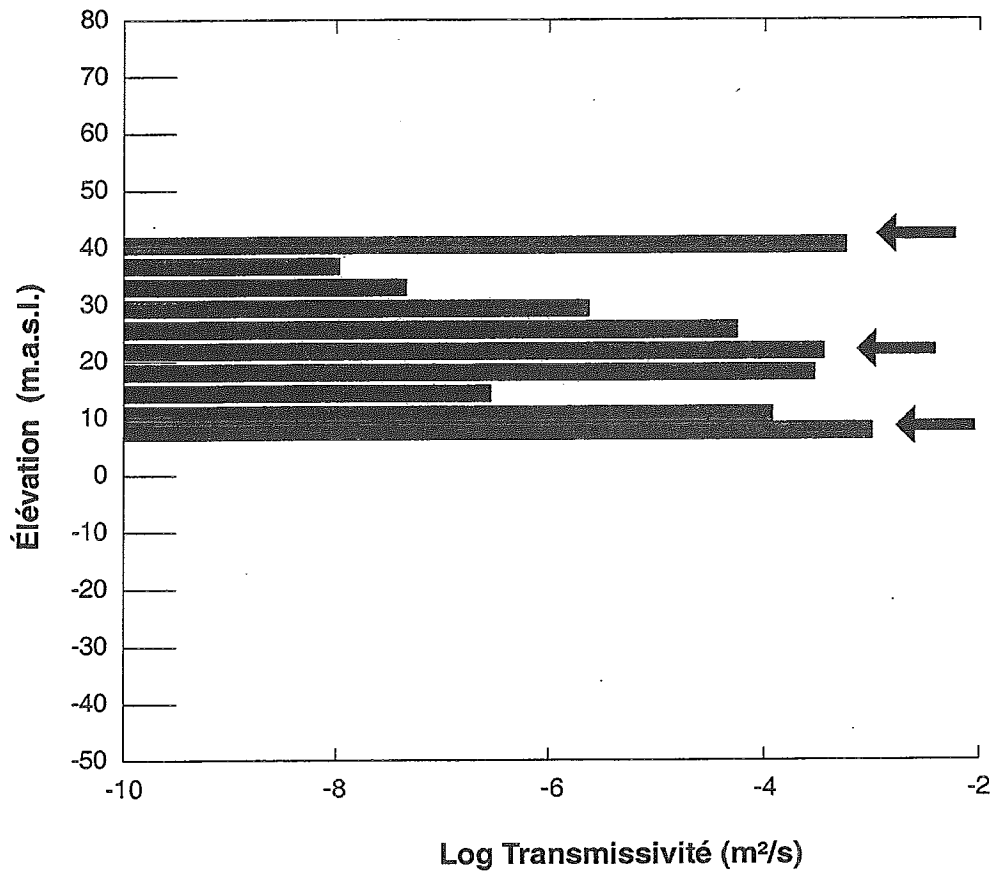


Figure 5.14 - Graphique du profil de la transmissivité au puits P9 (intervalles de 3.74 m).

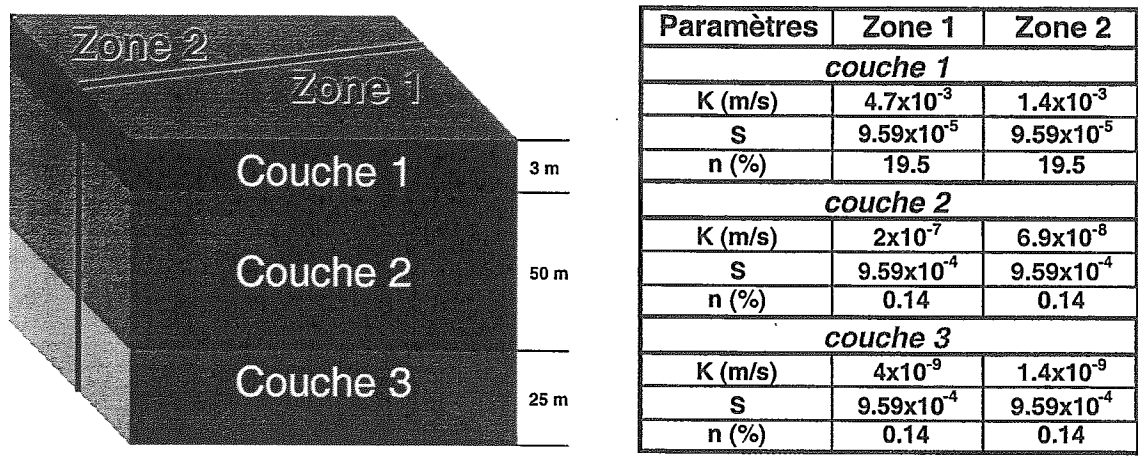


Figure 5.15 - Modèle conceptuel de l'aquifère de Ste-Anne-des-Plaines et propriétés hydrauliques des couches du modèle de Ste-Anne-des-Plaines.

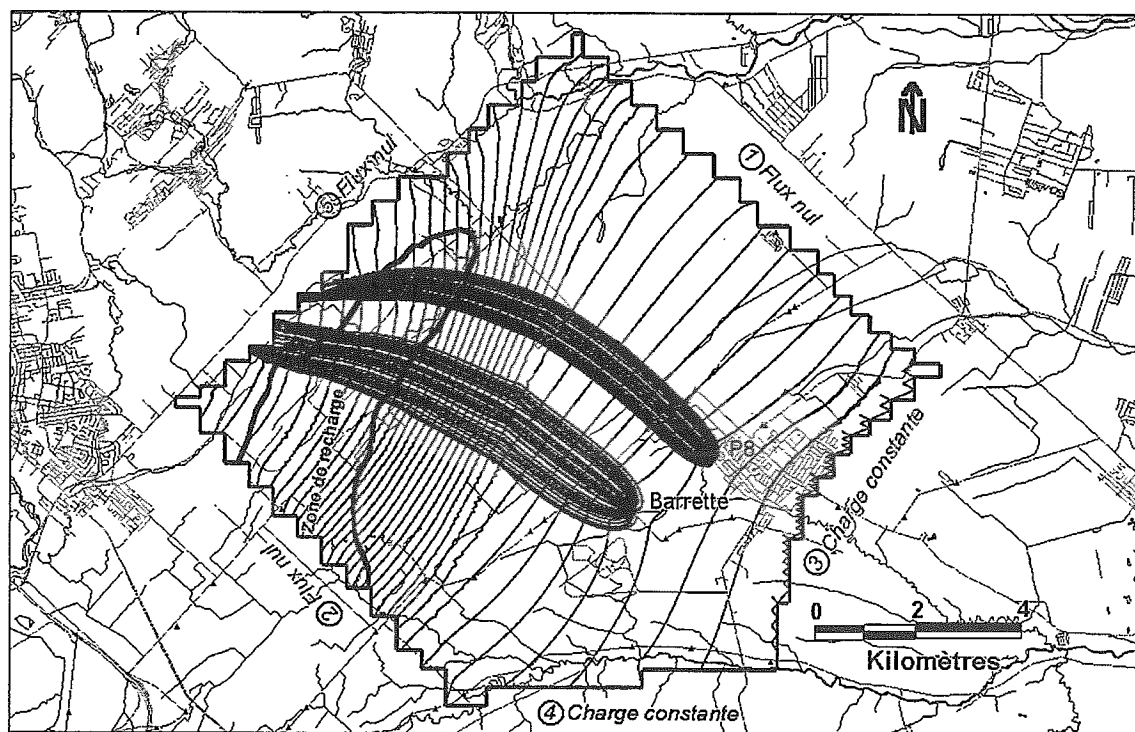


Figure 5.16 - Aires d'alimentation et conditions limites de la modélisation à Ste-Anne-des-Plaines.

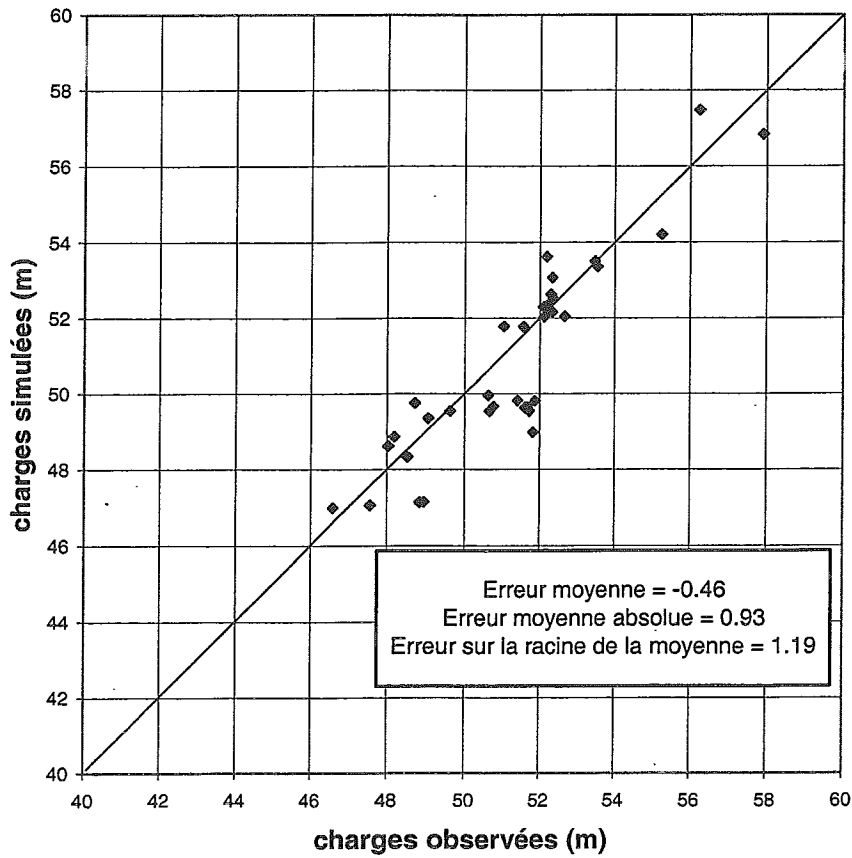


Figure 5.17 - Graphique des charges simulées en fonction des charges observées.

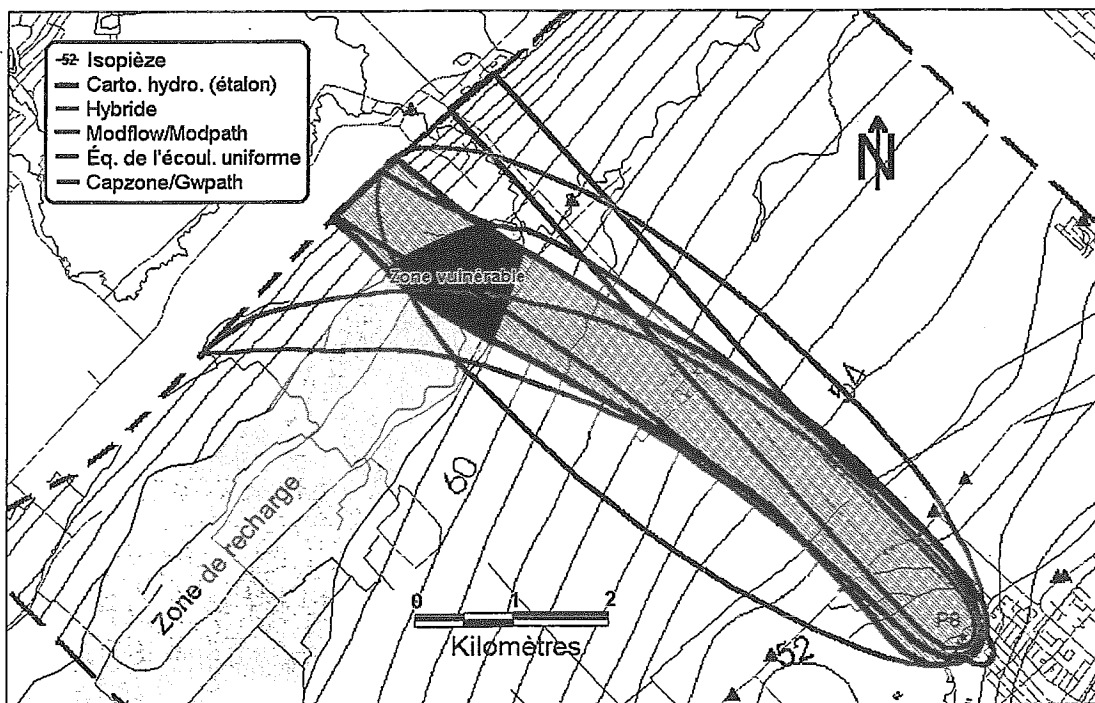


Figure 5.18 -Périmètres de protection éloignés des méthodes appliquées au puits P8.

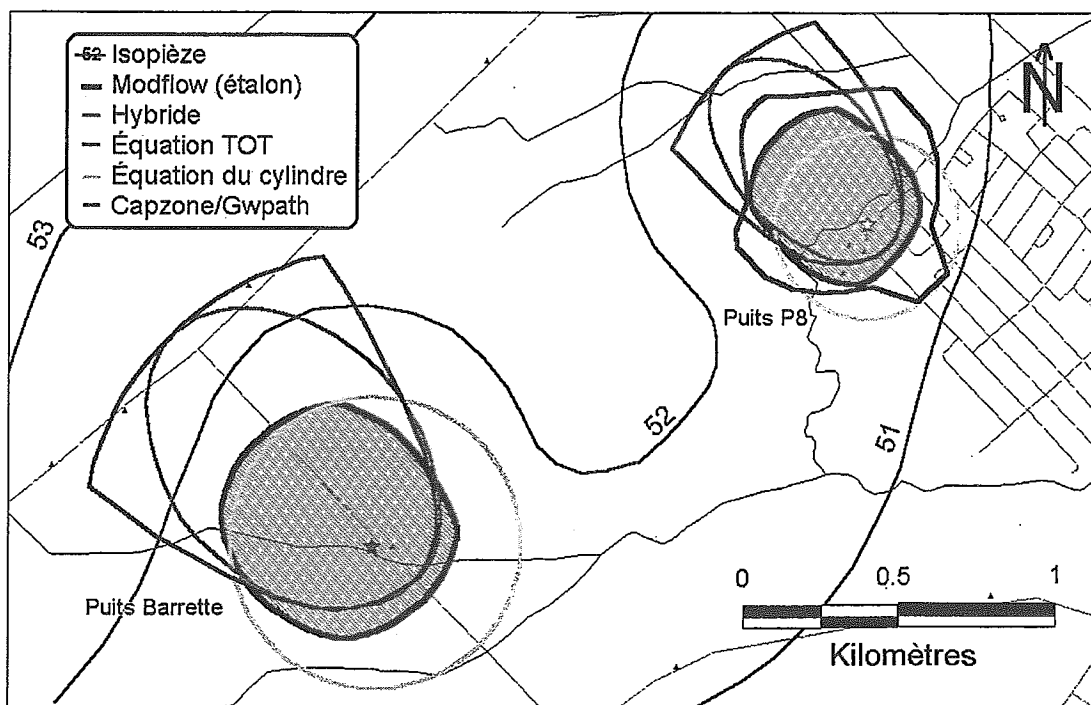


Figure 5.19 - Périmètres de protection éloignés des méthodes appliquées au puits Barrette.

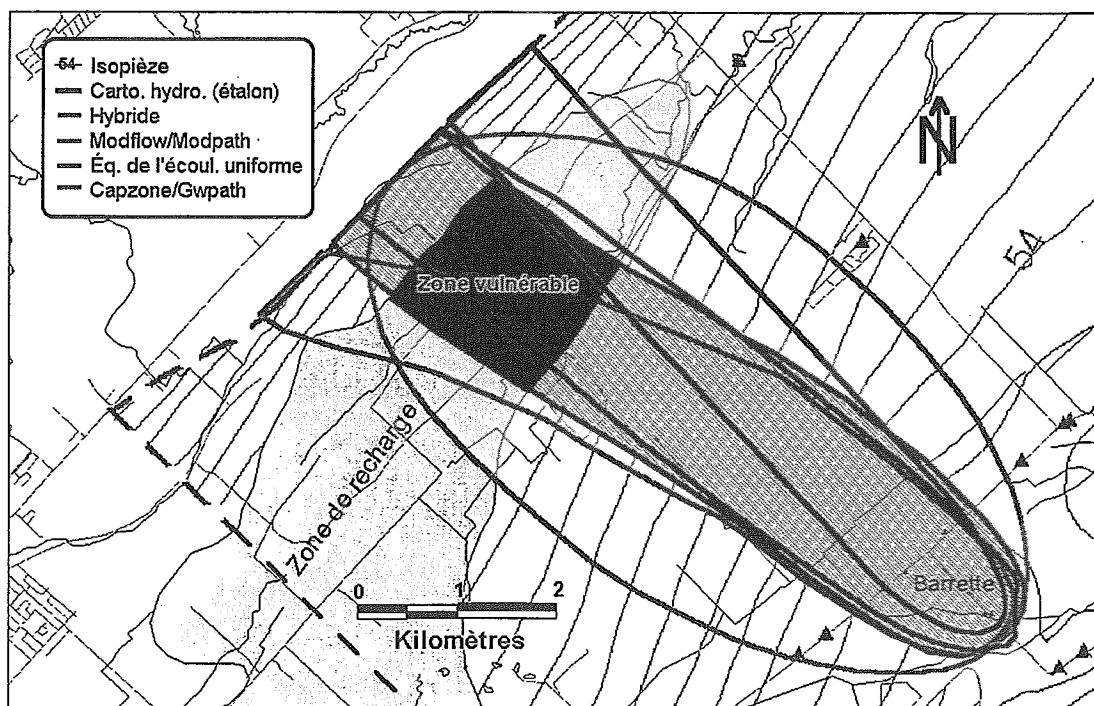


Figure 5.20 - Périmètres de protection rapprochés des méthodes appliquées aux puits P8 et Barrette.

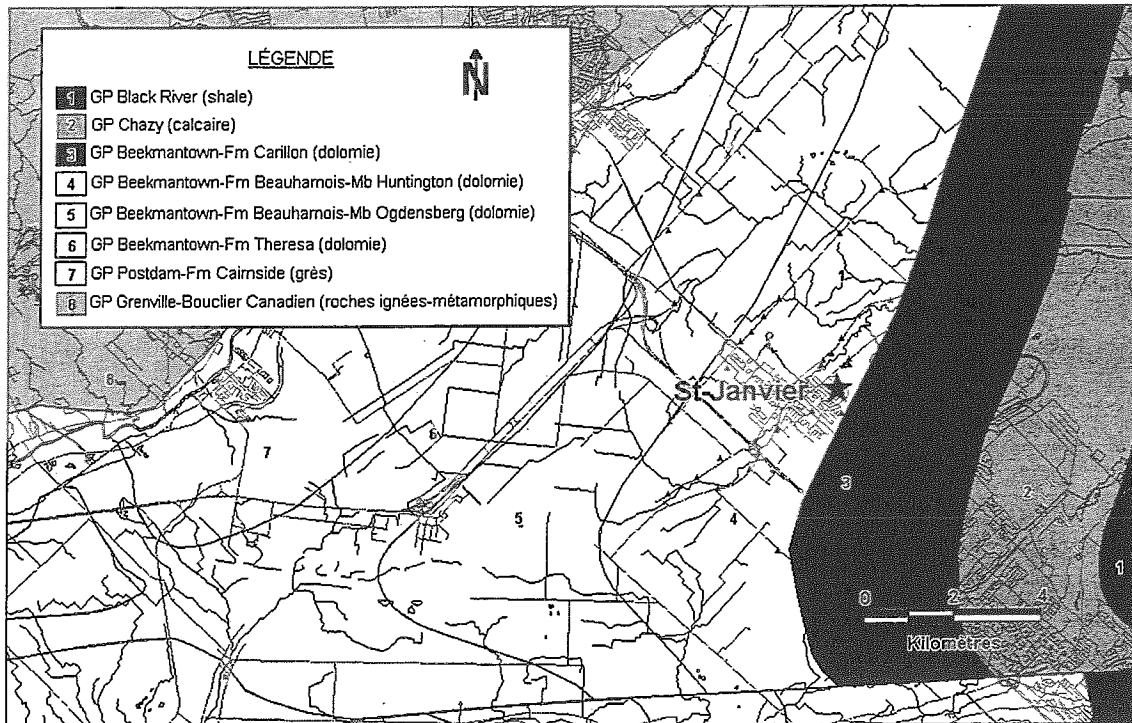


Figure 5.21 - Carte des formations géologiques dans le secteur de Saint-Janvier.

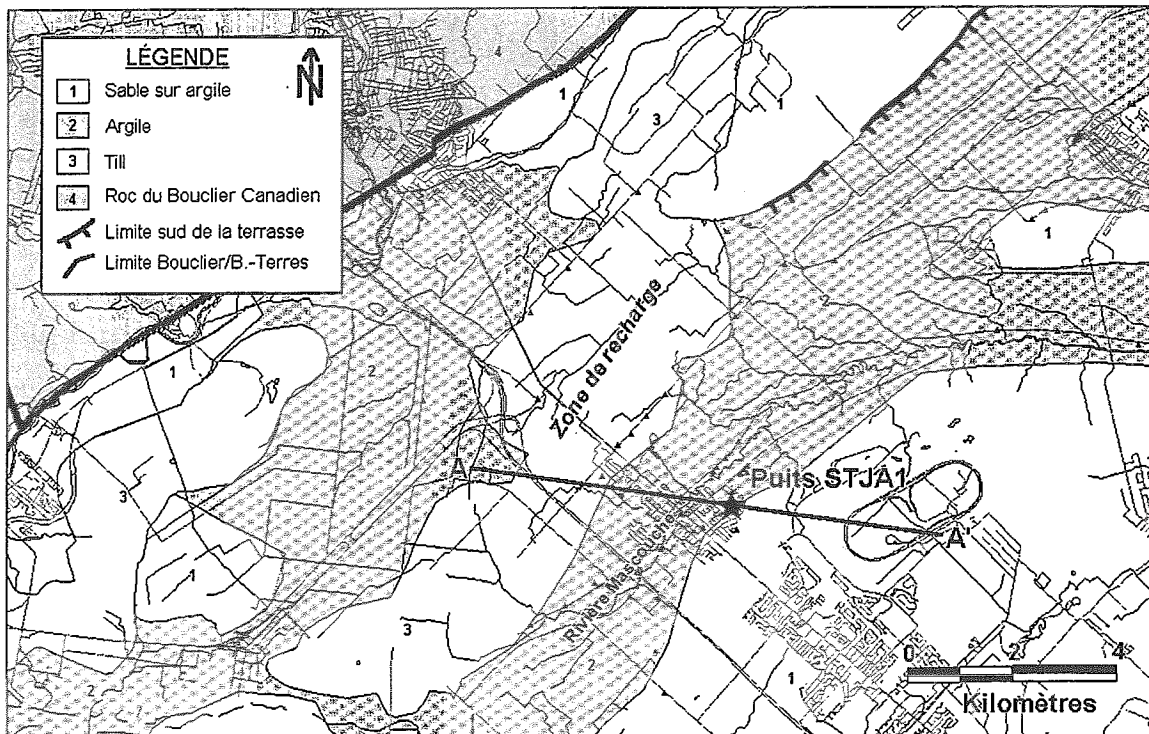


Figure 5.22 - Carte des formations superficielles dans le secteur de Saint-Janvier.

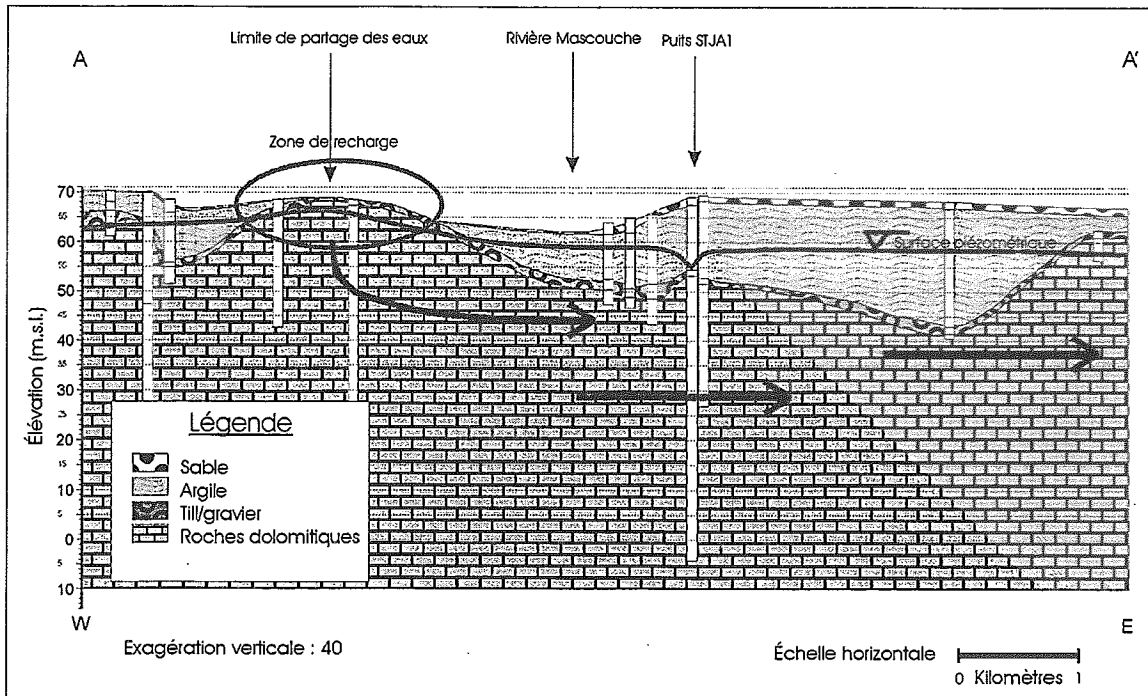


Figure 5.23 - Coupe stratigraphique A-A' ouest-est de la région de Saint-Janvier (voir localisation de la coupe à la figure 5.22).

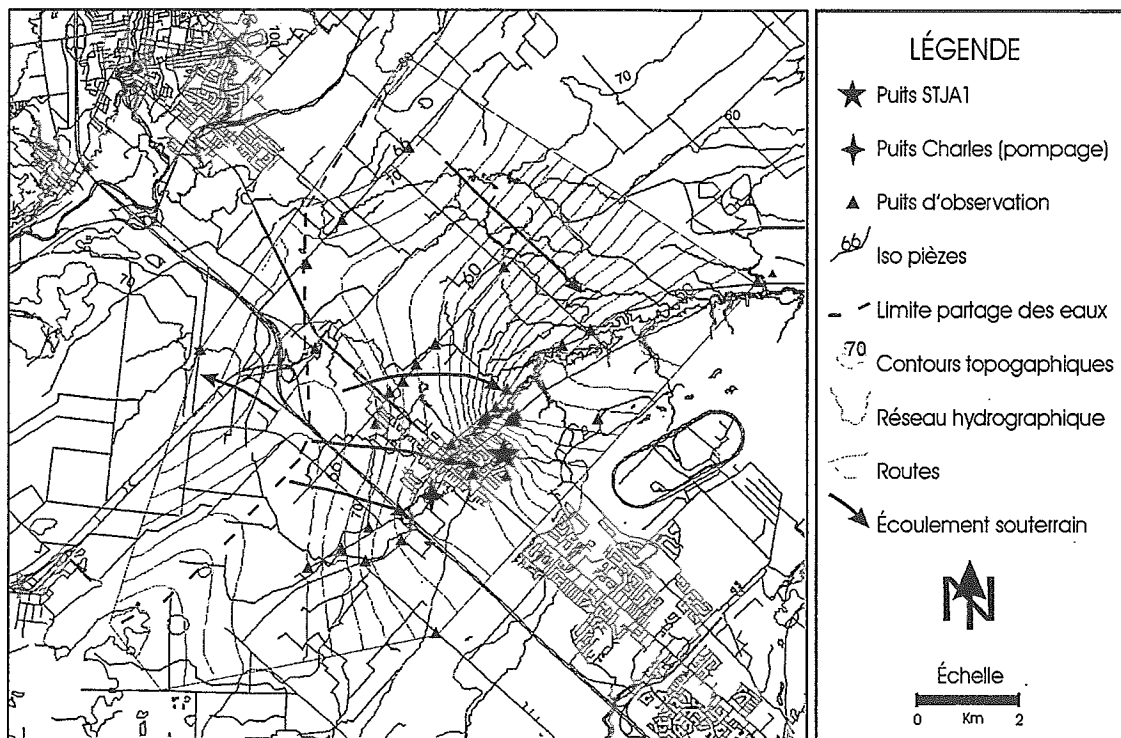


Figure 5.24 - Carte piézométrique dans le roc avant l'essai de pompage de Saint-Janvier.

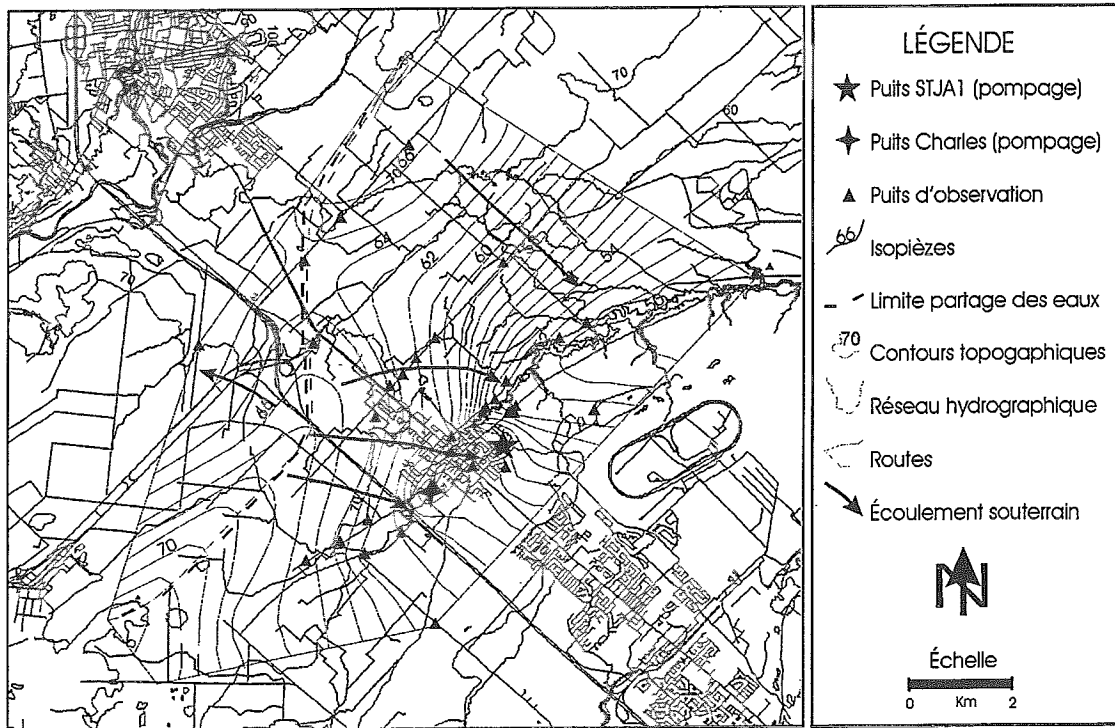


Figure 5.25 - Carte piézométrique dans le roc après l'essai de pompage de Saint-Janvier.

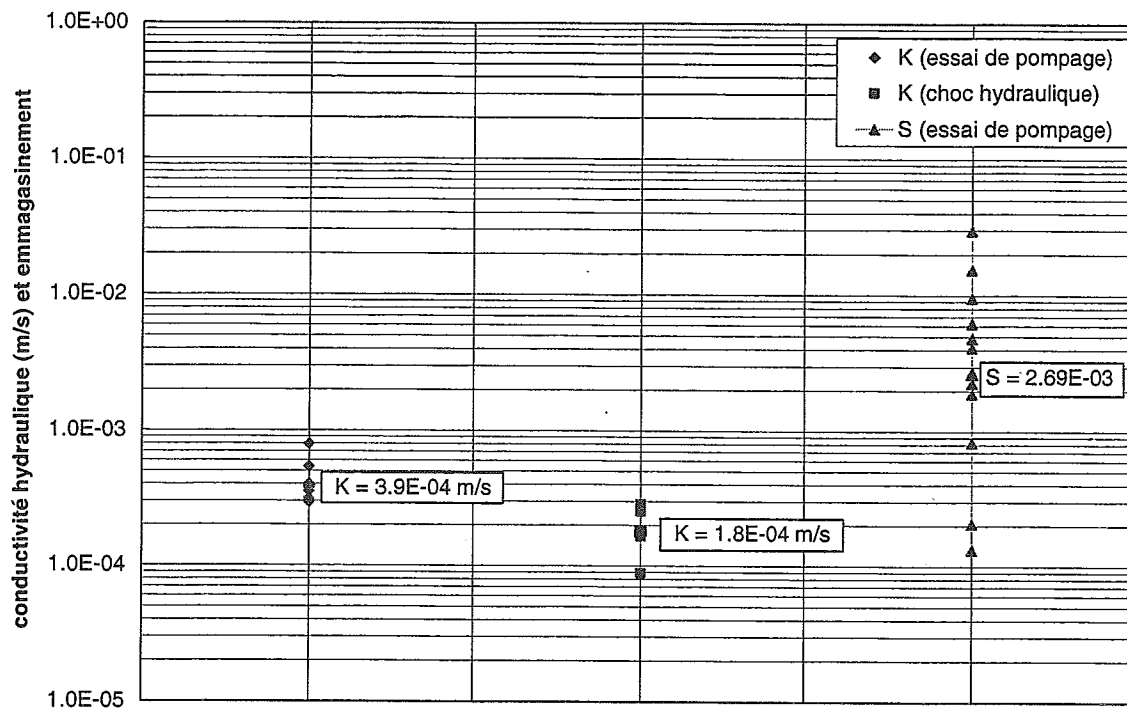


Figure 5.26 - Graphique des écarts des valeurs des propriétés hydrauliques de l'aquifère.

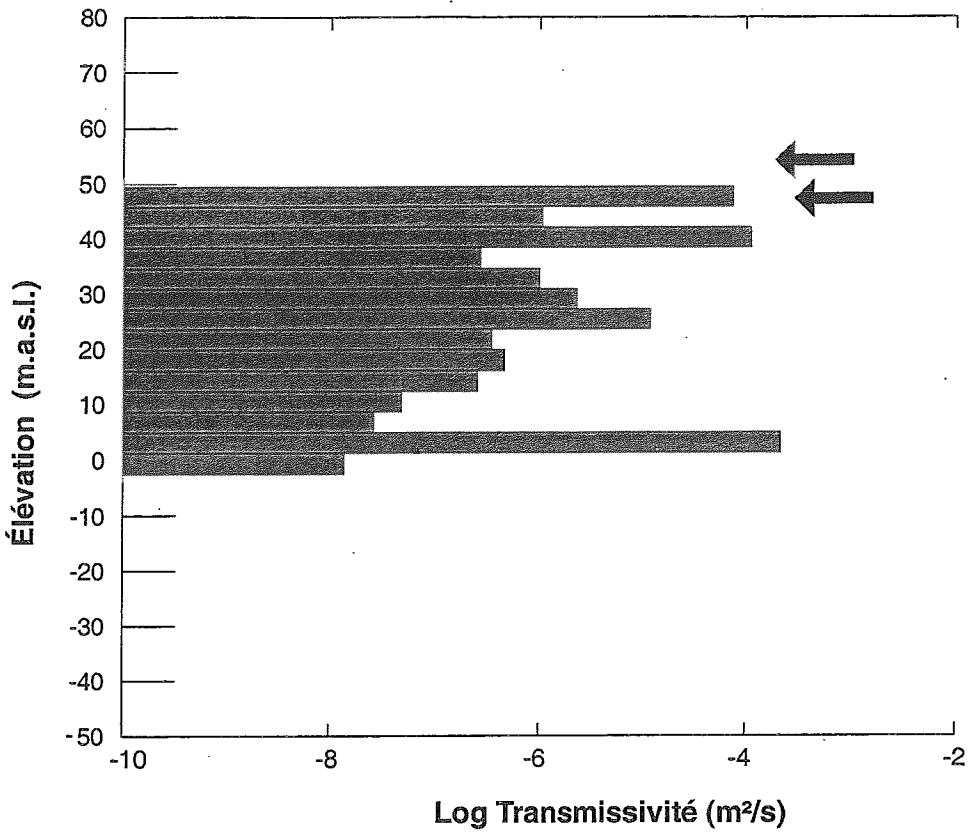
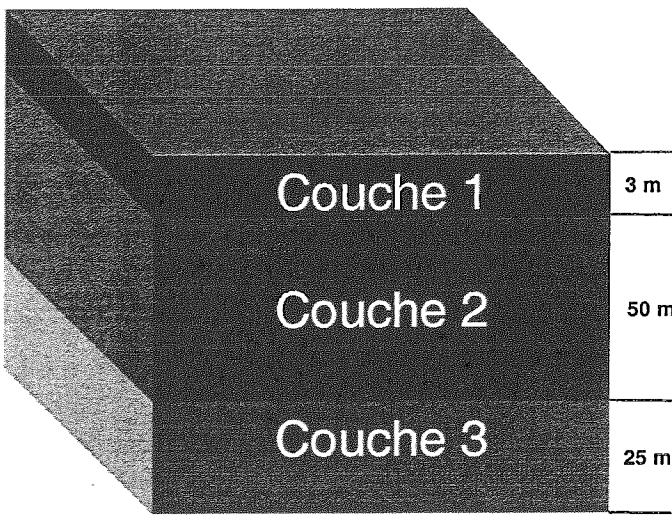


Figure 5.27 - Graphique du profil de la transmissivité au puits STJA1 (intervalles de 3.72 m).



Paramètres	Zone 1
<i>couche 1</i>	
K (m/s)	6.7×10^{-4}
S	3×10^{-4}
n (%)	19.5
<i>couche 2</i>	
K (m/s)	2×10^{-8}
S	2.7×10^{-3}
n (%)	0.1
<i>couche 3</i>	
K (m/s)	4×10^{-10}
S	2.7×10^{-3}
n (%)	0.1

Figure 5.28 - Modèle conceptuel de l'aquifère de Saint-Janvier.

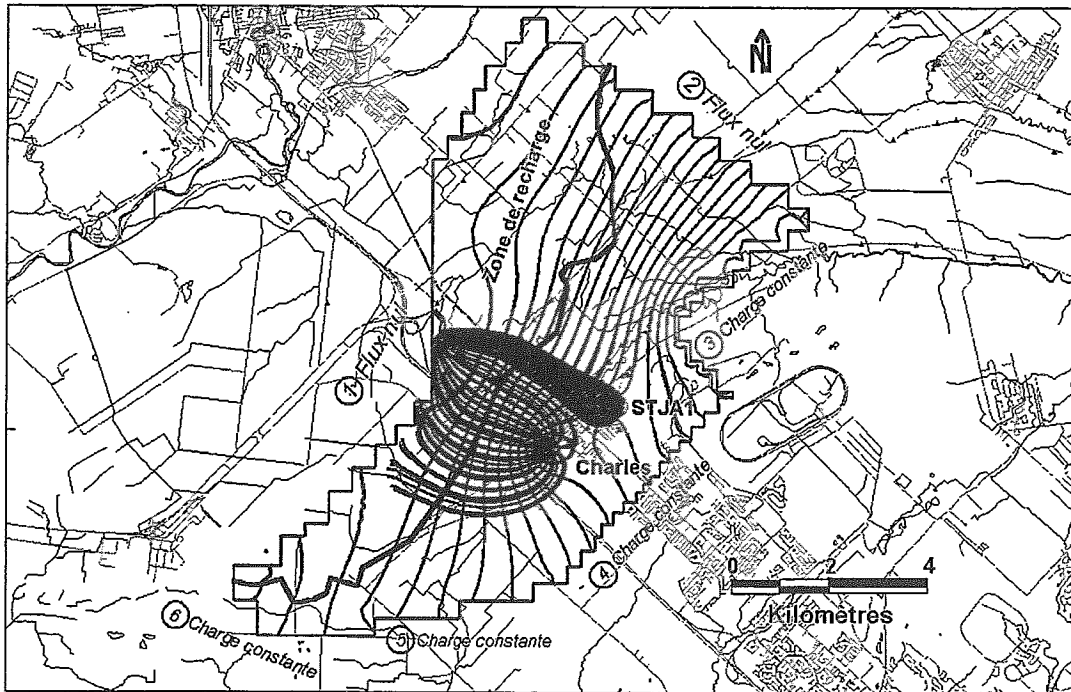


Figure 5.29 - Aires d'alimentation et conditions limites du modèle MODFLOW à Saint-Janvier.

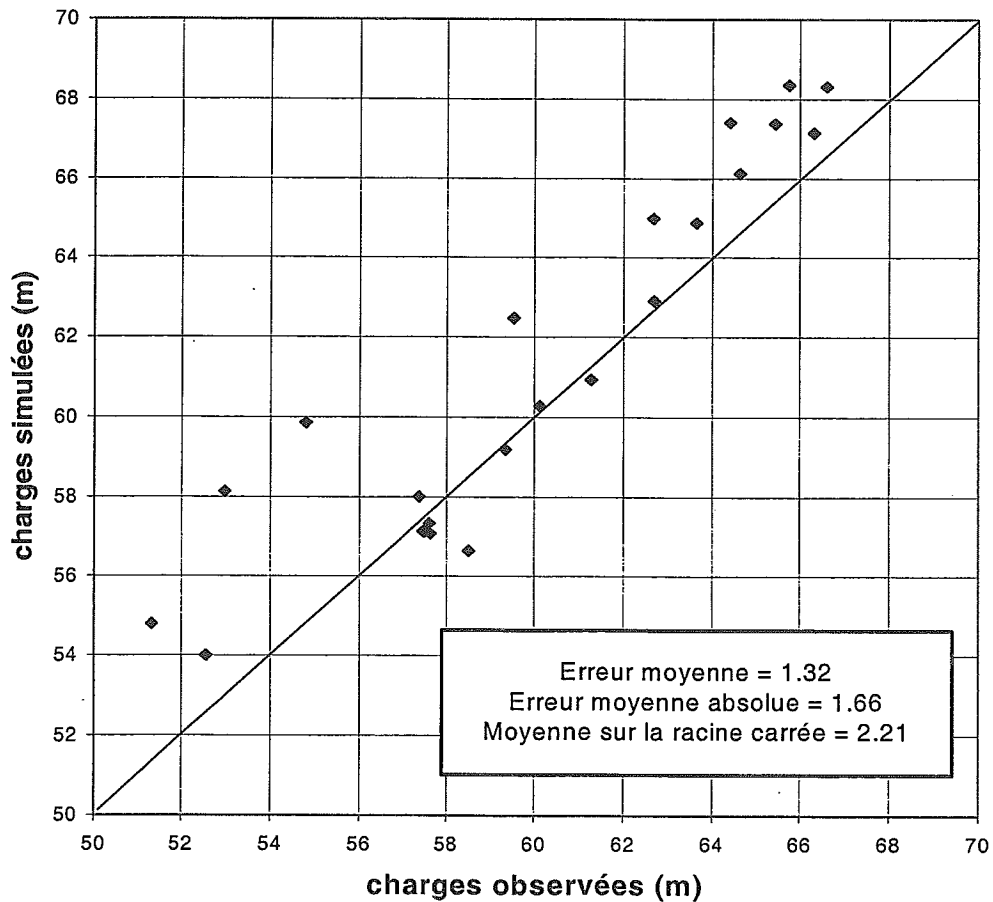


Figure 5.30 - Graphique des charges simulées en fonction des charges observées.

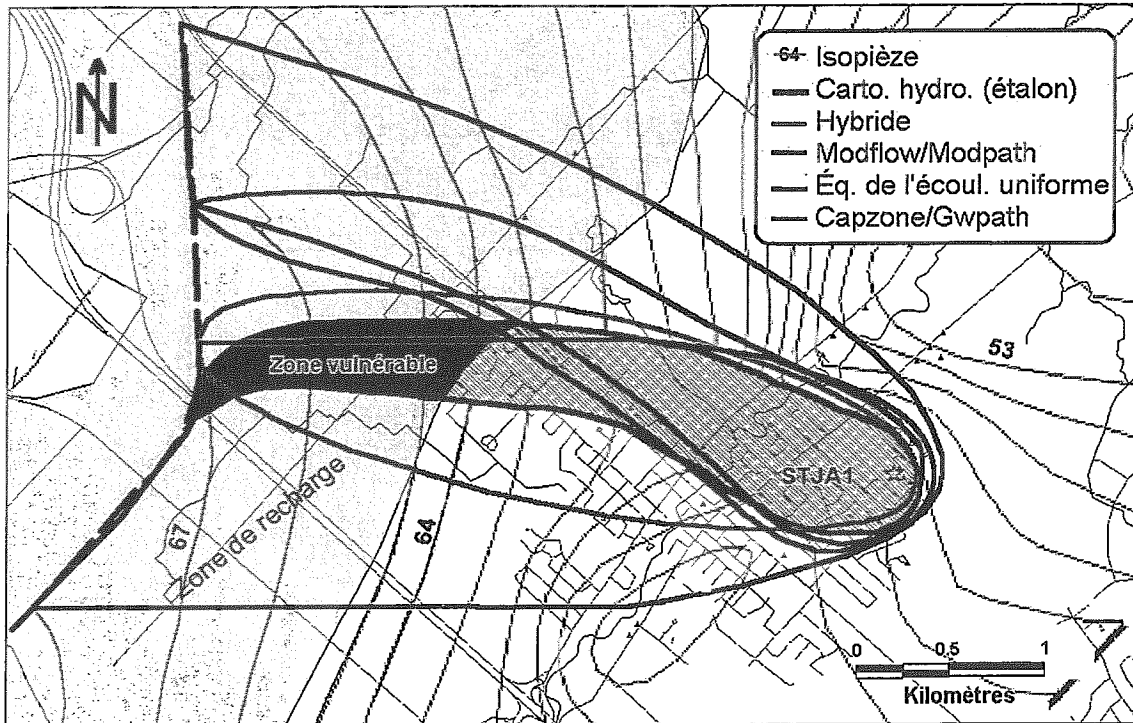


Figure 5.31 - Périmètres de protection éloignés des méthodes appliquées au puits STJA1.

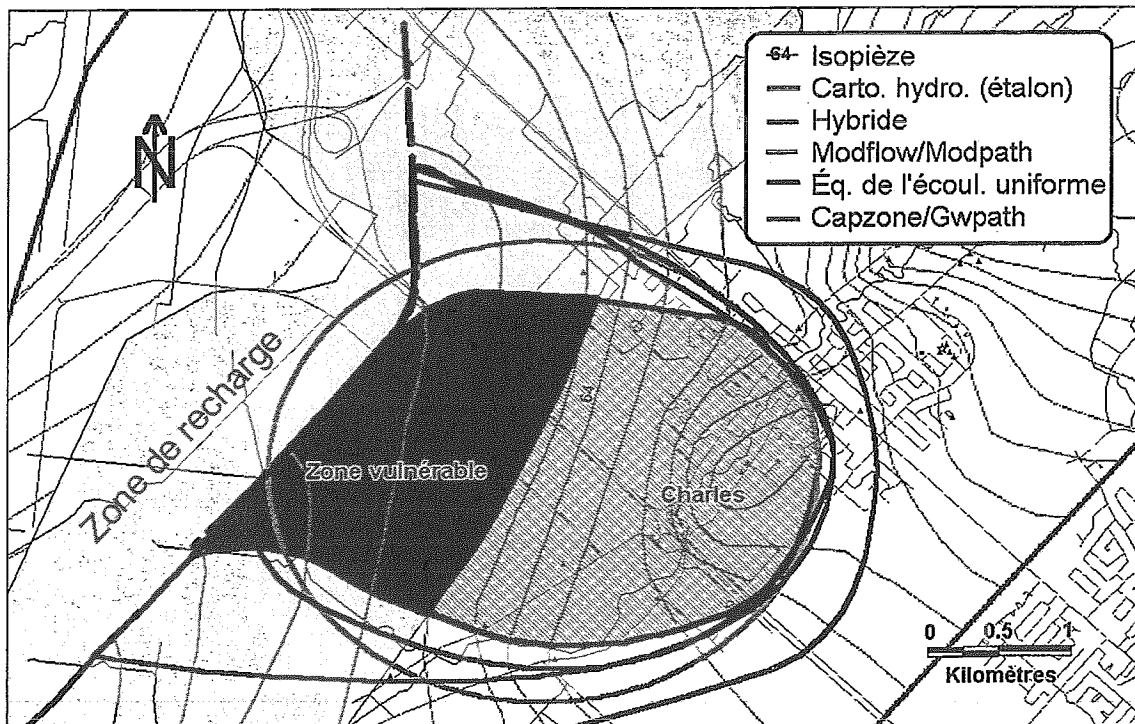


Figure 5.32. - Périmètres de protection éloignés des méthodes appliquées au puits Charles.

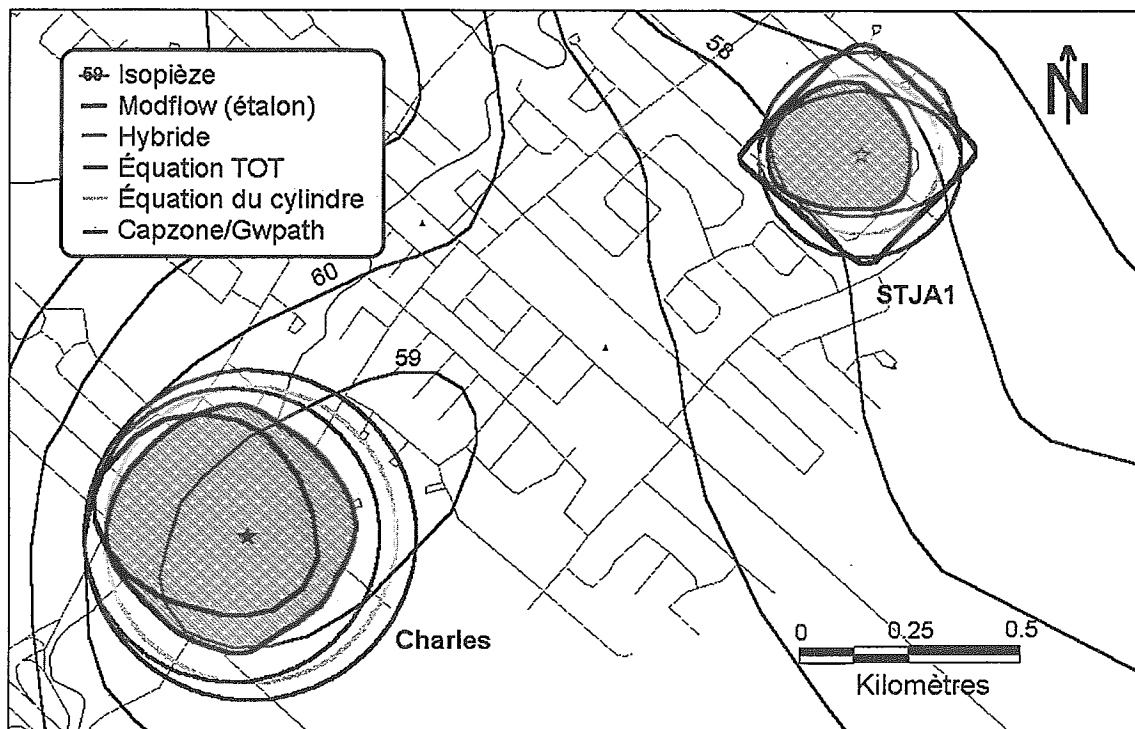


Figure 5.33 - Périmètres de protection rapprochés des méthodes appliquées aux puits STJA1 et Charles

Tableau 2.1 - Qualité de l'eau souterraine dans le secteur de la carrière étudiée à Chatham (d'après Cloutier et al., 2002).

Coordonnées – UTM (NAD 83) zone 18		Type d'eau simplifié ^a	Sr (mg/L)	Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada ^b (les données dépassant les recommandations sont en caractères gras)										Dureté totale ^f	
X (m)	Y (m)			Critère de qualité ^c			Objectifs esthétiques ^c							>200	>500
		Ba	F	NO ₃	Fe	Mn	Na	Cl	SO ₄	HS	pH ^d	MDT ^e			
528708	5055473	1	1,5	10 (en N)	≤0,3	≤0,05	≤200	≤250	≤500	≤0,05	6,5-8,5	≤500	>200	>500	
544508	5052722	0,1	0,31	0,27	0,003	0,037	22	35	23	<0,02	7,8	237	159	159	
540891	5049697	0,11	2,3	<0,02	0,064	<0,0003	54	63	43	<0,02	7,9	300	160	160	
544416	5049480	17	1	<0,02	0,041	0,007	12,7	5	43	0,04	7,45	312	258	258	
543088	5051888	15	0,004	0,02	0,46	0,005	21	20	1200	0,03	7,21	1891	1395	1395	
536912	5053326	29	0,28	<0,02	0,5	0,018	27	75	45	0,04	7,64	510	280	280	
532292	5054698	12	0,02	0,05	0,62	0,008	90	40	660	0,04	7,44	1068	680	680	
537606	5054620	6,1	0,09	0,58	0,016	0,0008	7,4	12	30	0,04	7,16	297	262	262	
537207	5049662	19	0,14	<0,02	0,29	0,012	16,9	24	20	0,07	7,87	310	226	226	
533067	5052380	0,02	0,05	<0,02	0,024	0,001	150	30	45	0,02	7,52	214	0,7	0,7	
531925	5055621	9,5	0,18	0,1	0,024	0,011	10,2	21	23	0,03	7,75	268	213	213	
539133 ^g	5052525 ^g	13	0,03	<0,02	0,025	0,006	93	76	75	<0,02	8,08	310	87	87	
		<0,007	0,05	<0,02	0,01	0,005	140	33	240	<0,02	7,68	428	158	158	

a Type d'eau représenté par le cation et l'anion dominant en mg/L;

b Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène en milieu de travail (2001);

c Unités en mg/L lorsque non spécifiées;

d Sans unité;

e Matières dissoutes totales calculées en mg/L;

f La dureté totale est la somme des concentrations de Ca²⁺ et Mg²⁺ exprimées en mg/L de CaCO₃. La dureté est un paramètre ne faisant pas l'objet de recommandations. On considère qu'une eau dont le degré de dureté se situe entre 80 et 100 mg/L est jugé acceptable, que lorsqu'elle est supérieure à 200 mg/L, elle est de qualité médiocre mais peut être tolérée par les consommateurs, et que lorsqu'elle est supérieure à 500 mg/L, elle est inacceptable pour la plupart des usages domestiques (Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène en milieu de travail, 2001);

g Puits d'observation 00_SIN-F3 de la carrière MARELLAN.

Tableau 2.2 Résultats des essais à charge constante (Lugeon), des essais de perméabilité *in situ* et élévation de la base du forage pour les puits d'observation de la carrière étudiée à Chatham.

Puits	Conductivité hydraulique (m/s)		Élévation de la base du forage (m)
	Charge constante (Lugeon)	Perméabilité <i>in situ</i>	
00_SIN-F1	-	4,9E-6	44,9
00_SIN-F2	-	1,4E-7	68,8
00_SIN-F3	1,7E-7	1,3E-6	28,9
00_SIN-F4	-	6,8E-7	72 ,0
Moyenne géométrique		8,8E-7	

Tableau 2.3 - Conductivité hydraulique et critère de validité pour l'interprétation de l'essai de pompage par la méthode de Birsoy-Summers (1980) aux puits d'observation 00_SIN-F1 à F4.

Puits	Birsoy-Summers	
	Conductivité hydraulique (m/s)	Critère de validité * (min)
00_SIN-F1	1,14E-2	24 750
00_SIN-F2	3,60E-2	67 500
00_SIN-F3	5,82E-3	90 000
00_SIN-F4	1,81E-2	78 750

* Durée de l'essai : 16 000 minutes.

Tableau 3.1 - Description des forages de Saint-Benoît.

Puits	Date du forage	Type d'installation	Diam. du puits (cm)	X utm NAD 83	Y utm NAD 83	Z élév. sol (m)	Prof. puits pr/sol (m)	Prof. roc pr/sol (m)	Tubage long. pr/sol (m)	Crépine haut pr/sol (m)	Crépine bas pr/sol (m)
P1	28.02.00	piézo.	5	568843	5048325	49,86	29,1	29,3	27,26	27,8	29,3
P2	29.02.00	piézo.	5	568940	5048430	50,02	35,7	31,4	30,23	32,1	35,1
P3	01.03.00	piézo.	5	568585	5048460	50,45	25,8	24,4	23,53	23,6	25,1
P4	02.03.00	piézo.	5	568949	5048097	49,15	21,8	25	24,09	20,3	21,8
P5	13.03.00	piézo.	5	569273	5048677	50,07	36,3	34,9	32,33	34,7	36,3
F1	03.03.00	puits ouvert	15	568430	5048768	53,07	73	20,4	20,97	n/a	n/a
F2	07.03.00	puits ouvert	15	569236	5048712	50,79	49,7	33,5	32,29	n/a	n/a
F3*	09.03.00	puits ouvert	15	569252	5048694	50,53	37,2	34,9	33,23	n/a	n/a
F4	15.03.00	puits ouvert	15	569152	5047829	48,85	104,	21,3	28,15	n/a	n/a
PE-1/87*	1987	puits crépiné	20	568821	5048290	49,8	24,4	24,39	20,59	21,0	24,07
P0	1987	puits ouvert	15	568826	5048292	49,8	24	24,39	20,65	n/a	n/a

* puits pompé

Tableau 3.2 - Résultats d'analyses chimiques des échantillons d'eau prélevés dans les puits situés dans la zone à l'étude (concentrations en mg/L).

puits	Date échantillon	Géologie	Formation	Élévation	pH	CND	OD	ALC	Ca	Mg	K	Na	Mn	Fe	Cl	Br	F	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂	Sr	Ba	B	COD	PO ₄	NO ₃	NH ₄	
P1	15.06.00	sédiments	séd.-roc	22	7,7	1,401	8,46	270	19,5	30	15	240	0,09	0,12	290	1,01	0,51	15	329	11,3			0,13	0,2	0,9	0,2	0,02	0,72
P2	07.07.00	Cairnside	séd.-roc	17	8,0	6,312	1,46	240	18	55	16,8	1260	0,04	0,23	1900	7	0,42	15	293	6,9		1,2	0,25	0,42	5	0,01	0,02	1,98
P3	22.06.00	Cairnside	séd.-roc	28	8,1	0,629	1,22	250	16	26	8	82	0,02	0,12	63	0,24	0,62	15	305	15		1,27	0,13	0,11	0,09	0,09	0,35	
P4	13.06.00	Covey Hill	séd.-roc	27	8,0	0,78	2,41	190	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	85	0,31	0,62	13	232	11,3		n.d.	n.d.	1,3	0,15	0,02	0,45	
P5	15.06.00	Cairnside	séd.-roc	16	7,7	0,474	2,4	240	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,2	0,02	0,37	15	293	12,7		n.d.	n.d.	1,3	0,16	0,02	0,21	
1/87	17.10.88	Cairnside	séd.-roc	22		1,015		265	29	33		135	0,17	0,13	165		0,5	19										
F1	22.06.00	Cairnside	roc	6				280	46	32	4,4	15	0,12	0,5	0,1	0,01	0,29	22	341	21		0,48	0,27	0,00	0,1	0,02	0,1	
F3	16.08.00	Cairnside	séd.-roc	16	7,5	0,498	5,05	250	25	18,6	4,9	61	0,33	0,1	15	0,08	0,36	9,5	305	12,2		0,44	0,19	1,4	0,12	0,02	0,22	
F4	02.08.00	Covey Hill	roc	-18	7,4	1,125	3,14	290	13	12,6	7,8	240	0,13	0,11	200	1,2	0,49	24	354	10,2		0,28	0,08	0,6	0,2	0,02	0,3	
Critère de qualité de l'eau * (CMA)																												
Critère de qualité de l'eau * (OE)																												
* Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail, 2001																												
CMA: concentration maximale acceptable																												
OE: objectif esthétique																												
Élev.: élévation de l'échantillon d'eau relativement au niveau moyen de la mer																												
CND: conductivité électrique spécifique, mS/cm (25 degrés C)																												
O.D.: oxygène dissout (mg/L)																												
ALC: alcalinité totale (mg/L CaCO ₃)																												
COD: carbone organique dissous																												
n.d.: résultat non disponible dû à des problèmes d'analyse en laboratoire																												

Tableau 3.3 - Échantillonnage multi-niveaux, Forage F4 (concentrations en mg/L).

Profondeur échantillon (m)	pH	CND	OD	ALC	Ca	Mg	Zn	K	Na	Mn	Fe	Cl	Br	F	PO ₄	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂	Sr	Ba	B	COD	NO ₃	NH ₄
32,91	8,11	1,296	2,18	300	14,6	24	0,028	9,3	220	0,15	0,31	240	1,2	0,53	0,2	16	365,7	8,3	0,53	0,11	0,24	1,1	<.02	0,64
46,57	8,14	1,268	5,18	310	10,4	14,8	0,08	9	250	0,2	0,07	240	0,89	0,45	0,16	24	377,9	8,8	0,32	0,09	0,34	0,9	<.02	0,44
64,01	7,64	1,225	0,54	290	10,8	15,2	0,079	8,6	230	0,17	0,22	200	0,79	0,47	0,19	23	353,5	9,2	0,136	0,09	0,3	0,5	<.02	0,42
78,79	7,52	1,222	0,47	290	10,5	12,2	0,051	7,8	240	0,13	0,14	210	0,78	0,43	0,2	22	353,5	10,1	0,29	0,08	0,3	0,5	0,02	0,35
93,85	7,59	1,242	0,37	310	11,6	13,7	0,016	7,3	240	0,18	0,096	230	0,79	0,46	0,24	22	377,9	10,1	0,3	0,09	0,28	0,7	<.02	0,34

CND: conductivité électrique spécifique, mS/cm (25 °C)

O.D.: oxygène dissout (mg/L)

ALC: alcalinité totale (mg/L CaCO₃)

COD: carbone organique dissous

Tableau 3.4 - Évolution de la qualité de l'eau souterraine dans les puits de pompage.

Date d'échantillonnage	conductivité (mS/cm)	Cl (mg/L)	Na (mg/L)	Dureté (mg/L CaCO ₃)	Mn (mg/L)	Fe (mg/L)
PE-1/87						
02-05-00	0.672					
03-05-00	0.728	75		172	0,17	0,187
04-05-00	0.746	78		172	0,165	0,181
05-05-00	0.779					
06-05-00						
07-05-00						
08-05-00	0.860	116		256	0,162	0,195
09-05-00	0.880					
10-05-00	0.894					
F3						
15-08-00						
16-08-00	0.498	15	61	139	0,33	0,1
17-08-00						
18-08-00	0.516	22	62	141	0,32	0,1
19-08-00						
20-08-00						
21-08-00						
22-08-00	0.550	32	70	150	0,33	0,3

Tableau 3.5 - Forage F5 : Géochimie de l'eau interstitielle des argiles (mg/L).

Profondeur (m)	pH	Cond.	Alcal.	Ca	K	Mg	Na	Sr	Cl	Br	SO ₄	HCO ₃
2,4	8,2	0,51	290	31	4,8	22	170	0,17	160	0,47	2,5	353,6
4,7	8	2,12	300	48	21	59	360	0,48	560	2	9,5	365,8
7,7	8,2	2,63	320	23	24	39	570	0,35	720	2	21	390,1
10,7	8,4	2,63	480	17,4	23	27	720	0,27	630	3	19	585,2
14,5	8,3	3,23	560	16,6	25,7	33	720	0,4	790	3	n.d.	682,8

Cond. : conductivité électrique spécifique, mS/cm (25 °C)

Alcal. : alcalinité totale (mg/L CaCO₃)

n.d.: résultat non disponible dû à des problèmes d'analyse en laboratoire

Tableau 3.6 - Ratio molaire Cl⁻/Br⁻ de l'eau de mer et des échantillons en conditions de nappe captive de la région de Saint-Benoît.

	Eau de mer	FROMA1	PLA2	BEN4	BEN1	F4
Salinité (g/L)	35	11,4	1,7	1,3	0,72	0,55
Cl ⁻ /Br ⁻	648,1	636,9	648,8	617,3	676,1	375,6

Tableau 3.7 - Comparaison entre l'eau de mer et FROMA1 pour les ions Cl⁻ et de Br⁻.

Ions	Eau de mer ¹ (mmol)	FROMA1 (mmol)	FROMA1/Eau de mer
Cl ⁻	546	183	0,34
Br ⁻	0,84	0,29	0,35

1: Données chimiques de l'eau de mer de Drever (1997)

Tableau 3.8 - Propriétés hydrauliques.

Transmissivité (m ² /s)										
formation	PE-1/87 ▼ Theis	F3 ▼ Theis	PE-1/87 ▼ Cooper	F3 ▼ Cooper	PE-1/87 ▲ Theis Jacob	F3 ▲ Theis Jacob	Hydrogé Canada, 1988	moyenne arithmét.	moyenne géométrique	Slug test
till graveleux	P1 5,60E-04		6,50E-04		5,70E-04			5,93E-04		6,45E-04
till graveleux	P4 8,80E-04	1,40E-03	6,80E-04	5,40E-04	5,90E-04	5,90E-04		7,92E-04		5,66E-03
till graveleux	P5	2,00E-04		2,30E-04	2,00E-04	2,00E-04		2,10E-04		1,59E-03
till graveleux	P0	1,10E-03		6,00E-04	5,90E-04	5,90E-04	1,20E-03	8,73E-04		
till silteux	P2	7,80E-04	6,30E-04		6,50E-04	5,10E-04		6,43E-04		4,28E-06
till silteux	P3	7,00E-04	5,30E-05		6,20E-04	6,30E-04		6,09E-04		9,26E-05
till grav/roc	F2	1,40E-04		2,10E-04		2,20E-04		1,90E-04	4,70E-04	
roc cairnside	F1	5,00E-04		8,10E-04				6,55E-04		5,79E-05
roc coveyhill	F4	4,10E-04	4,70E-04		6,30E-04	5,90E-04		5,28E-04	4,04E-04	

Conductivité hydraulique K (m/s)

Conductivité hydraulique K (m/s)										
formation	PE-1/87 ▼ Theis	F3 ▼ Theis	PE-1/87 ▼ Cooper	F3 ▼ Cooper	PE-1/87 ▲ Theis Jacob	F3 ▲ Theis Jacob	Hydrogé Canada, 1988	moyenne arithmét.	moyenne géométrique	Slug test
till graveleux	P1 1,87E-04		2,17E-04		1,90E-04			1,97E-04		4,30E-04
till graveleux	P4 2,93E-04	4,67E-04	2,27E-04	1,80E-04	2,20E-04	1,97E-04		2,50E-04		3,78E-03
till graveleux	P5	6,67E-05		7,67E-05		6,67E-05		6,98E-05		1,06E-03
till graveleux	P0	3,67E-04		2,00E-04		1,97E-04	4,00E-04	2,76E-04		
till silteux	P2	2,60E-04	2,10E-04		2,17E-04	1,70E-04		2,12E-04		1,43E-06
till silteux	P3	2,33E-04	1,77E-05		2,07E-04	2,10E-04		1,51E-04		6,14E-05
till grav/roc	F2	4,67E-05		7,00E-05		7,33E-05		6,21E-05	1,46E-04	
roc cairnside	F1	1,67E-04		2,70E-04				2,12E-04		8,27E-07
roc coveyhill	F4	1,37E-04	1,57E-04		2,10E-04	1,97E-04		1,74E-04	1,32E-04	

▼ rabatement

▲ remonté

Tableau 3.8 (suite)
Propriétés hydrauliques.

formation	PE-1/87 ▼ Theis	F3 ▼ Theis	PE-1/87 ▼ Cooper	F3 ▼ Cooper	Hydrogé Canada, 1988	moyenne arithmét.	moyenne géométrique
till graveleux P1	1,20E-03	1,10E-04	1,00E-03	1,00E-04		1,10E-03	
till graveleux P4	2,00E-04	9,00E-05	2,60E-04	7,20E-05		1,55E-04	
till graveleux P5		6,40E-05		8,90E-05	5,80E-03	8,05E-05	
till graveleux P0						3,21E-04	
till silteux P2	1,10E-04	9,00E-05	1,70E-04	8,80E-05		1,37E-04	
till silteux P3	3,10E-04	9,00E-05	3,10E-04	8,80E-05		1,66E-04	
till grav/roc F2		9,00E-05		4,50E-05		6,36E-05	0,0001
roc cairnside F1		4,50E-04		3,30E-04		3,85E-04	
roc coveyhill F4	1,40E-04	1,80E-04	1,20E-04	1,10E-04		1,35E-04	0,0001

▼ rabatement

▲ remonté

Tableau 3.9 - Propriétés hydrauliques pour les diverses unités hydrostratigraphiques.

Couche N°	Unité Hydrostratigraphique	Porosité effective	Coeff. d'emmag.	Conductivité hydraulique (m/s)	
				Horizontale	Verticale
I	Sable gravier et grès très fracturé	0.2	1.0×10^{-4}	K_h variable (Figure 15)	$= K_h$
II	Grès fracturés	0.01	1.0×10^{-5}	1.2×10^{-5}	0.12×10^{-5}
III	Grès fracturés	0.01	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}

Tableau 3.10 Paramètres statistiques de la résiduelle (r) pour la r simulation sans pompage le 10 août 2000.

Simulation	r moyenne	r moyenne absolue	r minimum	r maximum	r écart type
Sans pompage	0.08	0.68	-1.18	1.30	0.83

Tableau 3.11 - Les niveaux de l'eau souterraine dans les puits d'observation et de pompage le 20 août pour les divers scénarios de la simulation numérique. Les valeurs en gimp/jour sont arrondies pour faciliter la compréhension.

Puits d'observation / pompage	Scénario #1	Scénario #2	Scénario #3	Scénario #4	Scénario #5	Scénario #6	Scénario #7	Scénario #8	Scénario #9
	sans pompage	Pomp. continu PE-1/87 180 m ³ /jour 40000 gimp/j	Pomp. continu F3 180 m ³ /jour 40000 gimp/j	Pompage simultané 2x140 m ³ /jour 2x30000 gimp/jour I mai-1 oct.	Pompage simultané 2x160 m ³ /jour 2x35000 gimp/jour continu	Pompage simultané 2x180 m ³ /jour 2x40000 gimp/jour I mai-1 oct.	Pompage simultané 2x180 m ³ /jour 2x40000 gimp/jour continu		
P-3	47,50	43,84	44,92	43,65	42,65	43,16	41,95	42,56	41,26
P-2	46,41	42,33	43,23	41,67	40,76	41,05	39,95	40,32	39,14
P-O	46,69	39,30	44,03	39,82	38,88	38,89	37,76	37,86	36,64
P-5	45,59	42,98	38,84	39,14	38,32	38,26	37,28	37,30	36,24
F-3	45,67	43,02	35,17	36,28	35,45	34,99	34,00	33,61	32,54
P-4	46,18	42,54	43,85	42,43	41,54	41,94	40,87	41,36	40,21
P-1	46,68	41,56	43,83	41,42	40,48	40,73	39,60	39,93	38,71
75	48,28	46,86	47,11	47,30	46,27	47,23	45,98	47,02	45,69
13	48,25	46,90	47,12	47,37	46,32	47,31	46,04	47,12	45,77
5	49,44	48,08	48,30	48,63	47,50	48,60	47,22	48,41	46,94
2	41,21	40,86	40,86	40,87	40,66	40,83	40,59	40,77	40,51
F-2	45,69	43,04	37,12	37,80	36,96	36,71	35,72	35,55	34,47
F-1	48,25	45,23	45,64	44,93	43,87	44,52	43,25	43,98	42,62
F-4	45,65	43,15	43,67	43,00	42,16	42,67	41,67	42,25	41,17
33	51,32	49,27	49,72	49,66	48,49	49,51	48,09	49,19	47,68
St-Vincent	50,86	48,80	49,25	49,17	48,01	49,01	47,61	48,70	47,20
17	43,57	42,67	42,75	42,78	42,23	42,70	42,04	42,56	41,85
18	49,65	47,02	47,55	47,09	45,97	46,80	45,45	46,37	44,93
PE-1/87	46,65	36,41	-	37,57	36,64	36,33	35,21	34,98*	33,78*
F3	45,67	43,02	35,17	36,28	35,45	34,99*	34,00*	33,61*	32,54*

* dépassement de l'élévation de 35 m dans le(s) puits de pompage.

Tableau 3.12 - Bilans annuels de masse d'eau pour les divers scénarios de la simulation numérique. Les valeurs en gimp/jour sont arrondies pour faciliter la compréhension.

Débits annuels (m ³)	Scénario #1	Scénario #2	Scénario #3	Scénario #4	Scénario #5	Scénario #6	Scénario #7	Scénario #8	Scénario #9
	sans pompage	Pomp. continu PE-1/87 180 m ³ /jour 40000 gimp/j	Pomp. continu F3 180 m ³ /jour 40000 gimp/j	Pompage simultané 2x140 m ³ /jour 2x30000 gimp/jour 1 mai-1 oct.	Pompage simultané 2x160 m ³ /jour 2x35000 gimp/jour 1 mai-1 oct.	Pompage simultané 2x180 m ³ /jour 2x40000 gimp/jour 1 mai-1 oct.	Pompage simultané 2x160 m ³ /jour 2x35000 gimp/jour 1 mai-1 oct.	Pompage simultané 2x180 m ³ /jour 2x40000 gimp/jour 1 mai-1 oct.	Pompage simultané 2x180 m ³ /jour 2x40000 gimp/jour 1 mai-1 oct.
Recharge	274700	274700	274700	274700	274700	274700	274700	274700	274700
Pompage	0	65700	65700	42840	102220	48960	116800	55080	131400
%	0	23,9	23,9	15,6	37,2	17,8	42,5	20,1	47,8

Tableau 4.1 - Recharge calculée avec les bilans hydrologiques, Hamel (2002).

Année	Méthode	Recharge [mm/an]
1993	Rochette et Dubé (1989)	275
	Thorntwaite	346
1998	Rochette et Dubé (1989)	187
	Thorntwaite	207
Moyenne	-	254

Tableau 4.2 - Recharge calculée à l'aide des hydrogrammes de puits, Hamel (2002).

Localisation	Période d'enregistrement des données	Variation annuelle moyenne m	Variation annuelle moy.-Max m	Variation annuelle moy.-Min m	Tendance	Recharge
					cm/an	mm/an
R8	1974-1993	1.15	1.72	0.23	-4.48	
R14	1974-1994	1.78	2.69	0.50	5.58	190
R15	1974-1993	3.97	8.13	1.39	-6.10	152
R19	1974-1988	1.18	3.95	1.18	1.56	166
R1-69	1973-1988	1.27	2.27	0.59	2.81	
St-Eustache	1978-1986	2.97	4.89	0.45	11.23	
St-Eustache	1978-1993	1.54	2.40	0.65	7.33	
St-Eustache	1978-1988	0.80	1.29	0.34	6.97	
St-Eustache	1978-1988	0.79	1.96	02.9	5.74	
Moyenne						169

Tableau 4.3 - Transmissivité mesurée avec les essais Lugeon et les essais de perméabilité.

Puits	Transmissivité [m^2/s]	
	Essais Lugeon	Essais de perméabilité
SE4	2.52×10^{-3}	1.05×10^{-3}
SE5	5.61×10^{-3}	1.22×10^{-3}
SE6	7.77×10^{-3}	9.8×10^{-4}

Tableau 4.4 - Résumé des valeurs obtenues par interprétation des essais de pompage.

Solution	Type d'aquifère	Puits	T m^2/s	S	K' m/s	S' m/s
Hantush point d'inflexion	drainant	SE4	7.9×10^{-4}	2.6×10^{-4}	1.5×10^{-7}	-
		SE5	8.7×10^{-4}	4.0×10^{-4}	2.3×10^{-7}	-
Hantush courbes types	drainant	SE4	6.2×10^{-4}	2.5×10^{-4}	-	1.5×10^{-4}
		SE5	7.4×10^{-4}	3.4×10^{-4}	-	2.2×10^{-4}
Walton	drainant	SE4	1.7×10^{-5}	6.2×10^{-4}	-	-
		SE5	7.7×10^{-4}	1.9×10^{-4}	-	-
Theis	Confiné	SE4	7.7×10^{-4}	2.6×10^{-4}	-	-
		SE5	7.0×10^{-4}	2.7×10^{-4}	-	-
Cooper-Jacob	Confiné	SE4	6.3×10^{-4}	5.8×10^{-4}	-	-
		SE5	5.5×10^{-4}	7.8×10^{-4}	-	-
Moy. Géométrique			4.9×10^{-4}	2.3×10^{-4}	1.9×10^{-7}	1.8×10^{-4}

Tableau 5.1 - Méthodes de délimitation des PDP évaluées par ordre de complexité.

No	Méthode	PDP rapproché	PDP éloigné	Références
1	Équation du cylindre	X		EPA, 1994
2	Équation de l'écoulement uniforme		X	EPA, 1994
3	Calcul du temps de transport	X		EPA, 1994
4	Méthode hybride 3A2E	X	X	Paradis, 2000
5	Cartographie hydrogéologique		X	EPA, 1991
6	Modèle analytique CAPZONE	X	X	Bair et al., 1991
7	Modélisation numérique MODFLOW	X	X	McDonald et al., 1988

Tableau 5.2 - Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés aux puits P8 et Barrette.

Ste-Anne-des-Plaines	Périmètre éloigné			
Puits P8	Aire commune %	Aire non-protégée %	Aire trop protégée %	Zone de recharge %
Carto. hydrogéologique	100	0	0	100
Méthode hybride	97	3	112	99
Modflow/Modpath	64	36	23	27
Écoulement uniforme	31	69	30	0
Capzone/Gwpath	83	17	8	60

Ste-Anne-des-Plaines	Périmètre éloigné			
Puits Barrette	Aire commune %	Aire non-protégée %	Aire trop protégée %	Zone de recharge %
Carto. hydrogéologique	100	0	0	100
Méthode hybride	98	2	100	100
Modflow/Modpath	70	30	16	54
Écoulement uniforme	38	62	29	7
Capzone/Gwpath	83	17	3	73

Tableau 5.3 - Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés aux puits P8 et Barrette.

Ste-Anne-des-Plaines	Périmètre rapproché		
Puits P8	Aire commune %	Aire non-protégée %	Aire trop protégée %
Modflow/Modpath	100	0	0
Méthode hybride	80	20	47
TOT (Bear & Jacob)	86	14	85
Équation du cylindre	77	23	51
Capzone/Gwpath	100	0	74

Ste-Anne-des-Plaines	Périmètre rapproché		
Puits Barrette	Aire commune %	Aire non-protégée %	Aire trop protégée %
Modflow/Modpath	100	0	0
Méthode hybride	86	14	78
TOT (Bear & Jacob)	85	15	118
Équation du cylindre	96	4	69
Capzone/Gwpath	79	21	10

Tableau 5.4 - Tableau du classement des méthodes pour les périmètres rapprochés et éloignés.

PÉRIMÈTRE RAPPROCHÉ	PÉRIMÈTRE ÉLOIGNÉ
MODFLOW/MODPATH	CARTOGAPHIE HYDROGÉOLOGIQUE
1. CAPZONE/GWPATH	1. Méthode hybride 3A2E
2. Équation du cylindre	2. CAPZONE/GWPATH
3. Équation du temps de transport	3. MODFLOW/MODPATH
4. Méthode hybride 3A2E	4. Écoulement uniforme

Tableau 5.5 - Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés aux puits STJA1 et Charles

St-Janvier	Périmètre éloigné			
Puits STJA1	Aire commune %	Aire non-protégée %	Aire trop protégée %	Zone de recharge %
Carto. hydrogéologique	100	0	0	100
Méthode hybride	97	3	80	95
Modflow/Modpath	62	38	71	1
Écoulement uniforme	90	10	208	73
Capzone/Gwpath	53	47	173	0

St-Janvier	Périmètre éloigné			
Puits Charles	Aire commune %	Aire non-protégée %	Aire trop protégée %	Zone de recharge %
Carto. hydrogéologique	100	0	0	100
Méthode hybride	98	2	33	95
Modflow/Modpath	99	1	25	98
Écoulement uniforme	100	0	124	100
Capzone/Gwpath	100	0	46	100

Tableau 5.6 - Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés au puits STJA1.

St-Janvier	Périmètre rapproché		
Puits STJA1	Aire commune %	Aire non-protégée %	Aire trop protégée %
Modflow/Modpath	100	0	0
Méthode hybride	96	4	41
TOT (Bear & Jacob)	100	0	127
Équation du cylindre	92	8	44
Capzone/Gwpath	100	0	102

Tableau 5.7 - Résultats de la comparaison des méthodes pour les périmètres rapprochés au puits Charles.

St-Janvier	Périmètre rapproché		
Puits Charles	Aire commune %	Aire non-protégée %	Aire trop protégée %
Modflow/Modpath	100	0	0
Méthode hybride	100	0	53
TOT (Bear & Jacob)	100	0	94
Équation du cylindre	100	0	53
Capzone/Gwpath	72	28	6

Tableau 5.8 - Tableau du classement des méthodes pour les périmètres rapprochés et éloignés.

PÉRIMÈTRE RAPPROCHÉ	PÉRIMÈTRE ÉLOIGNÉ
MODFLOW/MODPATH	CARTOGAPHIE HYDROGÉOLOGIQUE
1. Équation du temps de transport	1. Méthode hybride 3A2E
2. Méthode hybride 3A2E	2. Écoulement uniforme
3. Équation du cylindre	3. CAPZONE/GWPATH
4. CAPZONE/GWPATH	4. MODFLOW/MODPATH