

Université du Québec
INRS - Géoressources

**CARTOGRAPHIE HYDROGÉOLOGIQUE RÉGIONALE
ET VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES
DE LA MRC DE PORTNEUF**

Par

Nathalie Fagnan
B.Sc.

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur externe

Luc Champagne, M. Sc. A
ministère de l'Environnement
et de la Faune du Québec

Examineur interne

Richard Martel, Ph. D.
INRS-Géoressources

Co-directeur de recherche

Yves Michaud, Ph. D.
Commission géologique
du Canada

Directeur de recherche

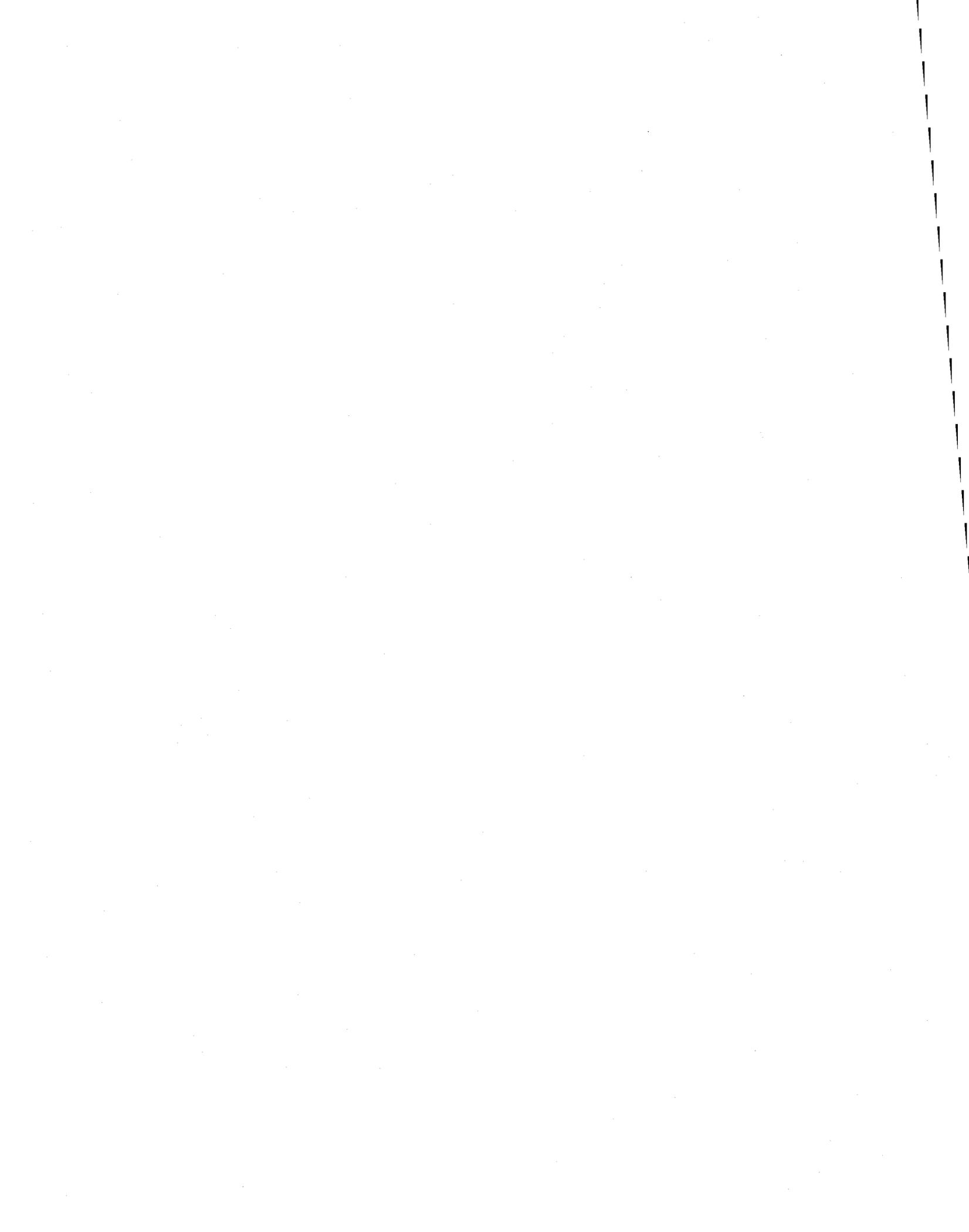
René Lefebvre, Ph. D.
INRS-Géoressources

(17 novembre 1998)



« Une nouvelle philosophie, une façon de vivre, n'est jamais donnée pour rien. Elle doit être chèrement payée et acquise à force de patience et d'effort. »

Fedor DOSTOÏEVSKI



RÉSUMÉ

Au Québec, 25 % de la population utilise l'eau souterraine comme source d'approvisionnement en eau potable. Cette ressource est généralement de bonne qualité et peu coûteuse, mais elle est de plus en plus sujette à des conflits d'usage. En effet, au cours des 20 dernières années, les activités agricoles et industrielles ont contribué à augmenter le potentiel de contamination des eaux souterraines, et, dans certains cas, à la détérioration de sa qualité. La ressource en eau souterraine doit donc être mieux gérée et protégée. Pour ce faire, il est essentiel d'avoir une bonne connaissance des formations aquifères. Or, au Québec, la ressource en eau souterraine a rarement fait l'objet d'une caractérisation exhaustive. La cartographie hydrogéologique et l'évaluation de la vulnérabilité à la contamination sont donc nécessaires pour permettre la protection (qualité) et la conservation (quantité) de la ressource.

Pour combler ce manque de connaissances et fournir un exemple de cartographie hydrogéologique un projet pilote a été initié dans la MRC de Portneuf. Ce projet est réalisé conjointement par la CGC-Québec, l'INRS-Géoressources et l'Université Laval et est soutenu par le MEF. Ce projet s'inscrit dans le cadre du projet de politique du MEF visant la protection et la conservation des eaux souterraines. Cette politique prévoit que la ressource sera gérée au niveau local, possiblement par les MRC qui l'intégreront à leur schéma d'aménagement ou par des agences de bassins versants. La méthodologie de cartographie employée lors du projet pilote servira de guide pour les travaux futurs de caractérisation de la ressource.

L'objectif de ce mémoire est d'effectuer la cartographie hydrogéologique des formations granulaires et perméables de surface de la MRC de Portneuf tout en participant au développement de nouvelles techniques de cartographie. Les récents développements dans le domaine de la géomatique, tels les SIG (système d'information géographique), ainsi que l'apparition de nombreux logiciels appliqués à l'hydrogéologie ont multiplié les capacités d'entreposage, de traitement et de représentation des données. Les méthodes cartographiques traditionnelles doivent donc être adaptées afin de tirer profit de ces nouvelles technologies.

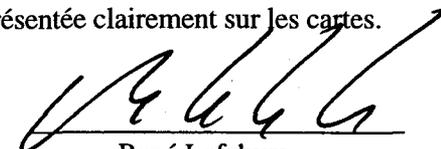
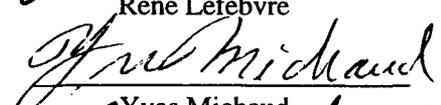
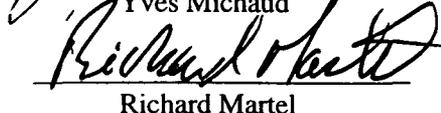
Un territoire d'environ 900 km², englobant la partie Sud de la MRC de Portneuf, a été choisi pour la réalisation de cette étude. La population de la MRC est d'environ 40 000 habitants, dont 85 % utilise les eaux souterraines comme source d'approvisionnement. Cette région a été choisie puisqu'elle est représentative des aquifères du piémont laurentien, des besoins en eaux souterraines des populations rurales ainsi que des conditions hydrogéologiques généralement rencontrées sur la rive Nord du fleuve Saint-Laurent, de Charlevoix jusqu'à l'Outaouais.

Les travaux de cartographie hydrogéologique se sont déroulés suivant quatre étapes : 1) la compilation des données disponibles, 2) les travaux de terrain nécessaires pour obtenir les informations complémentaires ou manquantes, 3) l'intégration et l'analyse de ces données, et finalement, 4) l'élaboration des formats de cartes hydrogéologiques et leur production. Les travaux ont porté sur la délimitation et la caractérisation des formations aquifères ainsi que sur l'évaluation de leur vulnérabilité à la contamination à l'aide de la méthode DRASTIC.

Une série de cartes décrivant les aquifères granulaires de surface a été produite. La carte des unités hydrogéologiques présente la répartition des dépôts de surface en fonction de leur potentiel aquifère. Les principaux aquifères se trouvent dans les sables et graviers de surface localisés le long des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier. La carte isopaque des sables et graviers de surface et la carte des bassins aquifères donnent une appréciation du potentiel aquifère des unités de sables et graviers de surface et permettent de connaître la limite de chacun des aquifères identifiés dans la région d'étude. La carte piézométrique de ces formations indique la direction de l'écoulement des eaux souterraines à travers ces unités hydrogéologiques. La carte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination montre que les formations de sables et graviers de surface sont les plus vulnérables.

La cartographie hydrogéologique a permis de caractériser la ressource en eau souterraine tant au niveau de sa distribution, de son exploitation que de sa vulnérabilité. Les unités de sables et graviers de surface sont les formations aquifères les plus utilisées dans la MRC ainsi que les plus vulnérables à la contamination. De plus, ces aquifères sont situés aux endroits où se concentrent les activités agricoles et urbaines, ce qui commande une protection et une conservation accrue de ces aquifères. L'usage des outils informatiques à chacune des étapes de la cartographie hydrogéologique a été déterminant. Les bénéfices de ces outils se situent au niveau de l'efficacité de la saisie de l'information, de la rapidité du traitement des données et de la facilité de la mise à jour des cartes. Ces outils augmentent aussi significativement les modes de représentation possible des données ainsi que la quantité d'information qui peut être présentée clairement sur les cartes.


Nathalie Fagnan


René Lefebvre

Yves Michaud

Richard Martel

SUMMARY

In the province of Quebec, 25% of the population is using groundwater as a source of potable water. However, this resource of high quality is increasingly threatened by conflicting landuse. During the last 20 years, agricultural and industrial activities have continuously increased the potential for contamination of groundwater, and have deteriorated its quality in certain cases. Groundwater resources therefore require better management and protection which have to be based on a good knowledge of aquifers. However, in Quebec, groundwater resources have rarely been thoroughly characterized. Hydrogeologic mapping of aquifers and characterisation of their vulnerability to contamination is therefore needed in order to protect and preserve this resource.

A pilot project has been initiated in the Portneuf MRC to satisfy the need for information on aquifers and to provide an example of hydrogeologic mapping. This project is jointly conducted by the Québec division of the Geological Survey of Canada (GSC-Québec), the Institut national de recherche scientifique - Géoressources (INRS-Géoressources) and Laval University and is supported by the ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF). This project follows a recent MEF groundwater policy project whose main objective is to protect and preserve groundwater resources. This policy project foresees that groundwater management will be the responsibility of local administration. The methodology developed by our project will serve as a guide for future characterization of groundwater resources.

The objective of this master's project is to carry out hydrogeological mapping of granular and permeable formations in the Portneuf area and to participate in the development of new mapping techniques. The recent developments in the field of geomatics, such as geographical information system (GIS), as well as the rapid upcoming of new software applied to hydrogeology have multiplied the capacities to store, analyse and present groundwater data. Traditional mapping methods must therefore be adapted in order to take the full advantage of these new technologies.

An area of approximately 900 km², including the southern part of the Portneuf MRC, has been chosen for this project. The population is approximately 40 000 people and 85% uses groundwater. This region is of interest because it is representative (1) of the types of aquifers encountered throughout the laurentien piedmont on the north shore of the Saint-Lawrence river, from Charlevoix to the Outaouais, and (2) of the groundwater needs of rural populations

Hydrogeologic mapping has followed four steps: 1) data gathering and compilation, 2) field work to complete the data set, 3) data integration and treatment, and finally, 4) development of map formats and the production of hydrogeological maps. Hydrogeologic mapping has focused on the delimitation and characterisation of aquifers as well as the evaluation of their vulnerability to contamination using the DRASTIC method.

A series of maps describing surficial granular aquifers have been produced. The map of hydrogeological units presents the distribution of surficial deposits according to their aquifer potential. The main aquifers are located in surficial sand and gravel deposits alongside the Sainte-Anne and Jacques-Cartier rivers. The surficial sand and gravel isopach map give an appreciation of aquifer potential in these formations whereas the aquifer map show the limits of each aquifer identified in the study region. The piezometric map of these formations indicates the direction of groundwater flow. The vulnerability map shows that the surficial sand and gravel formations are very vulnerable to contamination.

Hydrogeologic mapping has resulted in the characterisation of the distribution, the use and the vulnerability of sand and gravel aquifers to contamination. These surficial formations are the most extensively used aquifers in the MRC and the most vulnerable to contamination. Furthermore, these aquifers are located in regions where agricultural and urban activities are most important. This observation warrants increased protection and conservation of this groundwater resource. The use of computerized tools in each step of the mapping process has been critical. The benefits are at many levels, such as efficiency of data acquisition, rapidity of treatment, and the facility to update maps. These tools significantly increased data representation formats as well as the amount of information that may be clearly portrayed on a map.

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de recherche René Lefebvre, professeur à l'INRS-Géoressources, pour sa grande disponibilité, ses judicieux conseils et la confiance qu'il m'a porté tout au long de ce projet. Je désire également remercier mon codirecteur de recherche Yves Michaud, de la Commission géologique du Canada, pour son appui inconditionnel et son dynamisme contagieux. Mes remerciements vont aussi à Richard Martel de l'INRS-Géoressources, et Luc Champagne du ministère de l'Environnement de la Faune, pour leurs commentaires constructifs et éclairés lors de la lecture critique du mémoire. Je tiens à souligner l'importance du soutien informatique qu'Éric Boisvert a apporté tout au long de ce projet. Ces précieux conseils et enseignements ainsi que sa grande patience ont été cruciaux pour l'avancement du mémoire et je le remercie grandement. Je remercie également Daniel Paradis, étudiant à l'INRS-Géoressources et Édith Bourque, assistante de recherche à la Commission géologique du Canada, pour les nombreuses discussions qui ont permis de faire avancer les travaux. Toute une équipe de chercheurs et d'étudiants entoure le projet piémont laurentien et j'aimerais sincèrement remercier chacun d'eux pour leur participation, de près ou de loin, à l'accomplissement des travaux. Les nombreuses cartes produites dans le cadre de ce mémoire ont nécessité la collaboration étroite du personnel de la salle à dessin et GIS. Je les remercie de tout coeur pour cette collaboration. J'aimerais souligner l'apport de la MRC de Portneuf, du ministère de l'Environnement et de la Faune (MEF) et du groupe Écorecherche de l'Université Laval dans ce projet. Sans leur coopération pour la transmission de nombreux renseignements, ce projet n'aurait pas pu être mené à bien. Je suis reconnaissante envers la Commission géologique du Canada qui m'a soutenue financièrement lors des travaux de terrain et l'Institut national de recherche scientifique (INRS) pour les bourses d'étude qu'il m'a accordé. Finalement, je remercie Jorge Ortega qui, par son exemple de force et de discipline et par son soutien moral, m'a inspiré le courage de mener à bien ce projet et m'a apporté la confiance nécessaire pour toujours continuer de l'avant.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	v
Summary	vii
Remerciements	ix
Table des matières	xi
Liste des tableaux	xvii
Liste des figures	xix
CHAPITRE 1: <u>INTRODUCTION</u>	1
1.1 <u>Problématique</u>	1
1.2 <u>Objectifs</u>	2
1.3 <u>Méthodologie</u>	3
1.3.1 <u>Compilation des données disponibles</u>	4
1.3.2 <u>Travaux de terrain</u>	7
1.3.3 <u>Intégration et analyse des données</u>	8
1.3.4 <u>Définition des formats de cartes</u>	9
1.4 <u>Structure du mémoire</u>	11
CHAPITRE 2: <u>REVUE DE LITTÉRATURE – PRINCIPES DE BASE D’HYDROGÉOLOGIE</u>	13
2.1 <u>Concepts de base en hydrogéologie</u>	13
2.1.1 <u>Le cycle de l’eau</u>	14
2.1.2 <u>L’écoulement des eaux souterraines</u>	15
2.1.2.1 <u>L’équation de Darcy</u>	15
2.1.2.2 <u>Définition du potentiel hydraulique</u>	17
2.1.3 <u>L’eau souterraine dans les milieux géologiques</u>	21
2.1.3.1 <u>La porosité et la perméabilité</u>	21
2.1.3.2 <u>Le contexte géologique des aquifères</u>	27
2.1.3.3 <u>La stratigraphie</u>	31
2.1.3.4 <u>La structure</u>	35
2.1.4 <u>Modèles mathématiques décrivant l’écoulement en régime permanent</u>	36
2.1.4.1 <u>Modèle de Tóth</u>	37
2.1.4.2 <u>Modèle de Freeze et Witherspoon</u>	40
CHAPITRE 3: <u>DESCRIPTION GÉNÉRALE DE LA MRC DE PORTNEUF</u>	45
3.1 <u>Localisation</u>	45
3.2 <u>Physiographie</u>	48
3.2.1 <u>Basses-Terres du Saint-Laurent</u>	49
3.2.2 <u>Laurentides</u>	49

3.3	<u>Hydrographie</u>	50
3.3.1	Bassin de la rivière Sainte-Anne	51
3.3.2	Bassin du fleuve Saint-Laurent	51
3.3.3	Bassin de la rivière Portneuf	52
3.3.4	Bassin de la rivière Jacques-Cartier	52
3.4	<u>Hydrologie</u>	52
3.5	<u>Géologie</u>	55
3.5.1	Substrat rocheux	56
3.5.2	Sédiments quaternaires	58
3.5.2.1	<i>Sédiments glaciaires: Tills et Moraine de Saint-Narcisse</i>	61
3.5.2.2	<i>Sédiments fluvioglaciaires</i>	62
3.5.2.3	<i>Sédiments marins</i>	63
3.5.2.3.1	<i>Sédiments fins d'eau profonde</i>	63
3.5.2.3.2	<i>Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation</i>	63
3.5.2.3.3	<i>Sédiments deltaïques</i>	64
3.5.2.4	<i>Sédiments du lac Lampsilis</i>	64
3.5.2.5	<i>Sédiments Alluviaux</i>	64
3.5.2.5.1	<i>Alluvions des terrasses fluviales</i>	65
3.5.2.5.2	<i>Alluvions actuelles</i>	65
3.5.2.6	<i>Dépôts organiques</i>	65
3.6	<u>Hydrogéologie</u>	66
3.6.1	Principaux utilisateurs d'eau souterraine	67
3.6.2	Principales formations aquifères	71
3.6.2.1	<i>Aquifères compris dans les roches calcaires</i>	71
3.6.2.2	<i>Aquifères compris dans les sédiments fluvioglaciaires</i>	72
3.6.2.3	<i>Aquifères compris dans les sédiments deltaïques</i>	73
3.6.2.4	<i>Aquifères compris dans les sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation</i>	75
3.6.3	Qualité de l'eau souterraine.....	76
 CHAPITRE 4: <u>CARTOGRAPHIE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MRC DE PORTNEUF</u>		 79
4.1	<u>Cartographie hydrogéologique: principes de base</u>	79
4.1.1	Compilation des données existantes et travaux de terrain: informations de base pour la cartographie hydrogéologique	80
4.1.2	Analyse et traitement des données	82
4.1.3	Production de cartes hydrogéologiques	82

4.1.4 Importance des outils informatiques dans la réalisation des cartes hydrogéologiques	86
4.2 <u>Cartographie hydrogéologique au Québec: rétrospective</u>	87
4.3 <u>Méthodologie pour la MRC de Portneuf</u>	90
4.3.1 Compilation des données disponibles	90
4.3.2 Travaux de terrains.....	101
4.3.3 Intégration des données et outils de traitement des données	101
4.4 <u>Délimitation des aquifères granulaires de surface et leurs propriétés</u>	104
4.4.1 Carte d'épaisseur totale de sédiments	104
4.4.1.1 <i>Méthodologie</i>	105
4.4.1.2 <i>Intégration et traitement des données</i>	108
4.4.1.3 <i>Représentation des résultats</i>	108
4.4.1.4 <i>Portée et limitations des résultats</i>	109
4.4.2 Carte de l'épaisseur de sables et graviers de surface	110
4.4.2.1 <i>Méthodologie</i>	110
4.4.2.2 <i>Traitement des données</i>	113
4.4.2.3 <i>Représentation des résultats</i>	113
4.4.2.4 <i>Portée et limitations des résultats</i>	113
4.4.3 Délimitation des aquifères compris dans les sables et graviers de surface	114
4.4.3.1 <i>Méthodologie</i>	114
4.4.3.2 <i>Représentation des résultats</i>	114
4.4.3.3 <i>Portée et limitations des résultats</i>	115
4.4.4 Carte piézométrique des formations aquifères compris dans les sables et graviers de surface	115
4.4.4.1 <i>Relevés et sources d'information</i>	116
4.4.4.2 <i>Traitement des données</i>	119
4.4.4.3 <i>Représentation des résultats</i>	119
4.4.4.4 <i>Portée et limitations des résultats</i>	121
CHAPITRE 5: <u>VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES DE LA MRC DE PORTNEUF</u>	123
5.1 <u>Problématique</u>	123
5.1.1 Définition des termes	124
5.1.2 Vulnérabilité et processus d'atténuation	126
5.1.3 Paramètres utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. .	127
5.1.3.1 <i>Les sols</i>	128
5.1.3.2 <i>La zone vadose</i>	130
5.1.3.3 <i>La zone aquifère</i>	131

5.1.3.4	<i>La Recharge</i>	132
5.1.4	Paramètres utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité spécifique	132
5.2	<u>Évolution et description des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité</u>	133
5.2.1	Méthodes faisant appel aux techniques cartographiques	134
5.2.2	Méthodes utilisant un système de cotations numériques	136
5.2.2.1	<i>Formation d'un système matriciel</i>	139
5.2.2.2	<i>Addition ou multiplication des valeurs (cotes)</i>	140
5.2.2.3	<i>Multiplication des cotes obtenues pour chaque paramètre à une valeur de pondération: l'exemple DRASTIC</i>	141
5.2.2.3.1	<i>Hypothèses de départ</i>	144
5.2.2.3.2	<i>Paramètres DRASTIC</i>	145
5.2.2.3.4	<i>Représentation de la vulnérabilité</i>	150
5.2.3	Méthodes analytiques et de modélisation numérique.....	151
5.2.4	Limitations des méthodes d'évaluation.....	153
5.2.4.1	<i>Méthodes faisant appel aux techniques cartographiques</i>	153
5.2.4.2	<i>Méthodes utilisant un système de cotations numériques</i>	153
5.2.4.3	<i>Méthodes analytiques et de modélisation numérique</i>	155
5.2.5	Critères pour la sélection de méthodes d'évaluation	156
5.2.6	Principales limitations des cartes de vulnérabilité	158
5.2.7	Contenu des cartes.....	159
5.2.8	Utilisation des cartes de vulnérabilité	160
5.2.9	Compte rendu sur l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec	162
5.3	<u>Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraine à la contamination dans la MRC de Portneuf : traitement des données et résultats</u>	170
5.3.1	Unités hydrogéologiques	170
5.3.2	Paramètres DRASTIC	172
5.3.2.1	<i>Profondeur à la nappe</i>	172
5.3.2.2	<i>Milieu aquifère</i>	174
5.3.2.3	<i>Sols</i>	175
5.3.2.4	<i>Recharge</i>	177
5.3.2.5	<i>Pente du terrain</i>	181
5.3.2.6	<i>Zone vadose</i>	182
5.3.2.7	<i>Conductivité hydraulique</i>	183
5.3.3	Intégration des données et résultats	184
CHAPITRE 6:	<u>DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS</u>	187
6.1	<u>Disponibilité de la ressource</u>	187

6.1.1 Formations aquifères de la MRC de Portneuf	187
6.1.2 Secteurs avec un plus faible potentiel aquifère	188
6.1.3 Formations aquifères potentielles	189
6.2 <u>Vulnérabilité</u>	190
6.3 <u>Intégration et synthèse des informations hydrogéologiques</u>	192
6.4 <u>Utilité des cartes hydrogéologiques pour la gestion de la ressource et du territoire</u>	198
6.5 <u>Pertinence des outils informatiques dans l'accomplissement des travaux de cartographie hydrogéologique</u>	199
6.5.1 Considérations concernant l'utilisation des MNT dans les études hydrogéologiques	200
6.6 <u>Recommandations</u>	204
CHAPITRE 7: <u>CONCLUSION</u>	209
7.1 <u>Synthèse des travaux</u>	209
CHAPITRE 8: <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	211
ANNEXE A: LIMITES MUNICIPALES ET RÉSEAU ROUTIER AU SUD DE LA MRC DE PORTNEUF	221
ANNEXE B: RÉGIONS PHYSIOGRAPHIQUES ET PRINCIPAUX BASSINS HYDROLOGIQUES	223
ANNEXE C: GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX	225
ANNEXE D: GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES	227
ANNEXE E: DONNÉES DE FORAGES DISPONIBLES DANS LA RÉGION D'ÉTUDE	230
ANNEXE F: CARTE DE L'ÉPAISSEUR TOTALE DE SÉDIMENTS	232
ANNEXE G: CARTE DE L'ÉPAISSEUR DE SABLES ET GRAVIERS DE SURFACE	234
ANNEXE H: CARTE DES AQUIFÈRES, RÉGION SUD DE LA MRC DE PORTNEUF	236

ANNEXE I: UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES	238
ANNEXE J: BLOCS DIAGRAMMES	241
ANNEXE K: RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC PROFONDEUR À LA NAPPE	247
ANNEXE L: RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC MILIEU AQUIFÈRE	249
ANNEXE M: RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC TYPES DE SOLS	251
ANNEXE N: CALCUL DE LA RECHARGE: CLASSIFICATION DE LA RÉGION PAR TYPE D'UTILISATION DU SOL	253
ANNEXE O: CALCUL DE LA RECHARGE: CLASSIFICATION DE LA RÉGION PAR TYPES DE SOL	255
ANNEXE P: CALCUL DE LA RECHARGE: CLASSIFICATION DE LA RÉGION EN FONCTION DE LA PENTE DU TERRAIN	257
ANNEXE Q: CALCUL DE LA RECHARGE: COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT	259
ANNEXE R: RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC RECHARGE	261
ANNEXE S: RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC TOPOGRAPHIE	263
ANNEXE T: RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC ZONE VADOSE	265
ANNEXE U: RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE	267
ANNEXE V: ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES À LA CONTAMINATION À L'AIDE DE LA MÉTHODE DRASTIC: RÉSULTATS BRUTS	269
ANNEXE W: CARTE DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES À LA CONTAMINATION, MÉTHODE DRASTIC	271
POCHETTE 1: CARTE PIÉZOMÉTRIQUE	273
POCHETTE 2: CARTE SYNTHÈSE : VULNÉRABILITÉ ET UTILISATION DU SOL	275

LISTE DES TABLEAUX

2.1: Valeurs de la porosité pour divers types de roches et de sédiments (modifiée de Freeze et Cherry, 1979).....	26
3.1: Municipalités utilisant les eaux souterraines comme source d'eau potable.....	71
4.1: Principaux paramètres physiques et chimiques utilisés pour la caractérisation de la ressource en eaux souterraines (Struckmeier et Margat, 1995)	83
4.2: Classification des cartes hydrogéologiques en fonction du niveau d'information qu'elles contiennent et de l'utilisation possible qu'on peut en faire (modifié de Vrba et Zaporozec, 1994).....	84
4.3: Types et sources des données qui ont été compilées pour la cartographie hydrogéologique dans la MRC de Portneuf.....	102
5.1: Liste des divers processus naturels ayant un impact sur l'atténuation des contaminants (modifié de Vrba et Zaporozec, 1994).....	127
5.2: Principaux paramètres et facteurs utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (tiré et modifié de Vrba et Zaporozec, 1994).	128
5.3: Système matriciel utilisé en Angleterre pour la classification des eaux souterraines en fonction de leur vulnérabilité (tiré de Vrba et Zaporozec, 1994).....	139
5.4: Classification de six types d'aquifères avec leurs cotes correspondantes (tiré de Aubre, 1992).....	140
5.5: Classification de sept types de matériaux aquifères (tiré de Aubre, 1992).....	140
5.6: Classification de la profondeur à la nappe à l'intérieur de sept classes (tiré de Aubre, 1992)	140
5.7: Classification des indices de vulnérabilité en différentes catégories de vulnérabilité (tiré de Aubre, 1992).	141
5.8: Profondeur de la nappe (tiré de Aller <i>et al.</i> , 1987)	146
5.9: Recharge nette (tiré de Aller <i>et al.</i> , 1987).....	146
5.10: Matériau de l'aquifère (tiré de Aller <i>et al.</i> , 1987).....	147

5.11: Matériau du sol (tiré de <i>Aller et al</i> , 1987).....	148
5.12: Pente du terrain (tiré de <i>Aller et al</i> , 1987)	148
5.13: Matériau de la zone non-saturée (tiré de <i>Aller et al</i> , 1987)	149
5.14: Conductivité hydraulique de l'aquifère (tiré de <i>Aller et al</i> , 1987).....	150
5.15: Indices de vulnérabilité associés à une charte de couleur exprimant le degré de vulnérabilité (tiré de <i>Aller et al</i> , 1987).....	150
5.16: Coefficients de ruissellement pour différentes combinaisons de sols, de l'utilisation du sol, de la pente du terrain et des conditions hydrologiques prévalant avant un événement pluvieux (Tiré et adapté de <i>Monfet</i> , 1979)	180

LISTE DES FIGURES

1.1: Plan de localisation de la MRC de Portneuf	3
1.2: Représentation schématique de la démarche employée pour la cartographie hydrogéologique dans la MRC de Portneuf.....	5
2.1: Exemple schématique des paramètres interagissant à l'intérieur du système hydrogéologique et leurs impacts sur la distribution finale de l'eau souterraine (modifiée de Wei, 1996).....	13
2.2: Illustration du montage qui permet de dériver la loi empirique caractérisant l'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux (modifiée de Freeze et Cherry, 1979).....	16
2.3: Modèle conceptuel de l'écoulement dans un milieu homogène et isotrope développé par Hubert (modifiée de Fetter, 1994)	20
2.4: Valeurs typiques de la perméabilité pour les aquifères dans les dépôts non-consolidés et consolidés (modifiée et adaptée de Driscoll, 1986)	26
2.5: a) développement d'une zone hautement perméable le long de l'axe d'un pli anticlinal, b) développement de zones de dissolution se faisant préférentiellement le long du litage qui intersectent des zones de fracturation (modifiée de Freeze et Cherry, 1979).....	28
2.6: Bloc diagramme d'un dépôt alluvial formé par des rivières à méandres (modifiée de Freeze et Cherry, 1979)	29
2.7: Agrandissement d'un environnement formé par des rivières à méandres montrant la distribution de l'eau souterraine (modifiée de Skinner et Porter, 1989).....	30
2.8: Divers environnements de sédimentation glaciaires ainsi que les profils typiques de faciès développés lors d'une phase d'avancée et de retrait glaciaire (modifiée de Walker et James, 1992)	33
2.9: Exemple d'une séquence stratigraphique pouvant être rencontrée dans les régions qui ont été affectées par plusieurs épisodes de glaciation, tels qu'on en retrouve en Amérique du Nord (modifiée de Freeze et Cherry, 1979).....	34
2.10: Exemple de l'influence des facteurs structuraux sur la répartition des aquifères dans les systèmes géologiques (tirée de Freeze et Cherry, 1979)	36

2.11: Émergence de différents systèmes d'écoulement dans un bassin en fonction de la présence et de l'importance des paramètres suivants: relief et pente de la nappe, géométrie du bassin (modifiée de Tóth, 1963).....	38
2.12: Effet de la topographie et de la pente du bassin de drainage sur le régime d'écoulement dans un bassin dont la profondeur est de beaucoup inférieure à sa longueur (modifiée de Tóth, 1963).....	39
2.13: Divers patrons d'écoulement régionaux causés par les contrastes de perméabilités entre couches adjacentes (tirée et modifiée de Freeze et Witherspoon, 1967).....	41
2.14: a ,b: Variation de l'écoulement régional en fonction du pendage d'une couche de forte perméabilité comprise entre deux couches aquitards (tirée et modifiée de Freeze et Witherspoon, 1967)	42
3.1: Limites de la région d'étude et principaux accès routiers.....	46
3.2: Municipalités composant la MRC de Portneuf.....	47
3.3: Régions physiographiques présentes dans la MRC de Portneuf.....	48
3.4: Bassins hydrologiques présents dans la région d'étude	50
3.5: Localisation des stations météorologiques dans la région d'étude	54
3.6: Données climatiques moyennes pour la région d'étude	55
3.7: Géologie du socle rocheux (adaptée de Clark et Globensky, (1973, 1975)).....	57
3.8: Représentation schématique des principales étapes de déglaciation de 10 800 BP à aujourd'hui (Parent, données inédites).....	59
3.9: Architecture actuelle des sédiments quaternaires dans la région de Portneuf (Parent <i>et al</i> , 1997).....	63
3.10: Sources municipales d'approvisionnement en eau	70
4.1: Localisation des données de forages qui ont atteint le roc.....	106
4.2: Localisation des affleurements rocheux.....	106
4.3: Zones de roc affleurant et de till mince.....	107

4.4 : Localisation des données de profondeurs minimales au roc	107
4.5: Données de forages contenant des valeurs d'épaisseurs totales de sables et graviers	111
4.6: Données de forages contenant des valeurs d'épaisseurs minimales de sables et graviers	112
4.7: Zones exemptes d'unités de sables et graviers en surface	112
4.8: Relevés de terrain: localisation des mesures de niveau d'eau	117
4.9: Données de niveaux d'eau provenant de la base de données	117
4.10: Points de contrôle de l'altitude de la nappe ajoutés le long des rivières principales	118
5.1: Interrelation entre l'échelle de la carte (E), la densité de données (DD), et la quantité d'information fiable pour chaque point (QIF) dans la sélection d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité. (Tiré de Vrba et Zaporozec, 1994)	158
5.2: Illustration de comment se fait l'évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée	178
5.3: Intégration des données : étapes menant à la carte finale DRASTIC	185
6.1: Disposition des cartes hydrogéologiques sur la planche hydrostratigraphie et piézométrie des aquifères granulaires de surface	194
6.2: Disposition des cartes hydrogéologiques sur la planche vulnérabilité à la contamination et périmètres de protection	195
6.3: Exemple de l'imprécision des MNT et de son impact sur les paramètres hydrogéologiques dérivés	203

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Problématique

Au Québec, 25 % de la population utilise l'eau souterraine comme source d'approvisionnement en eau potable (MEF, 1996). Cette ressource est généralement de bonne qualité et peu coûteuse, mais elle est de plus en plus sujette à des conflits d'usage. En effet, au cours des 20 dernières années, les activités agricoles et industrielles ont contribué à augmenter le potentiel de contamination des eaux souterraines, et, dans certains cas, à la détérioration de sa qualité (Crow et Milburn, 1995; MEF, 1989; Banton *et al.*, 1989; Paradis *et al.*, 1991; Giroux, 1993; Beak Consultants Ltd., 1986). La ressource en eau souterraine doit donc être mieux gérée et protégée. Pour ce faire, il est essentiel d'avoir une bonne connaissance des formations aquifères à débiter par des travaux d'inventaire et de caractérisation de la ressource. Or, au Québec, la ressource en eau souterraine a bénéficié que d'une seule vague de travaux de cartographie dans les années 70 par le ministère de l'Environnement du Québec de l'époque. La cartographie hydrogéologique et l'évaluation de la vulnérabilité à la contamination des aquifères sont donc nécessaires pour permettre la protection (qualité) et la conservation (quantité) de la ressource.

Pour palier à ce manque de connaissances et fournir un exemple de cartographie hydrogéologique, un projet-pilote de cartographie hydrogéologique régionale a été initié sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent dans la MRC de Portneuf (figure 1.1). Ce projet est réalisé conjointement par la CGC-Québec¹, l'INRS-Géoressources², le MEF³ et l'Université Laval. Ce projet s'inscrit dans le cadre du projet de politique du MEF visant la protection et la conservation des eaux souterraines et l'inclusion de la gestion de la ressource dans le schéma d'aménagement des MRC. La méthodologie de cartographie employée lors du projet-pilote servira de guide pour les travaux futurs de caractérisation de la ressource. Le projet s'attardera

1 : CGC-Québec : Commission géologique du Canada – bureau régional de Québec

2 : INRS-Géoressources : Institut nationale de recherche scientifique-Géoressources.

3 : MEF : ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec.

aussi au développement de nouvelles techniques de cartographie informatisée. Les récents progrès dans le domaine de la géomatique, tels les SIG (système d'information géographique), ainsi que l'apparition de nombreux logiciels appliqués à l'hydrogéologie ont multiplié les capacités d'entreposage, de traitement et de représentation des données. Les méthodes cartographiques traditionnelles doivent donc être adaptées afin de tirer profit de ces nouvelles technologies.

Le choix de la MRC est basé sur le fait qu'elle est située dans une région exposant un bel exemple des aquifères du piémont laurentien qui constituent la source d'approvisionnement en eaux souterraines la plus importante sur la rive Nord du fleuve Saint-Laurent, de l'Outaouais à la région de Québec. De plus, la présence de zones urbaines, agricoles et forestières est représentative de l'utilisation du territoire qui se fait dans toutes les régions des Basses-Terres du Saint-Laurent. Enfin, 85 % de la population de la MRC s'approvisionne à partir des eaux souterraines pour satisfaire à ses besoins en eau potable.

1.2 Objectifs

Les objectifs de ce mémoire sont :

- 1) d'élaborer une démarche à suivre pour la cartographie de la ressource en eaux souterraines et de proposer des formats de cartes hydrogéologiques de manière à ce qu'elles soient utiles pour la gestion du territoire et de la ressource en eau souterraine.

L'application de cette méthodologie de cartographie hydrogéologique à la MRC de Portneuf permettra d'atteindre les objectifs spécifiques du mémoire qui sont :

- 2) d'identifier et caractériser les formations aquifères présentes dans la MRC de Portneuf.
- 3) et d'évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination.

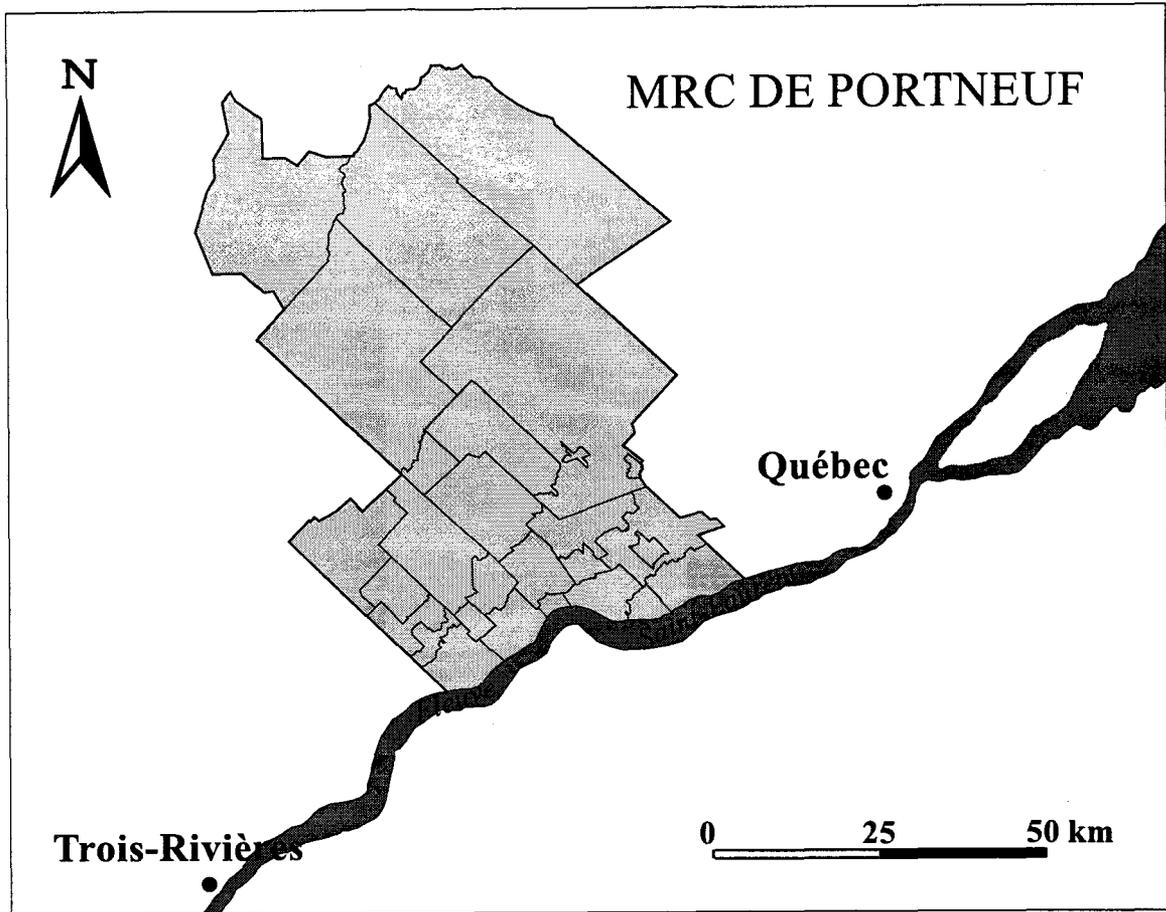


Figure 1.1: Plan de localisation de la MRC de Portneuf

1.3 Méthodologie

La cartographie hydrogéologique comprend toutes les activités et techniques appropriées pour recueillir, interpréter et représenter l'information hydrogéologique sous forme graphique (Struckmeier et Margat, 1995). Elle témoigne de son caractère transitoire entre les sciences de la terre et de l'eau par la variété des paramètres qu'elle fait intervenir de ces deux sphères d'activité. Entre autres, les informations requises pour une bonne caractérisation hydrogéologique comprennent : les données climatiques, les cartes de la topographie et du réseau de drainage, les types de sols, les cartes de la géologie du socle et des dépôts quaternaires, des descriptions de forages permettant de comprendre la configuration en profondeur de ces formations géologiques ainsi que des données sur les propriétés

hydrauliques des formations aquifères telles que la conductivité hydraulique, la transmissivité et les coefficients d'emmagasinement. Comme on peut le constater, les informations pertinentes à la réalisation de la cartographie hydrogéologique sont nombreuses. De plus, afin de bien gérer et protéger la ressource en eau souterraine, les informations concernant les activités humaines pouvant avoir un impact sur la quantité et la qualité de la ressource doivent aussi être considérées. Ces informations comprennent : la localisation des systèmes de captages d'eau souterraine, les types d'utilisation du sol (agricole/forestière/urbaine), les pratiques agricoles (utilisation de fertilisants chimiques et naturels, application d'herbicides, rotation des cultures, etc.), la localisation des principaux corridors de transport électrique et routier ainsi que l'identification des divers sites d'entreposage et d'enfouissement de déchets.

La cueillette des informations hydrogéologique constitue donc une partie prépondérante des travaux de cartographie et les travaux effectués dans la région de Portneuf n'ont pas dérogé à cette règle. Plus précisément, les travaux de cartographie hydrogéologique dans la MRC de Portneuf ont compris : (1) la compilation des données disponibles, (2) les travaux de terrains nécessaires pour obtenir les informations complémentaires ou manquantes, (3) l'intégration et l'analyse de ces données, et finalement, (4) la production de cartes hydrogéologiques. Les pages suivantes décrivent de façon plus détaillée ces diverses étapes et la figure 1.2 présente un résumé graphique de celles-ci.

1.3.1 Compilation des données disponibles

La compilation des données constitue une étape cruciale de la cartographie hydrogéologique car c'est en grande partie de celle-ci que dépendra la qualité et la précision des cartes qui seront produites. Les principales catégories de données qui ont été utilisées pour la cartographie hydrogéologique de la MRC de Portneuf et les divers paramètres hydrogéologiques qu'elles contiennent sont:

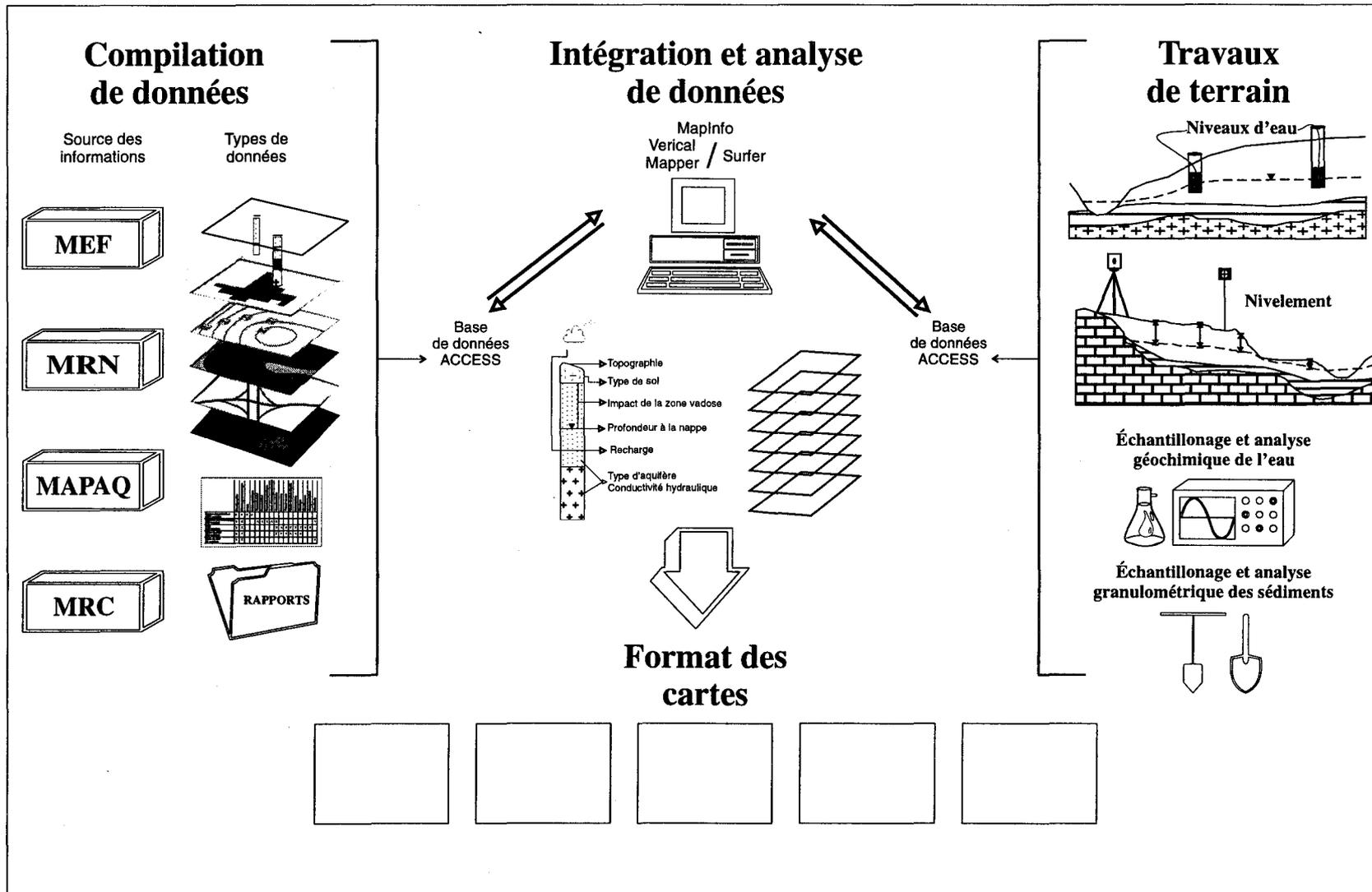


Figure 1.2: Représentation schématique de la démarche employée pour la cartographie hydrogéologique dans la MRC de Portneuf.

1) Les cartes topographiques sur lesquelles sont identifiés le réseau hydrographique, la couverture végétale et la topographie. Ces cartes permettent d'identifier de façon préliminaire la localisation des zones de recharge et d'émergence. Aussi, l'observation de la densité et la forme du réseau de drainage donne des indications sur les conditions géologiques sous-jacentes. Celles-ci représentent des informations pertinentes pour la caractérisation de l'infiltration et les limites des bassins versants.

2) Les cartes géologiques des formations superficielles et du socle rocheux permettent de déduire la géométrie et l'étendue des diverses formations aquifères et aquitards ainsi que le type de limites hydrauliques qui les séparent.

3) Les rapports géotechniques, hydrogéologiques et de caractérisation des sols et des eaux souterraines contaminées constituent les sources privilégiées pour l'obtention de paramètres tels que la conductivité hydraulique, la porosité, la granulométrie et pour connaître les séquences stratigraphiques qui caractérisent une région.

4) Les données météorologiques et hydrologiques. Les informations météorologiques fournissent les paramètres essentiels pour l'établissement du bilan hydrologique.

5) Les cartes pédologiques apportent des précisions sur les paramètres physiques contrôlant l'infiltration.

6) Utilisation du sol. Ces cartes fournissent les informations sur les prises d'eau municipales et réseaux d'aqueducs, l'étendue des zones urbaines, forestières et agricoles ainsi que la localisation des sites de dispositions de déchets.

1.3.2 Travaux de terrain

Malgré l'abondance des sources d'information et la quantité de données qu'elles contiennent, certaines informations sont manquantes et doivent donc être récoltées sur le terrain pour pouvoir bien exécuter les travaux de cartographie hydrogéologique. Dans le cas de la MRC de Portneuf, des nouvelles informations ont dû être recueillies afin de raffiner les interprétations géologiques et d'ajouter des données sur les niveaux d'eau dans les aquifères granulaires de surface, les propriétés hydrauliques de ces formations et sur l'utilisation de la ressource.

Des travaux de terrains ont donc été entrepris durant les étés 1995 et 1996. Les travaux de reconnaissance se sont principalement déroulés durant la période de l'été 1995. Alors que les travaux de terrain de l'été 1996 ont porté sur la cueillette de données manquantes. L'information qui a été recueillie à ce moment comprend des mesures de niveaux d'eau et des prises d'échantillons dans les matériaux granulaires de surface pour déterminer la granulométrie et conséquemment la perméabilité de ces matériaux. Au total, 226 mesures de niveaux d'eau ont été prises à l'aide d'une sonde à niveaux d'eau. Les endroits où ont été effectuées ces mesures sont : dans les puits de particuliers, dans des puits abandonnés, dans les piézomètres installés par le MEF, dans les trous effectués à la tarière manuelle en bordure des fossés et dans les champs, dans les sablières et fossés où la nappe d'eau affleurerait ainsi que le long de rivières et ruisseaux. Tous les points de mesures ont été par la suite nivelés par rapport au niveau de la mer à l'aide d'une station totale. De plus, une campagne d'échantillonnage géochimique de l'eau souterraine a été entreprise par la Commission géologique du Canada (Bourque, 1996). Les résultats de cette étude seront considérés très brièvement dans ce mémoire.

1.3.3 Intégration et analyse des données

Toutes les informations recueillies qui étaient contenues sous format informatique ont été transférées dans une base de données préliminaire sous EXCEL v.4.0 (Microsoft Corporation, 1992). Les informations se présentant sous format papier tels que les rapports hydrogéologiques et les nombreuses cartes thématiques ont été soit saisies dans la base de données EXCEL ou numérisées à l'aide d'AutoCAD v.11 (Bockemulh, 1992) et/ou de MapInfo v.4.1 (MapInfo, 1995). Par la suite, un processus d'uniformisation des données a été nécessaire pour que toutes les informations de quelques origines qu'elles soient puissent être exprimées avec la même nomenclature (Lepage, 1996). Une fois cette étape complétée, les informations ont été transférées dans le logiciel de bases de données ACCESS v.2.0 (Microsoft Corporation, 1994) qui est plus approprié pour la gestion efficace des données.

À l'aide des informations contenues dans cette base de données, il a été possible de procéder à l'analyse des données. Les logiciels MapInfo v.4.1 (MapInfo Corporation, 1995) et Vertical Mapper v.1.0⁴ (Northwood Geoscience, 1995) se sont avérés être des outils clefs dans l'accomplissement de ce travail. Les deux logiciels combinés à ACCESS forment un SIG⁵ où la gestion des informations hydrogéologiques et la production de cartes thématiques sont de beaucoup facilitées. Ce système permet, entre autres, la visualisation simultanée de plusieurs couches d'information et de procéder à l'analyse de celles-ci à l'écran. Ceci est accompli, par exemple, en effectuant des coupes transversales sur lesquelles sont reportés les forages, accompagnés de leur description stratigraphique et des niveaux d'eau, en relation avec la topographie. Ces coupes permettent de délimiter l'étendue en profondeur des diverses unités hydrogéologiques et de graduellement construire un modèle conceptuel des systèmes

4: Vertical Mapper est un logiciel de contour qui a été tout spécialement développé pour être exécuter dans MapInfo.

5 : SIG: pour Système d'Information Géographique. Un regroupement organisé de matériels informatiques, logiciels, données géographiques et un personnel désigné pour saisir, entreposer, mettre à jour, manipulé, analyser et représenter graphiquement toutes formes de données géoréférencées. (ESRI (1995), 3nd édition).

aquifères présents. L'informatisation de ces étapes d'analyse constitue un avantage indéniable pour le traitement efficace des données.

Ce système a aussi été utilisé pour compiler et traiter la grande majorité des informations menant à la carte de vulnérabilité. En effet, un SIG semblait être l'outil tout approprié pour l'accomplissement de cette tâche étant donné que la méthode DRASTIC, qui est utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité, requiert la manipulation de plusieurs couches d'information spatiales sur lesquelles doivent être effectuées diverses opérations mathématiques. La plupart des étapes de la cartographie de la vulnérabilité (traitement des données de base pour chacun des paramètres, préparation des fichiers etc.) a été réalisée dans MapInfo à l'exception de la compilation finale de la carte de vulnérabilité qui a été effectuée à l'aide du logiciel IDRISI (Eastman, 1997). La transformation nécessaire des données vectorielles, qui est la forme la plus commune sous laquelle se trouvent les informations, sous format «*raster*», pour effectuer ces opérations, a nécessité l'utilisation de ce logiciel étant donné qu'il est spécifiquement conçu pour exécuter ce genre d'opérations.

Finalement, quelques informations hydrogéologiques telles que les cartes de contours des épaisseurs de sable et de la profondeur au roc n'ont pu être produites à l'aide de Vertical Mapper étant donné que l'option de modélisation statistique par krigeage, requis par les données, n'était pas disponible. Pour ce faire, le logiciel SURFER v.6.0 (Golden Software, 1994) a été utilisé et les résultats obtenus ont pu être réintégrés dans MapInfo pour la mise en carte.

1.3.4 Définition des formats de cartes

Les cartes hydrogéologiques constituent le produit final de la démarche utilisée pour la cartographie hydrogéologique. L'AIH (l'Association Internationale des Hydrogéologues)

(Struckmeier et Margat, 1995), dans une de leur récente publication, propose diverses approches pour la construction de cartes hydrogéologiques. Les suggestions proposées sont le fruit d'une longue réflexion en hydrogéologie ainsi que de la synthèse des divers types de cartes couramment produites en hydrogéologie. Étant donné qu'il n'existe pas à ce jour de modèle standardisé pour les cartes hydrogéologiques, nous pensons qu'il est approprié d'utiliser cette référence comme base de départ pour la conception de nos cartes hydrogéologiques. En plus de l'utilisation de ce guide, une recherche bibliographique a été effectuée pour identifier d'autres méthodes standards concernant la cartographie hydrogéologique et la mise en carte de ces informations. De plus, certains rapports et publications portant sur des projets hydrogéologiques menés par la Commission géologique du Canada dans les régions de Toronto (Oak Ridges) (Sharpe *et al.*, 1996; Russel *et al.*, 1996) et ceux commandés par les instances de la Province de la Colombie-Britannique (Piteau et Turner, 1993) ont été compilés. Les diverses banques bibliographiques disponibles sur disques optiques compacts (CD-ROM) dans les centres de documentations de l'INRS-Géoresources et de l'INRS-Eau ont été interrogées. Ces banques contiennent la plupart des répertoires bibliographiques des revues scientifiques importantes ayant trait à l'hydrogéologie. Finalement, plusieurs documents sous forme d'articles ou de dossiers publics concernant la cartographie hydrogéologique et les méthodes couramment utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité ont été récupérés par les voies de l'Internet.

1.4 Structure du mémoire

À part l'introduction, le présent mémoire se divise en cinq chapitres. Étant donné qu'une part de l'audience à qui s'adresse ce mémoire est formée de non-spécialiste en hydrogéologie, une attention spéciale a été accordée à l'introduction et l'explication des concepts de base de l'hydrogéologie. Cette introduction se trouve au chapitre 2 et a pour objectif d'aider à la compréhension des nombreux concepts qui sont inclus à la cartographie

hydrogéologique et à l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la contamination. Aussi, il permettra de familiariser le lecteur avec la terminologie employée dans le mémoire. Les quelques exemples de types d'aquifères qui sont présentés ont été choisis en fonction de leur présence dans la MRC de Portneuf. Le chapitre 3 présente une description physique de la région à l'étude, en mettant l'accent sur les caractéristiques hydrogéologiques qui la distinguent. Le chapitre 4 introduit les concepts de la cartographie hydrogéologique, présente la méthodologie qui a été suivie ainsi que les résultats de la caractérisation hydrogéologique de la MRC de Portneuf. Le chapitre 5 présente les concepts sur lesquels se fonde le principe de la vulnérabilité et la méthode DRASTIC. On retrouve ensuite les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination à l'aide de la méthode DRASTIC et on discute des procédures utilisées pour dériver et évaluer chacun des paramètres. Le chapitre 6 présente les conclusions du mémoire.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE – PRINCIPES DE BASE D’HYDROGÉOLOGIE

2.1 Concepts de base en hydrogéologie

L’occurrence et la distribution des eaux souterraines n’est pas l’effet du hasard mais bien la conséquence de la combinaison de facteurs climatiques, hydrologiques, géologiques et topographiques qui, ensemble, forment un système dynamique et complexe où circulent les eaux souterraines (Piteau et Turner, 1993). La caractérisation de chacun de ces facteurs et la connaissance des relations qui les unissent sont la clef pour la compréhension des systèmes hydrogéologiques.

La figure 2.1 illustre bien la variété de paramètres qui interagissent à l’intérieur du système hydrogéologique et leurs impacts sur la distribution finale de l’eau souterraine. De ces paramètres, on peut faire ressortir les trois composantes suivantes : (1) le cycle hydrologique de l’eau ; (2) les lois de la physique qui régissent l’écoulement des eaux souterraines à travers ces formations géologiques ; et (3) les unités géologiques servant de contenant aux eaux souterraines, c’est-à-dire celles pouvant transmettre des quantités d’eau appréciables (aquifères) et celles qui limitent leur écoulement (aquitards). Les pages suivantes décrivent de façon plus détaillée chacune de ces composantes.

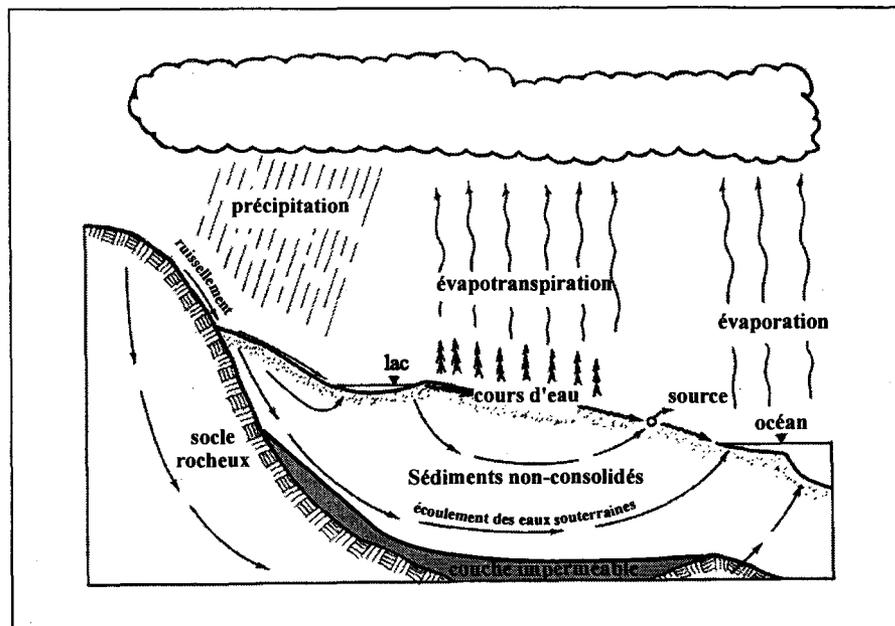


Figure 2.1: Exemple schématique des paramètres interagissant à l’intérieur du système hydrogéologique et leurs impacts sur la distribution finale de l’eau souterraine (modifiée de Wei, 1996).

2.1.1 Le cycle de l'eau

Le terme cycle de l'eau est utilisé pour décrire le mouvement constant de l'eau au-dessus, sur et en-dessous de la surface de la terre (Piteau et Turner, 1993). Il illustre bien que l'eau emmagasinée dans les matériaux géologiques fait partie intégrante d'un système hydrologique beaucoup plus grand dont les composantes sont dépendantes les unes des autres. Ce concept est essentiel à la compréhension de l'occurrence de l'eau souterraine, à son exploitation ainsi qu'à sa gestion et protection (Piteau et Turner, 1993).

Étant donné que le cycle de l'eau n'a ni début ni fin, la description de son fonctionnement peut être abordée à partir de l'une ou l'autre de ses composantes. L'un des états sous lequel l'eau à la surface de la terre peut se trouver est la vapeur. Cette vapeur provient de l'évaporation de l'eau présente au niveau du couvert végétal, à la surface de la terre et dans les océans (Freeze et Cherry, 1979). Celle-ci forme des nuages qui éventuellement retournent l'eau à la surface de la terre sous forme de précipitation (neige, pluie, rosée, verglas, brouillard, etc.). L'eau qui atteint le sol durant les précipitations ou lors de la fonte des neiges peut suivre plusieurs voies, entre autres, elle peut être évaporée de nouveau, s'infiltrer dans le sol ou ruisseler à la surface de celui-ci. La quantité d'eau qui peut s'infiltrer dépend de nombreux facteurs dont le type de sols et l'utilisation que l'on en fait (forestier, agricole ou urbain). Par exemple, un sol mature forestier possède une capacité d'infiltration pouvant aller jusqu'à 25 millimètres d'eau par heure (Piteau et Turner, 1993). En contraste, un sol agricole composé de silt aura des capacités d'infiltration 25 fois moindres (Piteau et Turner, 1993). L'eau initialement infiltrée n'est pas immédiatement disponible pour la recharge des eaux souterraines. Celle-ci doit initialement combler les besoins en eau des plantes et l'humidité du sol, et c'est seulement par la suite que les quantités excédantes d'eau pourront percoler vers la zone saturée. Le mouvement de l'eau dans cette zone est régi par la présence de gradients hydrauliques qui induisent l'écoulement latéral et vertical de l'eau souterraine vers les zones d'émergence telles que les flancs de collines, les lacs et les rivières (Piteau et Turner, 1993). Pour sa part, le ruissellement de l'eau à la surface du sol a lieu lorsque les taux de précipitation excèdent ceux d'infiltration. Cette eau qui ruisselle s'achemine éventuellement vers les cours d'eau qui ultimement vont se jeter dans les océans.

Le potentiel de recharge d'une région dépend donc de plusieurs facteurs, soient ; de la quantité et de la répartition des précipitations annuelles, du potentiel d'évapotranspiration, des arrivées d'eau provenant de régions adjacentes ainsi que du type de sols (Piteau et Turner, 1993). La caractérisation de la recharge fait partie intégrante des études hydrogéologiques dont le mandat est la recherche en eau potable. En effet, l'évaluation de la recharge constitue une étape cruciale de ces études étant donné qu'elle permet de déterminer les quantités d'eau qui peuvent être effectivement disponibles et extraites du sous-sol géologique sans que cela affecte la ressource (e.g. assèchement de la nappe).

2.1.2 L'écoulement des eaux souterraines

Avant de voir les facteurs qui affectent la nature et l'occurrence des formations aquifères et aquitards dans les systèmes géologiques, il est important avant tout de considérer les mécanismes responsables de l'écoulement des eaux souterraines à l'intérieur de ces formations. Les implications d'une bonne connaissance de l'écoulement régional des eaux souterraines sont nombreuses. Qu'il s'agisse de planification de campagnes d'échantillonnage, de conception d'ouvrage de captage, de résolution de problème de contamination ou d'études portant sur les calculs de débits et de bilan hydrologique, une bonne caractérisation de l'écoulement à l'échelle régionale constitue un des préalables aux succès de ces opérations. Dans les pages suivantes, nous allons décrire de façon quantitative les mécanismes régissant l'écoulement des eaux souterraines en régime permanent dans les formations géologiques.

2.1.2.1 L'équation de Darcy

L'expression quantitative qui décrit l'écoulement de l'eau à travers un médium poreux est l'équation de Darcy et se définit comme suit (Freeze et Cherry, 1979) :

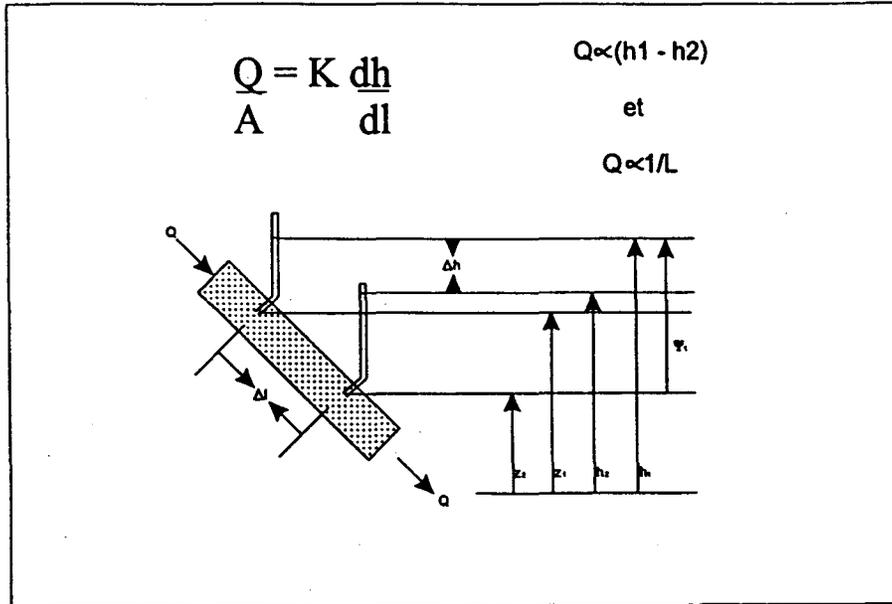


Figure 2.2: Illustration du montage qui permet de dériver la loi empirique caractérisant l'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux (modifiée de Freeze et Cherry, 1979).

Cette équation fut dérivée de façon empirique et démontre que le débit d'un fluide (Q) à travers une section d'un cylindre (A), rempli de matériel granulaire, est proportionnel à la différence de la hauteur d'eau mesurée dans les tubes qui sont situés aux extrémités de la colonne, et inversement proportionnel à la longueur de la section lorsque la différence de la hauteur d'eau dans les tubes est maintenue constante (figure 2.2) (Freeze et Cherry, 1979). La constante de proportionnalité K , nommée conductivité hydraulique, est introduite dans l'équation pour tenir compte du fait que le débit à travers la colonne varie aussi en fonction du matériel géologique ainsi que des propriétés du fluide.

L'équation qui est basée sur un modèle de milieux poreux et qui décrit la conductivité hydraulique est la suivante (Freeze et Cherry, 1979):

$$K = \frac{(Cd^2) (\rho g)}{\mu} \quad (2.1)$$

où le premier terme (Cd^2) représente la perméabilité du milieu poreux et le deuxième ($\rho g/\mu$) renferme les propriétés du fluide, qui sont sa densité et sa viscosité (Freeze et Cherry, 1979). Ainsi, pour un même fluide, la conductivité hydraulique sera plus grande pour des matériaux

grossiers et poreux dont les pores sont interconnectés, que pour des matériaux fins et mal triés dont les pores sont isolés les uns des autres (Freeze et Cherry, 1979). À l'inverse, l'écoulement d'un liquide visqueux, tel que du pétrole lourd, à travers une formation granulaire se fera beaucoup plus lentement que l'eau. La conductivité hydraulique peut donc être vue comme la perméabilité d'un matériel exprimée en fonction des propriétés du liquide qui le traverse.

2.1.2.2 Définition du potentiel hydraulique

La relation mathématique telle que dérivée empiriquement par Darcy est un outil puissant pour la compréhension et la résolution de problèmes reliés à l'écoulement des fluides dans les matériaux granulaires, mais elle ne détaille pas les principes physiques qui la sous-tendent. La compréhension de l'écoulement à partir des principes physiques est essentielle pour la compréhension globale des systèmes d'écoulement en milieux naturels. De nombreuses tentatives ont été réalisées pour traduire la loi de Darcy en terme de loi physique (Freeze et Cherry, 1979), mais ce n'est qu'en 1940 que la première description mathématique rigoureuse des lois physiques régissant l'écoulement régional en régime permanent fut énoncée (Freeze et Witherspoon, 1966). Cette description est fondée sur le fait que tout processus physique impliquant des flux doit nécessairement être régi par un gradient de potentiel, et par conséquent, il doit exister un potentiel hydraulique à partir duquel l'écoulement de l'eau souterraine à travers les formations géologiques poreuses est régi (Freeze et Cherry, 1979). La description de ce potentiel hydraulique fut fournie par Hubert (1940) et se compose de trois termes qui expriment le travail effectué durant le processus d'écoulement des fluides à travers les formations granulaires aux pressions atmosphériques (Freeze et Cherry, 1979). Voici en détail les expressions mathématiques décrivant chacun de ces termes et dont la somme représente le potentiel hydraulique Φ :

$$gz + \frac{v^2}{2} + \int_{P_0}^P \frac{dP}{\rho} = \Phi \quad (2.2)$$

énergie
énergie
énergie
potentielle
cinétique
élastique

où g est l'accélération gravitationnelle, P est la pression à n'importe quel point dans le système, P_0 est la pression atmosphérique, v est la vitesse du fluide, z est l'élévation du fluide au point P et ρ est la densité du fluide.

Le premier terme représente le travail requis pour mener la masse de fluide de l'élévation $z = 0$ à z et correspond à l'énergie potentielle. Le second terme est le travail nécessaire pour accélérer le fluide de la vitesse $v = 0$ à v et correspond à l'énergie cinétique. Finalement, le dernier terme représente le travail nécessaire pour mener un fluide d'une pression $P = 0$ à P et constitue l'énergie élastique.

Étant donné que les vitesses d'écoulement dans les milieux poreux sont très faibles, le terme relié à l'énergie cinétique peut être négligé. L'équation du potentiel devient donc (Freeze et Cherry, 1979) :

$$\Phi = gz + \int_{P_0}^P \frac{dP}{\rho} \quad (2.3)$$

Cette équation définit donc le potentiel hydraulique, en tout point d'un système d'écoulement, comme étant la somme de l'énergie potentielle et élastique de l'eau (Hubert, 1940).

La correspondance entre la charge hydraulique définie empiriquement par Darcy et le potentiel tel que décrit par Hubert peut être démontrée de la façon suivante (Freeze et Cherry, 1979) :

1) la pression au point P de l'un des manomètres de la colonne utilisée par Darcy est donnée par :

$$P = \rho g \Psi + P_0 \quad (2.4)$$

où Ψ est la hauteur de la colonne et P_o est la pression atmosphérique. Cette expression peut être exprimée en fonction de la charge hydraulique de la manière suivante:

$$P = \rho g (h - z) + P_o \quad (2.5)$$

étant donné que $\Psi = (h - z)$.

Lorsqu'on substitue cette dernière expression dans l'équation du potentiel définie par Hubert, on obtient la relation suivante :

$$\Phi = gz + \frac{[\rho g(h - z) + P_o] - P_o}{\rho} \quad (2.6)$$

qui se simplifie pour donner l'équation :

$$\Phi = gh \quad (2.7)$$

Le potentiel hydraulique correspond donc, tout simplement, à la charge hydraulique multipliée par l'accélération gravitationnelle (Freeze et Cherry, 1979). Ainsi, la charge hydraulique définie par Darcy exprime bien la notion de potentiel et peut s'écrire comme suit (Freeze et Cherry, 1979) :

$$\frac{Q}{A} = K \frac{d\Phi}{g dl} \quad (2.8)$$

L'écoulement de l'eau souterraine dans les milieux géologiques a donc lieu lorsqu'il y a présence de gradients de potentiel ou de gradients de la charge hydraulique, i.e. lorsque différents points dans les systèmes aquifères possèdent des valeurs différentes d'énergie. L'écoulement souterrain s'effectue alors des régions à haut potentiel vers celles à bas potentiel. La connaissance de la distribution du potentiel dans les milieux géologiques permet donc de connaître les directions et l'intensité de l'écoulement des eaux souterraines.

Le modèle d'écoulement de l'eau souterraine défini par Hubert (1940) a permis d'observer et d'expliquer certains phénomènes fondamentaux de l'écoulement régional. Ceux-ci sont illustrés à la figure 2.3.

Cette figure montre que :

1) La surface de la nappe phréatique en condition de nappe libre est une réplique adoucie de la topographie, et que la profondeur à laquelle on la retrouve est plus grande sous les hauts topographiques que sous les vallées.

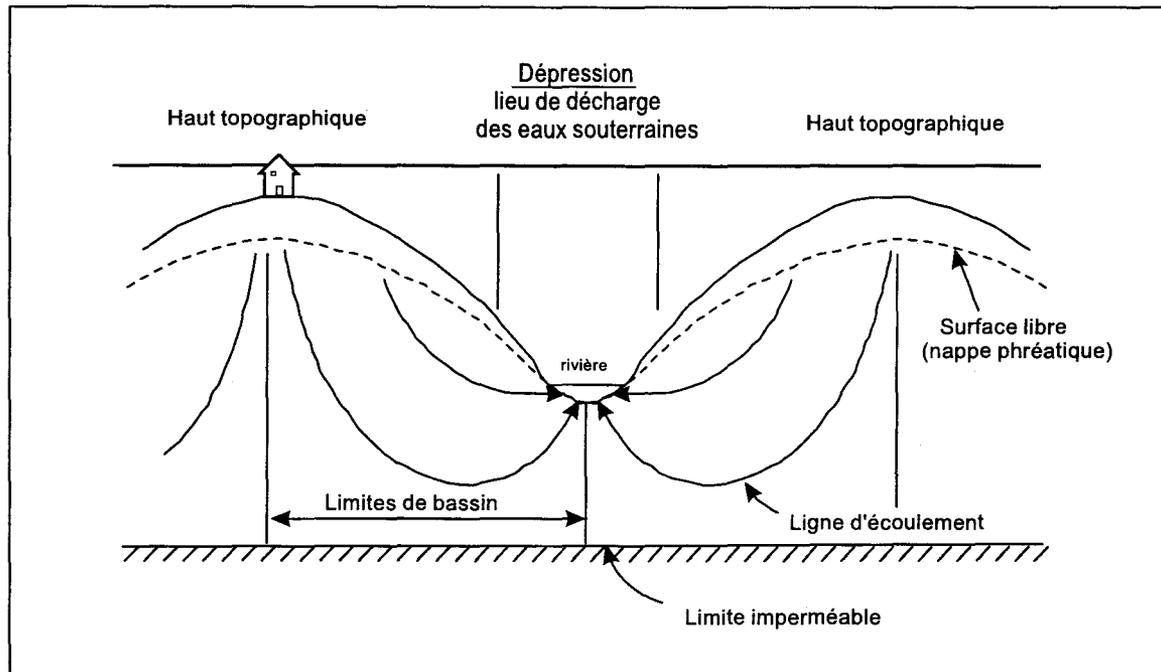


Figure 2.3: Modèle conceptuel de l'écoulement dans un milieu homogène et isotrope développé par Hubert (modifiée de Fetter, 1994).

2) L'écoulement de l'eau souterraine se fait vers le bas dans les régions topographiques élevées et vers le haut dans les régions où se trouvent les vallées. Ces zones correspondent respectivement aux zones de recharge et d'émergence.

3) Les zones de recharge couvrent généralement une superficie plus grande que les zones d'émergence.

4) Il y a convergence de l'écoulement dans les vallées et les dépressions topographiques, et divergence de celui-ci dans les régions topographiques plus élevées. Par conséquent, l'écoulement se fait des zones de recharge vers les zones d'émergence.

5) Il existe des limites sous-jacentes aux vallées et aux crêtes appelées limites de partage à travers lesquelles aucun écoulement ne se fait.

Le modèle d'écoulement développé par Hubert (1940) a constitué le point de départ pour la compréhension des processus de l'écoulement régional en régime permanent et a fourni les bases pour le développement subséquent de modèles mathématiques.

2.1.3 L'eau souterraine dans les milieux géologiques

Outre les principes d'écoulement, il est essentiel pour bien comprendre la distribution de l'eau souterraine et son écoulement à travers les formations géologiques d'avoir une connaissance approfondie de la structure et des propriétés hydrauliques des matériaux géologiques dans lesquels l'eau se retrouve. Du point de vue hydrogéologique, toutes les roches présentes sous la surface de la terre peuvent être classifiées selon leur capacité à emmagasiner et à transmettre l'eau qu'elles contiennent. Les formations géologiques offrant de bonnes capacités d'emmagasinement et pouvant transmettre des quantités d'eau appréciables et suffisantes pour l'alimentation économique d'un puits ou d'une source sont dites aquifères (Freeze et Cherry, 1979; Keefer, 1995). Les aquitards sont, pour leur part, des formations géologiques qui, malgré leur potentiel d'emmagasinement non négligeable et souvent élevé, transmettent l'eau à des vitesses beaucoup moindres (Freeze et Cherry, 1979). Ces formations ne peuvent être qualifiées d'aquifères parce qu'elles sont inaptes à réapprovisionner de façon suffisamment rapide un puits ou des sources (Keefer, 1995).

La classification des roches et des sédiments, en terme d'aquifère et d'aquitard, nécessite que l'on évalue leurs propriétés hydrauliques. Les principaux paramètres qui sont utilisés pour effectuer cette évaluation sont la porosité et la perméabilité. Ces paramètres sont décrits plus en détail dans les paragraphes suivants.

2.1.3.1 La porosité et la perméabilité

La porosité représente le rapport du volume des pores d'un matériel par rapport à son volume total et est exprimée sous forme de pourcentage (Freeze et Cherry, 1979; Landry et Mercier, 1986). C'est cette mesure qui permet de déterminer la quantité d'eau pouvant être contenue dans un volume de roche donné (Landry et Mercier, 1986). La forme et la distribution des pores rencontrés dans les diverses formations géologiques diffèrent

grandement. Par contre, à l'intérieur de cette diversité, on peut reconnaître trois grandes catégories de porosité à partir desquelles la plupart des roches et des sédiments peuvent être classifiés (Landry et Mercier, 1986). Ces trois catégories sont la porosité d'interstices, la porosité de fissures et la porosité de chenaux (Landry et Mercier, 1986). La porosité d'interstices se rencontre principalement dans les dépôts non consolidés (dépôts meubles), mais aussi à l'intérieur des roches d'origine sédimentaire et volcanique dont les pores ne sont pas complètement colmatés. La porosité d'interstices se développe au moment même de la formation des roches et des dépôts, et pour cette raison, il est commun d'y référer sous le terme de porosité primaire (Landry et Mercier, 1986). La plupart des formations géologiques d'origine ignée et métamorphique ne présentent pas de porosité primaire, étant donné qu'elles constituent des roches massives qui ne contiennent aucun espace vide lors de leur formation. La porosité de fissures peut se développer dans les roches d'origine ignée et métamorphique ainsi que dans les roches sédimentaires, lorsque celles-ci sont bien consolidées et cimentées. On dit que la porosité de fissures est une porosité secondaire, étant donné qu'elle se développe après que les roches se soient consolidées, lors d'événements tectoniques. La porosité de ces roches augmente donc avec le nombre, l'étendue et la dimension des fissures et fractures rencontrées. Finalement, la porosité de chenaux est causée par la dissolution des roches (Landry et Mercier, 1986). Les roches qui sont affectées par ce processus sont les roches solubles telles que les calcaires, les dolomies, les craies ainsi que les dépôts de gypse. Comme pour la porosité de fissures, la porosité de chenaux est une porosité secondaire, car elle se développe après la consolidation des roches durant les processus de météorisation. Plus grande est l'intensité des processus de dissolution qui ont affecté une roche, et plus élevée sera sa porosité.

Comme mentionné plus haut, la porosité d'interstices, ou porosité primaire, caractérise principalement les dépôts non consolidés. Les facteurs affectant la porosité dans ces types de dépôts sont nombreux et méritent par conséquent d'être expliqués plus à fond. Pour commencer, ce sont les facteurs lithologiques qui sont responsables du développement de la porosité d'interstices dans les dépôts non consolidés. La lithologie est le terme général

utilisé pour décrire la composition physique des sédiments (Freeze et Cherry, 1979). Les paramètres qui servent à caractériser la lithologie sont la composition minéralogique des sédiments, la dimension des grains, la distribution de leur dimension et leur arrangement à l'intérieur des dépôts (Freeze et Cherry, 1979; Driscoll, 1986). L'arrangement, la taille et la distribution de la dimension des grains sont les principaux facteurs lithologiques affectant la porosité (Landry et Mercier, 1986). L'arrangement des grains affecte la porosité d'un sédiment, de telle sorte qu'une configuration compacte réduit sa porosité, alors qu'un agencement régulier l'optimise. À titre d'exemple, la porosité d'un sédiment peut être réduite de 22 %, lorsqu'on le soumet à des forces de compaction (Landry et Mercier, 1986). Un des facteurs affectant l'arrangement des grains est la forme de ceux-ci. Par exemple, les formes bien arrondies produisent des assemblages compacts et contribuent ainsi à diminuer la porosité, alors que les grains de formes sub-arrondies à anguleuses s'agencent de manière moins régulière, ce qui favorisent le développement de roches poreuses. Ainsi, un gravier anguleux présentera une plus forte porosité, qu'un gravier dont les particules sont bien arrondies. La porosité dépend aussi de l'étalement granulométrique (Landry et Mercier, 1986). Un sédiment bien trié aura en général des valeurs élevées de porosité, alors qu'un sédiment composé de particules de plusieurs tailles sera moins poreux. Ceci est dû au fait que les particules fines ont tendance à se loger dans les espaces vides, situés entre les particules de plus grandes dimensions. Ces particules fines contribuent à obstruer les pores disponibles et par conséquent réduisent la porosité (Driscoll, 1986). Les dépôts de till, qui sont caractérisés par un étalement granulométrique important, sont un exemple typique illustrant ce phénomène.

La mesure de la porosité dans une roche ne permet pas à elle seule de déterminer si cette roche est un aquifère ou un aquitard. Comme la définition d'un aquifère l'indique, pour être classifiée comme tel, une roche doit non seulement contenir de l'eau, mais aussi elle doit être en mesure de la transmettre, et ce, en quantités appréciables (Freeze et Cherry, 1979). La perméabilité qui constitue l'un des facteurs importants contrôlant le mouvement de l'eau souterraine, est le paramètre utilisé pour décrire la capacité d'un matériel donné à transmettre

un fluide (Driscoll, 1986).

Pour commencer, nous allons décrire la perméabilité des dépôts non consolidés et des roches d'origine sédimentaire et volcanique, qui sont marquées par une porosité primaire. Dans ces types de roches et de dépôts, la perméabilité dépend de la porosité, du diamètre moyen des grains et de la tortuosité. Une des relations mathématiques qui décrit le lien entre la porosité, le diamètre des grains et la perméabilité résultante est la suivante (Freeze et Cherry, 1979):

$$k = \frac{(n^3)}{(1-n)^2} \frac{(d_m^2)}{180} \quad (9)$$

k = perméabilité

n = porosité

d_m = dimension moyenne des grains

Cette relation indique qu'en général les sédiments grossiers et bien triés (poreux) sont perméables. En effet, un sédiment mal trié (peu poreux), dont les espaces vides sont remplis par des particules fines, est moins perméable, étant donné que ces particules ont pour effet de réduire l'interconnectivité entre les pores.

Comme mentionné plus haut et comme l'équation l'indique, la perméabilité diminue de façon proportionnelle avec la dimension moyenne des grains. Ce phénomène peut être expliqué par la force d'attraction moléculaire, qui fait qu'une mince couche d'eau adhère à la surface des grains malgré la force de la gravité (Skinner et Porter, 1989). Lorsque la dimension des pores entre chaque grain est très petite, les films d'eau qui adhèrent aux parois de chacun de ces grains viennent à se toucher. À ce moment, les forces d'attraction moléculaires affectent tout l'ensemble des pores, ce qui fait qu'aux pressions atmosphériques, l'eau qui se trouve à l'intérieur de ces pores est contenue fermement et ne peut circuler librement (Skinner et Porter, 1989). Ceci explique pourquoi les argiles, malgré leur grande porosité, possèdent de très faibles valeurs de perméabilité (Skinner et Porter, 1989).

L'équation, qui est généralement utilisée pour exprimer la perméabilité (k) dans les dépôts granulaires et les roches sédimentaires et volcanoclastiques à porosité primaire, est la suivante (Freeze et Cherry, 1979) :

$$k = Cd^2_m \quad (10)$$

Le terme C englobe les facteurs de porosité (n) et de tortuosité (T). Il est proportionnel à la porosité et inversement proportionnel à la tortuosité du milieu granulaire ($C = n/T$) (Freeze et Cherry, 1979). Étant donné que la porosité des roches d'origine ignée et métamorphique ainsi que des roches sédimentaires consolidées soit bien différente de celle rencontrée dans les matériaux granulaires, les équations ci-haut mentionnées, faisant appel aux propriétés des matériaux granulaires caractérisés par une porosité d'interstices, ne sont pas adaptées pour décrire la perméabilité rencontrée dans les roches consolidées. Nous allons donc décrire de façon qualitative les principaux facteurs qui doivent être considérés lors de la caractérisation de la perméabilité des roches fracturées. Comme mentionné auparavant, les fractures et chenaux constituent les conduits à l'intérieur desquels l'eau peut s'infiltrer dans les roches consolidées. Cependant, la seule présence de ces conduits n'est pas suffisante pour rendre une roche perméable. Encore faut-il que les fractures soient interconnectées entre elles pour que l'eau puisse s'écouler librement à travers la roche (Freeze et Cherry, 1979). L'interconnectivité entre les fractures et les chenaux constitue donc le principal facteur rendant une roche consolidée perméable. Ces deux conditions, la présence de fractures et l'interconnection entre celles-ci, constituent donc les préalables pour le développement d'aquifères dans les roches consolidées.

Le tableau 2.1 et la figure 2.4 illustrent les valeurs typiques de porosité et de perméabilité pour divers types de roches et sédiments (Freeze et Cherry, 1979, Driscoll, 1986).

On constate que les valeurs de porosité et de perméabilité varient grandement pour un même type de dépôt. De plus, on peut voir que les valeurs de la perméabilité observées pour tous les types de roches et de sédiments s'étalent sur un peu plus de treize ordres de grandeurs. Conséquemment, une estimation de la perméabilité à l'intérieur d'un ordre de grandeur est

communément considérée satisfaisante dans la plupart des études en hydrogéologie.

Tableau 2.1: Valeurs de la porosité pour divers types de roches et de sédiments (modifié de Freeze et Cherry, 1979).

Sédiments non consolidés	n (%)	Roches	n (%)
Argile	45 - 55	Grès	5 - 30
Silt	35 - 50	Calcaire et dolomie	1 - 20
Sable	25 - 40	Shale	0 - 10
Gravier	25 - 40	Roches cristallines fracturées	0 - 10
Sable et Gravier	10 - 35	Basalte vésiculaire	10 - 50
Till	10 - 25	Roche dense fraîche et non fracturée	≤ 1

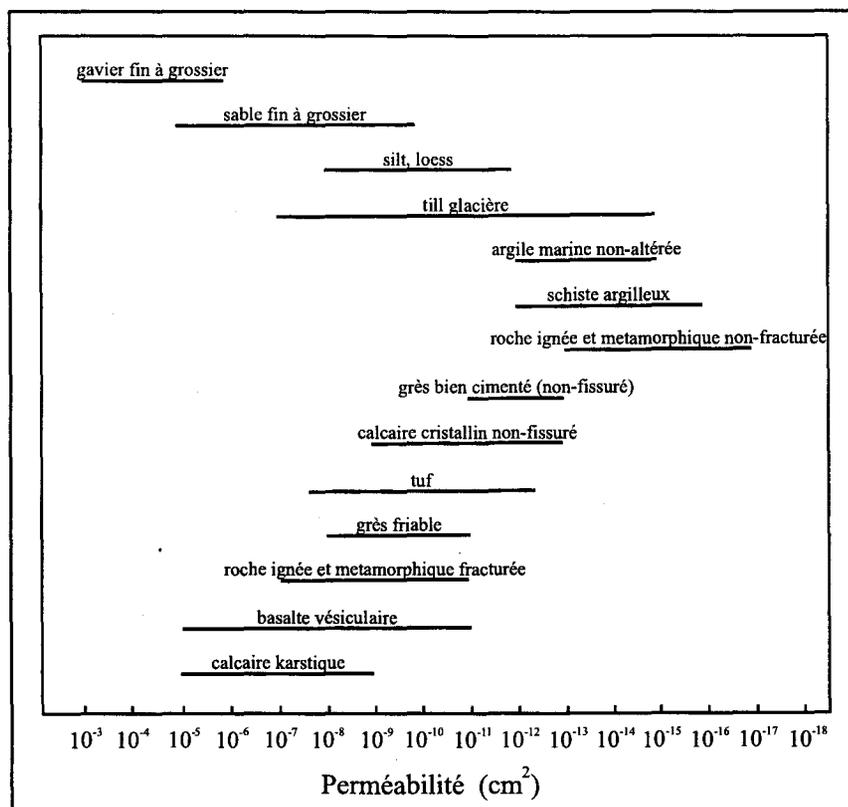


Figure 2.4: Valeurs typiques de la perméabilité pour les aquifères dans les dépôts non-consolidés et consolidés (modifiée et adaptée de Driscoll, 1986).

2.1.3.2 *Le contexte géologique des aquifères*

Deux exemples schématiques du rôle que joue la porosité et la perméabilité dans le développement des aquifères et des aquitards dans les roches sédimentaires sont montrés aux figures 2.5a et 2.5b. La figure 2.5a montre la présence d'une zone de très grande porosité et perméabilité le long de la crête d'un anticlinal affectant des roches carbonatées. Cette zone fracturée, lorsque exposée près de la surface, reçoit des quantités d'eau importantes et constitue une région privilégiée pour l'occurrence d'aquifères. L'eau qui s'infiltré a le pouvoir de dissoudre de façon significative l'intérieur de ces fractures et donc d'augmenter l'espace disponible pour l'infiltration de l'eau. Dans ce cas, la perméabilité se concentre essentiellement le long de la crête de l'anticlinal. Les fissures localisées de part et d'autre du pli, ne sont pas interconnectées avec le réseau principal développé le long du pli, et ne participent donc pas à l'écoulement. Ces zones peuvent donc être classées en tant qu'aquitard. La figure 2.5b montre un autre exemple où les porosités de fissures et de chenaux jouent un rôle important dans le développement de zones aquifères. Dans ce cas, la dissolution a eu lieu de façon préférentielle le long du litage. Ensuite, la déformation de ces roches a généré des failles qui ont formé des conduits préférentiels pour l'infiltration de l'eau. L'intersection de ces fractures avec les cavités produites par les processus de dissolution contribue à augmenter la perméabilité de la roche, créant ainsi des zones de très grandes productivités. Les roches non affectées par la dissolution et la fracturation sont de très pauvres milieux pour l'emmagasinement et la transmissivité de l'eau, et forment donc les zones aquitards.

La connaissance des environnements à l'intérieur desquels les dépôts sédimentaires se sont développés permet de mieux évaluer la porosité et la perméabilité des roches et des sédiments. Par exemple, les modes de mise en place tels que les environnements éoliens, de plages et fluviaux favorisent la formation d'unités sédimentaires constituées de particules grossières et bien triées, qui sont propices au développement d'aquifères. En contraste, les environnements sédimentaires calmes tels que les bassins d'eau profonds ainsi que certains environnements glaciaires représentent des lieux où se forment des dépôts composés de

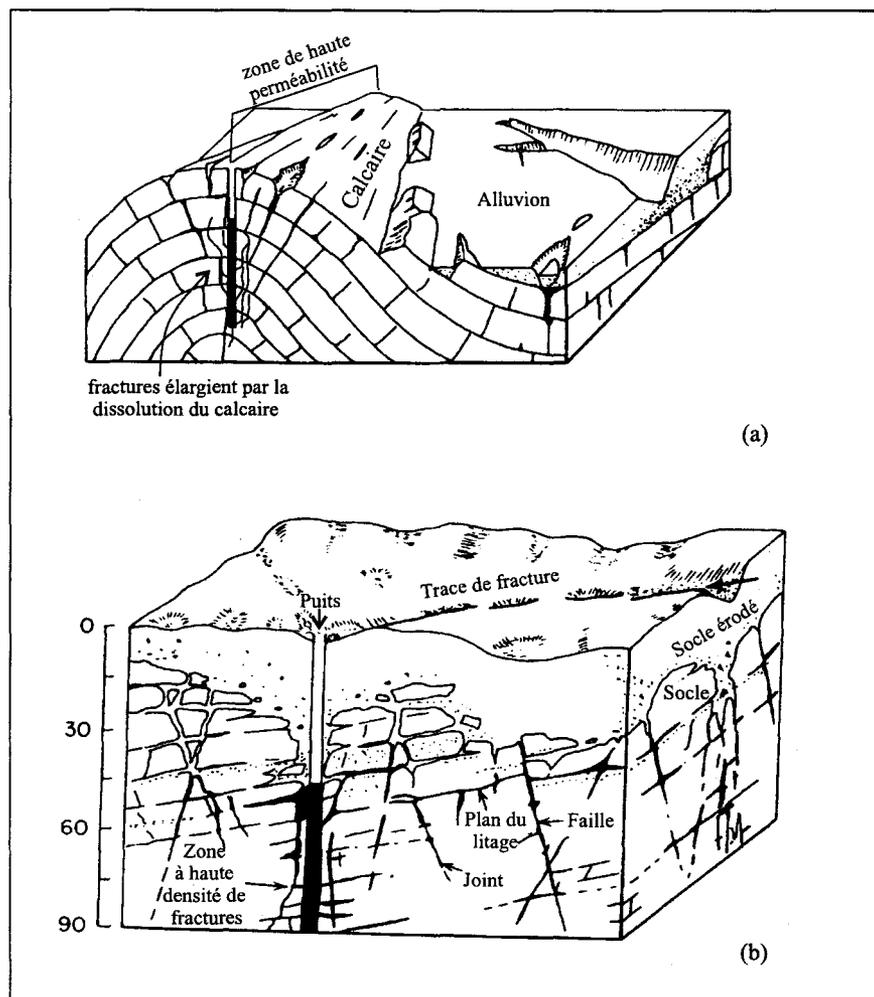


Figure 2.5: a) développement d'une zone hautement perméable le long de l'axe d'un pli anticlinal, b) développement de zones de dissolution se faisant préférentiellement le long du litage qui intersecte des zones de fracturation (modifiée de Freeze et Cherry, 1979).

sédiments fins et parfois mal triés (Walker et James, 1992). Ce sont ces types de dépôts qui forment la grande majorité des aquitards rencontrés en Amérique du Nord (Freeze et Cherry, 1979).

Un exemple est montré à la figure 2.6 où l'occurrence des aquifères et des aquitards dans une région dépend en grande partie de la lithologie, et donc de la porosité et perméabilité des dépôts. Cette figure présente la morphologie et les divers faciès d'un dépôt alluvial produit par des rivières méandriques (Freeze et Cherry, 1979). Ces dépôts sont caractérisés par la

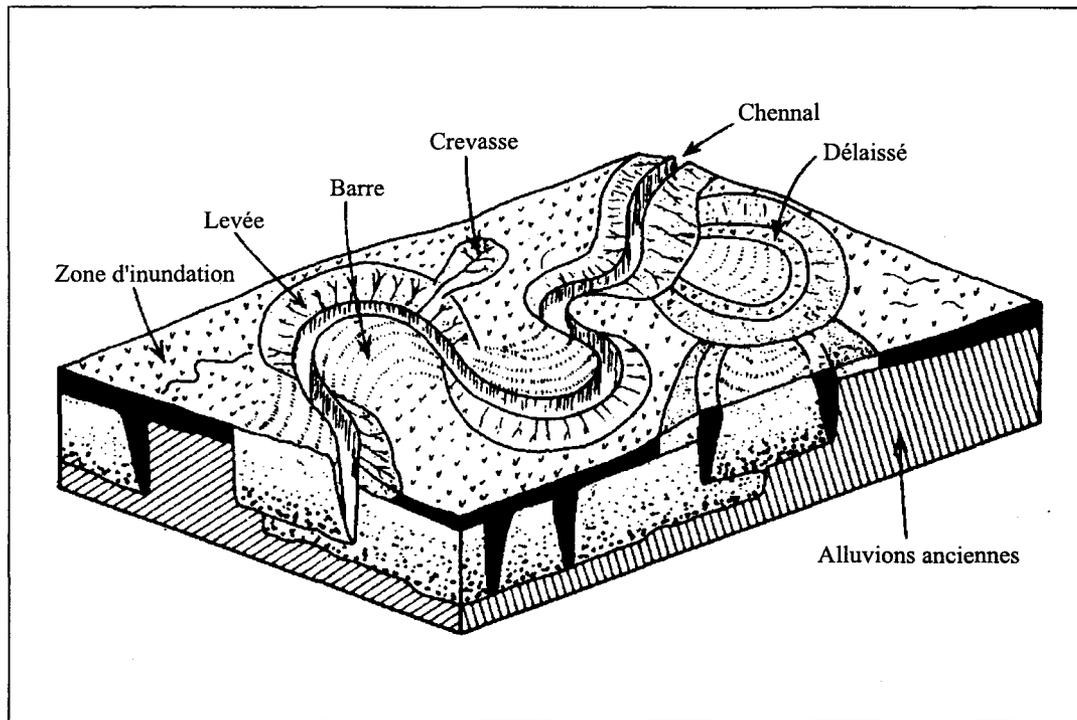


Figure 2.6: Bloc diagramme d'un dépôt alluvial formé par des rivières à méandres (modifiée de Freeze et Cherry, 1979).

présence de barres, qui sont produites par l'accrétion latérale des sédiments alluviaux sur les côtés fuyants des méandres, et de zones d'inondation (Walker et James, 1992). Les barres sont généralement composées de sédiments à granulométrie moyenne à grossière, typiquement des sables, qui deviennent plus fins vers le sommet (Walker et James, 1992). Les sédiments déposés dans les plaines d'inondation sont généralement fins, bien arrondis et habituellement bien triés (Driscoll, 1986). De par leur granulométrie, les barres forment généralement de bons aquifères, alors que les zones d'inondation, principalement composées de matériaux fins, forment des unités aquitards.

Le changement continu du cours des rivières contribue à la formation de dépôts à géométrie complexe, où s'enchevêtrent latéralement et verticalement les zones perméables et imperméables. La morphologie complexe de ces systèmes alluvionnaires rend plus difficile la délimitation des aquifères et des aquitards à l'aide de simples données provenant de trous de forages (Freeze et Cherry, 1979).

Un agrandissement schématique de l'un de ces systèmes est présenté à la figure 2.7 et permet de voir la distribution de l'eau souterraine en relation avec les dépôts perméables et imperméables (Skinner et Porter, 1989). On constate, sur cette figure, la présence de diverses nappes d'eau souterraine, c'est-à-dire une principale et quelques nappes perchées. La présence de couches imperméables discontinues explique le développement des nappes perchées. Ces couches imperméables interceptent l'eau qui s'infiltré juste au-dessus d'elles et empêchent son écoulement vers la nappe principale. Ces nappes perchées sont généralement de faibles étendues et les quantités d'eau qu'elles contiennent sont souvent insuffisantes pour l'alimentation de populations importantes.

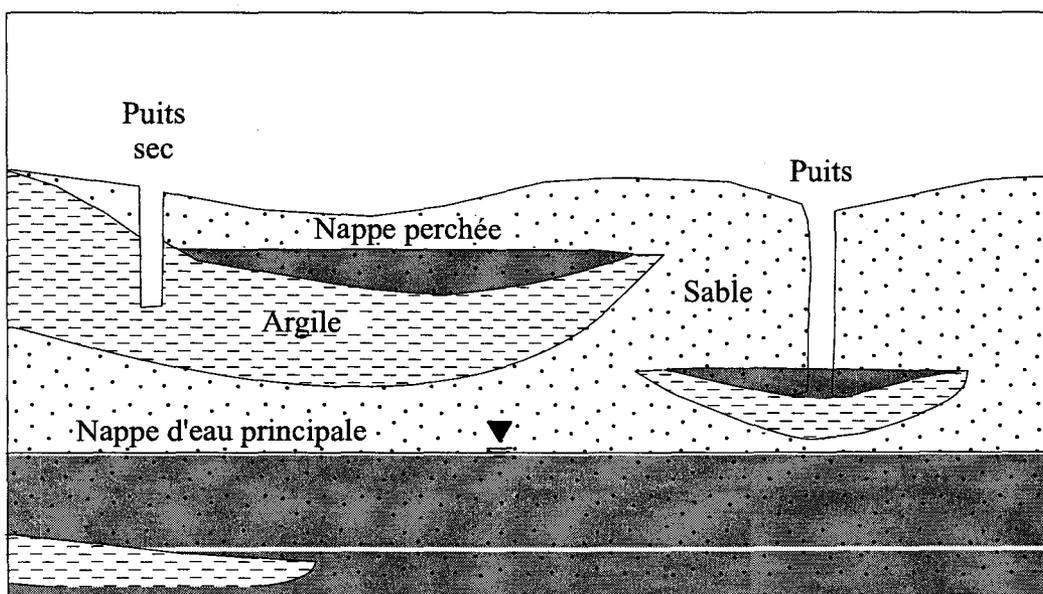


Figure 2.7: Agrandissement d'un environnement formé par des rivières à méandres montrant la distribution de l'eau souterraine (modifiée de Skinner et Porter, 1989).

En résumé, les roches et les sédiments peuvent être classés en tant qu'aquifères ou aquitards selon leur capacité à emmagasiner et à transmettre l'eau qu'ils contiennent. La caractérisation de cette capacité peut se faire de façon préliminaire, si l'on connaît les valeurs de la porosité et de la perméabilité des roches et des sédiments. De plus, une idée sur l'environnement de déposition dans lequel se sont formés ces dépôts permet de préciser leurs caractéristiques hydrauliques. De façon générale, les sédiments constitués de sables et de graviers et les roches qui possèdent une bonne porosité de fissures ou de chenaux et de fortes valeurs de

perméabilité présentent un bon potentiel aquifère. En contraste, les dépôts sédimentaires constitués de silt et d'argile et qui présentent une granulométrie étalée (sédiments mal triés), ainsi que les roches faiblement fracturées constituent les formations aquitards.

Outre la caractérisation des roches et des sédiments en tant qu'aquifères et aquitards, il est également important de connaître leur distribution et leur agencement dans les systèmes géologiques. Cette connaissance permet, entre autres, de prédire la localisation et l'étendue des formations aquifères ce qui s'avère être une information très précieuse dans le cadre de recherche en eau ou de projets de décontamination où l'écoulement et le devenir des contaminants sont grandement affectés par l'architecture des systèmes aquifères.

La stratigraphie et les éléments structuraux qui affectent les roches et les sédiments sont les principaux facteurs qui influencent la distribution des aquifères et des aquitards dans les systèmes géologiques. Il est donc primordial d'acquérir une connaissance de base dans ces domaines, afin de réaliser une bonne caractérisation hydrogéologique (Freeze et Cherry, 1979).

2.1.3.3 La stratigraphie

Les changements brusques ou graduels du climat ainsi que les événements tectoniques donnant lieu aux périodes glaciaires ou d'invasions marines constituent quelques-uns des nombreux processus qui refaçonnent continuellement la surface de la terre (Walker et James, 1992). La destruction des roches, leur redistribution sous forme de sédiments et leur déposition sont la conséquence de ces changements et jouent un rôle important dans la formation et la distribution des aquifères et des aquitards à l'intérieur des systèmes géologiques (Driscoll, 1989). La compréhension des systèmes de déposition récents et anciens ainsi que leur évolution dans le temps est aussi cruciale pour la caractérisation du mouvement des eaux souterraines à travers les matériaux poreux, où l'écoulement dépend de la géométrie des couches perméables et imperméables (Walker et James, 1992; Freeze et Witherspoon, 1967). La stratigraphie est l'un des outils utilisés pour comprendre ces

systèmes. Elle décrit la séquence chronologique dans laquelle les diverses couches géologiques sédimentaires se sont déposées et elle dévoile la manière dont ces couches sont géométriquement liées et imbriquées les unes dans les autres. L'étude de la stratigraphie permet donc de reconstruire les divers événements de déposition, d'érosion et de tectonisme qui ont donné lieu aux différents dépôts sédimentaires d'une région, et de faire ressortir les éléments architecturaux qui les caractérisent.

Des exemples où l'occurrence des aquifères et des aquitards dans une région dépend de la stratigraphie sont illustrés dans les figures qui suivent. À plusieurs reprises au Pléistocène, les glaciers ont recouvert une grande partie de l'hémisphère Nord (Landry et Mercier, 1986). Le paysage actuel du Québec résulte en grande partie de l'action des glaciers et les dépôts qu'ils ont laissés revêtent une importance particulière du point de vue hydrogéologique. La figure 2.8 illustre les divers environnements de déposition ainsi que les profils typiques de faciès qui sont développés lors d'une phase glaciaire d'avancement et de retrait dans les nombreux environnements de glaciation (Walker et James, 1992). On remarquera l'alternance et la diversité des couches géologiques présentes sur chacune des coupes schématiques. Les dépôts qui sont formés incluent des tills, des turbidites, des dépôts d'argiles ainsi que des dépôts de sables et graviers d'origine fluvioglaciaire et glaciolacustre. Les tills, les turbidites et les dépôts d'argiles sont principalement composés de matériaux fins et forment aujourd'hui des unités aquitards qui occupent fréquemment des étendues régionales. Pour leur part, les dépôts de sables et graviers qui se sont formés à l'intérieur de vallées glaciaires, de chenaux sous-marins et de systèmes fluvioglaciaires forment aujourd'hui d'importants aquifères.

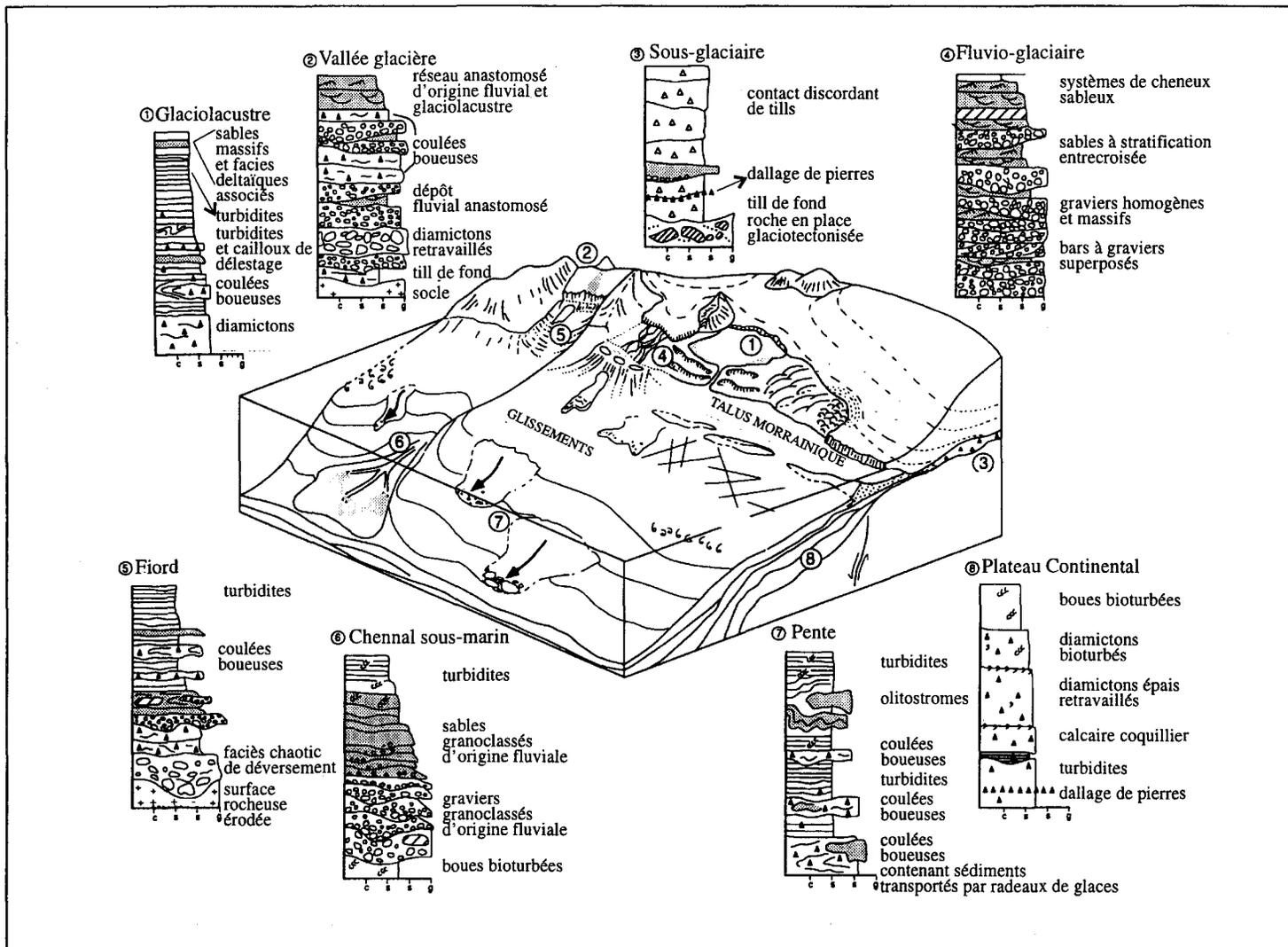


Figure 2.8: Divers environnements de sédimentation glaciaires ainsi que les profils typiques de faciès développés lors d'une phase d'avancée et de retrait glaciaire (modifiée de Walker et James, 1992).

La figure 2.9 illustre un exemple d'une séquence stratigraphique pouvant être rencontrée dans les régions qui ont été affectées par plusieurs épisodes de glaciation, tels qu'on en retrouve en Amérique du Nord (Freeze et Cherry, 1979). La grande majorité des aquifères se retrouvent dans des sables et graviers fluvio-glaciaires qui sont fréquemment confinés par des dépôts de till ou d'argile et silts glaciolacustres. L'utilisation du terme confiné désigne qu'un aquifère est limité au-dessus et en-dessous par des couches géologiques dont la perméabilité est de beaucoup inférieure à celle de l'aquifère, ce qui a pour effet de limiter l'écoulement de l'eau vers l'aquifère. Les aquifères se présentent sous forme de couches étendues ou comme dépôt de remplissage dans les vallées enfouies ou de surface. Les dimensions de ces vallées sont variables mais peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilomètres de longueur et quelques kilomètres de largeur. L'épaisseur des couches aquitards formées par les dépôts de till varie généralement de 5 à 10 mètres, mais peut aussi être de plusieurs centaines de mètres. Les épaisseurs des dépôts d'argiles et de silts peuvent aussi

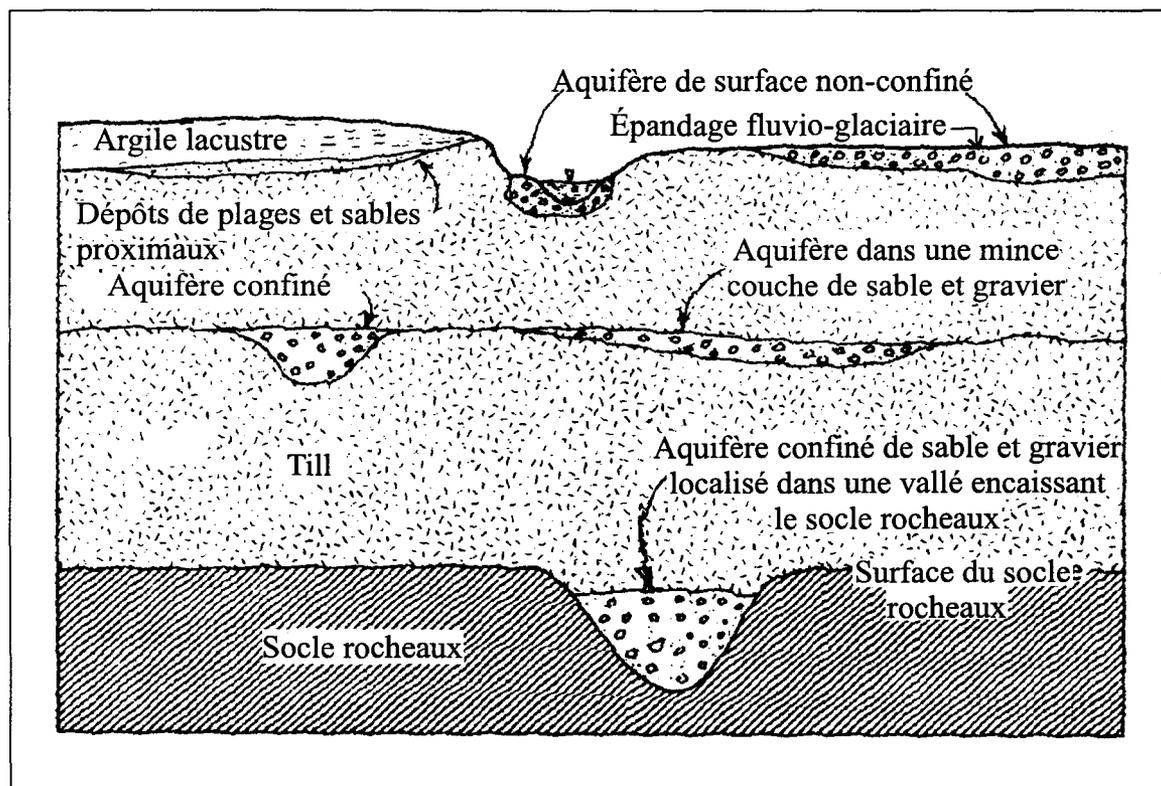


Figure 2.9: Exemple d'une séquence stratigraphique pouvant être rencontrée dans les régions qui ont été affectées par plusieurs épisodes de glaciation, tels qu'on en retrouve en Amérique du Nord (modifiée de Freeze et Cherry, 1979).

varier, tout dépendant de leur localisation à l'intérieur du bassin sédimentaire. Tous ces aquitards constituent des barrières naturelles à l'écoulement de l'eau souterraine et agissent donc comme couche protectrice contre l'infiltration de contaminants à partir de la surface vers les formations aquifères sous-jacentes. Ces contextes sont souvent favorisés lors de la recherche en eau potable. Par contre, l'exploitation économique à long terme de ces aquifères confinés n'est pas toujours réalisable. En effet, leur exploitation implique qu'ils doivent être naturellement réalimentés par les eaux de précipitation, en quantités suffisantes. Ceci peut s'effectuer de diverses manières, soit par un cours d'eau dont le lit est en contact direct avec la formation aquifère, soit par l'émergence à une certaine distance latérale de la formation aquifère à la surface, ou bien lorsque la couche aquitard s'amincit latéralement pour éventuellement disparaître laissant ainsi la formation aquifère en contact avec d'autres formations poreuses pouvant la réalimenter. Aussi, lorsque la perméabilité des formations rocheuses sous-jacentes est suffisamment élevée, la réalimentation de l'aquifère peut se faire uniquement par ce moyen. Ainsi, des études ont démontré qu'une formation granulaire de grande dimension surmontant un socle rocheux imperméable fournirait moins d'eau qu'un plus petit dépôt dont l'assise serait constituée d'une formation rocheuse à haute perméabilité (Simard, 1977).

2.1.3.4 La structure

Les structures telles que les plis, les fractures et failles constituent les éléments qui influencent aussi la distribution et la géométrie des aquifères et aquitards que l'on retrouve dans les roches sédimentaires, ignées et métamorphiques (Freeze et Cherry, 1979). La figure 2.10 illustre un aquifère régional localisé dans une formation de grès sous-jacente à une couche imperméable d'argile. Cet aquifère est principalement alimenté par le front montagneux sur lequel il s'appuie et de façon mineure par l'écoulement vertical des eaux provenant de la couche aquitard supérieure (Freeze et Cherry, 1979). Une faille majeure sectionne l'aquifère en deux et a pour effet de ramener près de la surface la couche de grès, située du côté du toit, qui autrement se serait trouvée beaucoup plus profondément enfouie. Cette faille joue un rôle important au niveau de l'hydrogéologie régionale étant donné qu'elle

constitue un conduit à travers lequel l'eau pressurisée dans l'aquifère peut s'échapper. Aussi, on constate que la localisation de la végétation en surface reflète l'arrangement spatial des aquifères et aquitards en profondeur. On peut voir que la végétation suit le tracé de la faille ainsi qu'elle s'étend et se développe de façon préférentielle dans les zones où l'aquifère se trouve plus près de la surface. Cet exemple illustre bien que la reconnaissance des éléments structuraux affectant les systèmes géologiques constitue un outil important pour la cartographie des aquifères et aquitards d'une région.

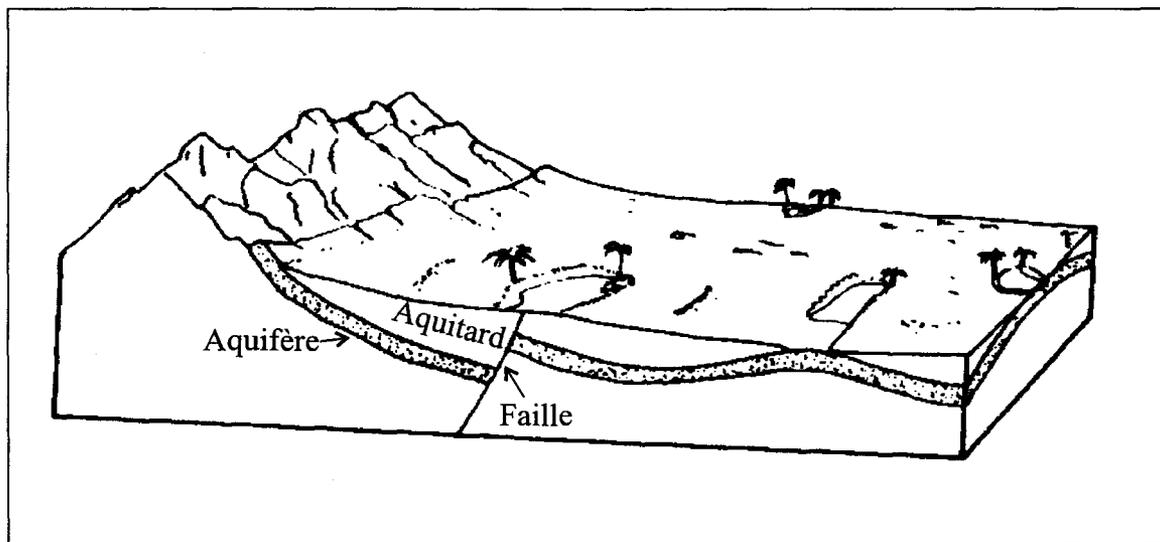


Figure 2.10: Exemple de l'influence des facteurs structuraux sur la répartition des aquifères dans les systèmes géologiques (tirée de Freeze et Cherry, 1979).

En résumé, on peut dire que la caractérisation de la porosité et de la perméabilité des roches et des sédiments ainsi que la reconnaissance des éléments stratigraphiques et structuraux qui les caractérisent mènent directement à la compréhension de la nature et de la distribution des aquifères et aquitards rencontrés à l'intérieur des divers systèmes géologiques (Freeze et Cherry, 1979).

2.1.4 Modèles mathématiques décrivant l'écoulement en régime permanent

Les sections précédentes ont permis d'expliquer pourquoi et comment l'eau souterraine circule dans les matériaux géologiques et de quelle façon les facteurs géologiques tels que la lithologie, la structure et la stratigraphie influencent le développement d'aquifères

et d'aquitards. Le modèle géologique sur lequel Hubert (1940) s'est basé pour développer son modèle d'écoulement de l'eau souterraine est toutefois hautement simplifié et ne rend pas compte de l'impact qu'on ces différents facteurs sur l'écoulement régional. Afin de bien représenter l'écoulement réel il est nécessaire de tenir compte de ces paramètres. C'est l'apparition de nouveaux outils informatiques, dans les années 60, qui a permis de tenir compte de tous ces divers paramètres physiques dans les modèles mathématiques et d'en vérifier l'effet sur l'écoulement de l'eau souterraine. Les sections qui suivent présentent les principaux travaux qui ont été effectués sur ce sujet.

2.1.4.1 *Modèle de Tóth*

C'est Tóth qui pour la première fois en 1962 a traduit le modèle conceptuel et la définition du potentiel, initialement défini par Hubert (1940), en un modèle mathématique décrivant l'écoulement régional et pouvant être résolu analytiquement. Le but de cette étude était de développer un modèle mathématique pouvant tenir compte à la fois des aspects connus de l'écoulement ainsi que des anomalies souvent observées sur le terrain (Tóth, 1962, 1963).

Le modèle mathématique de Tóth considère un milieu homogène et isotrope dont la pente de la nappe phréatique est très faible (Freeze et Cherry, 1979). Les solutions analytiques qu'il a développées lui ont permis de vérifier les effets de chacun des paramètres suivants sur les patrons d'écoulement:

- l'amplitude des courbes de la nappe
- la pente de celle-ci
- et la géométrie du bassin considéré

Tóth (1963) a pu ainsi démontrer l'émergence de différents systèmes d'écoulement, soient locaux, intermédiaires et régionaux, en modifiant les paramètres définis ci-haut (figure 2.11).

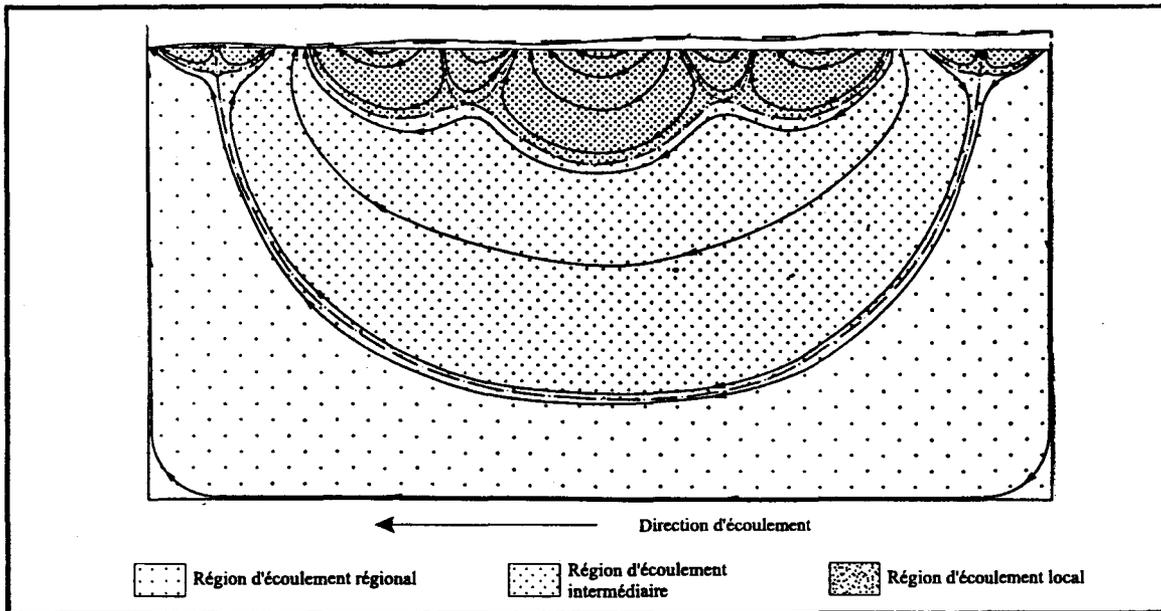


Figure 2.11: Émergence de différents systèmes d'écoulement dans un bassin en fonction de la présence et de l'importance des paramètres suivants : relief et pente de la nappe, géométrie du bassin (modifiée de Tóth, 1963).

L'écoulement local est caractérisé par une zone de recharge, localisée à l'intérieur d'un secteur topographique élevé, et d'une zone d'émergence, localisée dans un bas topographique, qui sont toutes deux adjacentes. Un système d'écoulement sera considéré régional lorsque ces zones de recharge et d'émergence sont situées, respectivement, au sommet du bassin et à la base de celui-ci et les systèmes d'écoulement intermédiaires sont tous ceux compris entre les systèmes d'écoulement locaux et régionaux (Fetter, 1994).

Un exemple illustrant l'effet de la topographie et de la pente du bassin sur le système d'écoulement résultant d'un bassin dont la profondeur est de beaucoup inférieure à sa longueur est donné ici (figure 2.12).

Pour ce bassin, lorsque le relief est négligeable, mais qu'il existe tout de même une pente dans le bassin de drainage, le système d'écoulement résultant sera régional (figure 2.12a). Cependant, si l'on augmente le relief, seuls des systèmes d'écoulement locaux prendront

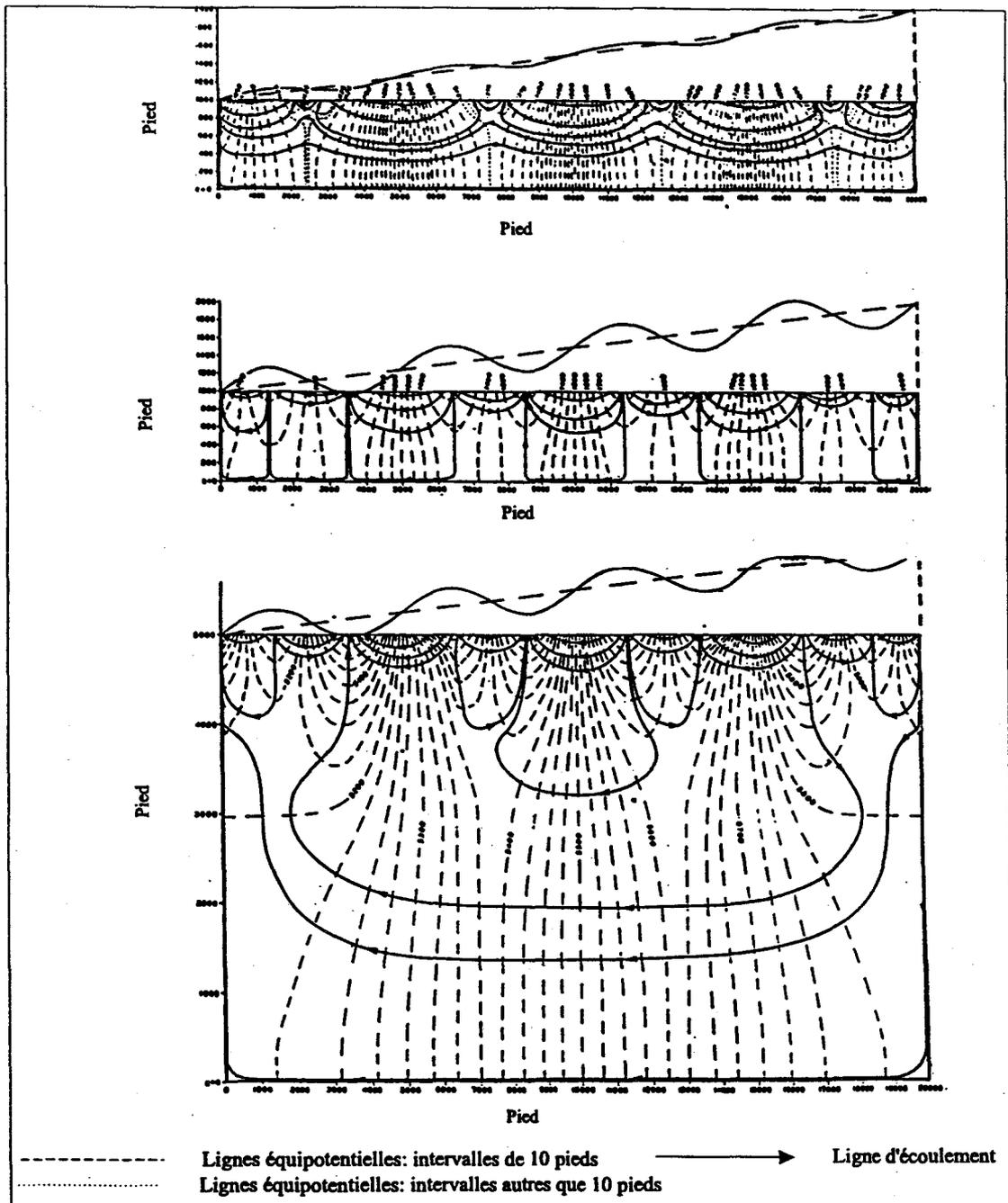


Figure 2.12: Effet de la topographie et de la pente du bassin de drainage sur le régime d'écoulement dans un bassin dont la profondeur est de beaucoup inférieure à sa longueur. En a) le relief est négligeable mais il existe une dénivellation entre le sommet du bassin et la rivière. Le système d'écoulement résultant est régional. En b) tous les paramètres sont gardés constants à l'exception de la topographie qui est augmentée. On peut voir que les systèmes d'écoulement générés sont maintenant locaux. En c) le relief et la pente du bassin sont les même qu'en b) mais on augmente la profondeur du bassin. Les trois systèmes d'écoulement, soient locaux, intermédiaires et régionaux sont alors présents.

forme, la profondeur desquels sera directement proportionnel au relief (plus le relief est prononcé plus importants seront les systèmes locaux (figure 2.12b)). Dans le cas où le relief ainsi que la pente topographique du bassin sont importants et que la profondeur du bassin est augmentée, on verra apparaître dans le bassin tous les systèmes d'écoulement, i.e. locaux, intermédiaires et régionaux (figure 2.12c).

2.1.4.2 *Modèle de Freeze et Witherspoon*

Les travaux de Tóth (1962,1963) ont démontré l'importance de la géométrie du bassin ainsi que les effets de la topographie sur l'écoulement de l'eau souterraine. Par contre, son modèle mathématique considérait un milieu homogène et isotrope, et par conséquent ne permettait pas de connaître l'influence de la stratigraphie sur l'écoulement. Pour pallier à ces contraintes, Freeze et Witherspoon (1966, 1967, 1968) ont développé un modèle mathématique qui tient compte de la présence d'hétérogénéités dans les milieux aquifères. Ce modèle peut représenter plus justement les processus d'écoulement réels, tels qu'observés sur le terrain.

Les méthodes numériques ont été utilisées pour résoudre les équations développées et quelques-uns des résultats des simulations sont présentés aux figures 2.13 et 2.14. On peut constater que les patrons d'écoulement deviennent de plus en plus complexes lorsque la géologie et la topographie se complexifient.

Les figures 2.13a et 2.13b montrent l'effet d'une couche de grande perméabilité sous-jacente à une couche de plus faible perméabilité. L'écoulement tend à se faire le long de la zone à forte conductivité hydraulique et avec une composante verticale à travers la zone de faible conductivité hydraulique. Aussi, plus la perméabilité de la couche inférieure augmente, plus l'écoulement dans la couche supérieure (de plus faible perméabilité) aura tendance à se faire verticalement vers la couche inférieure.

Les figures 2.13c et 2.13d montrent l'effet de la localisation à divers endroits d'une lentille de forte perméabilité sous une couche aquitard. Si la lentille est placée sous la zone de

recharge, elle force l'écoulement de la couche supérieure à se faire de façon quasi verticale et crée une zone d'émergence à la mi-pente qui ne pourrait être prédite par la simple inspection de la topographie. Le déplacement de la lentille de forte perméabilité vers la zone d'émergence a pour effet de dévier l'écoulement de la zone à mi-pente vers la couche perméable en profondeur.

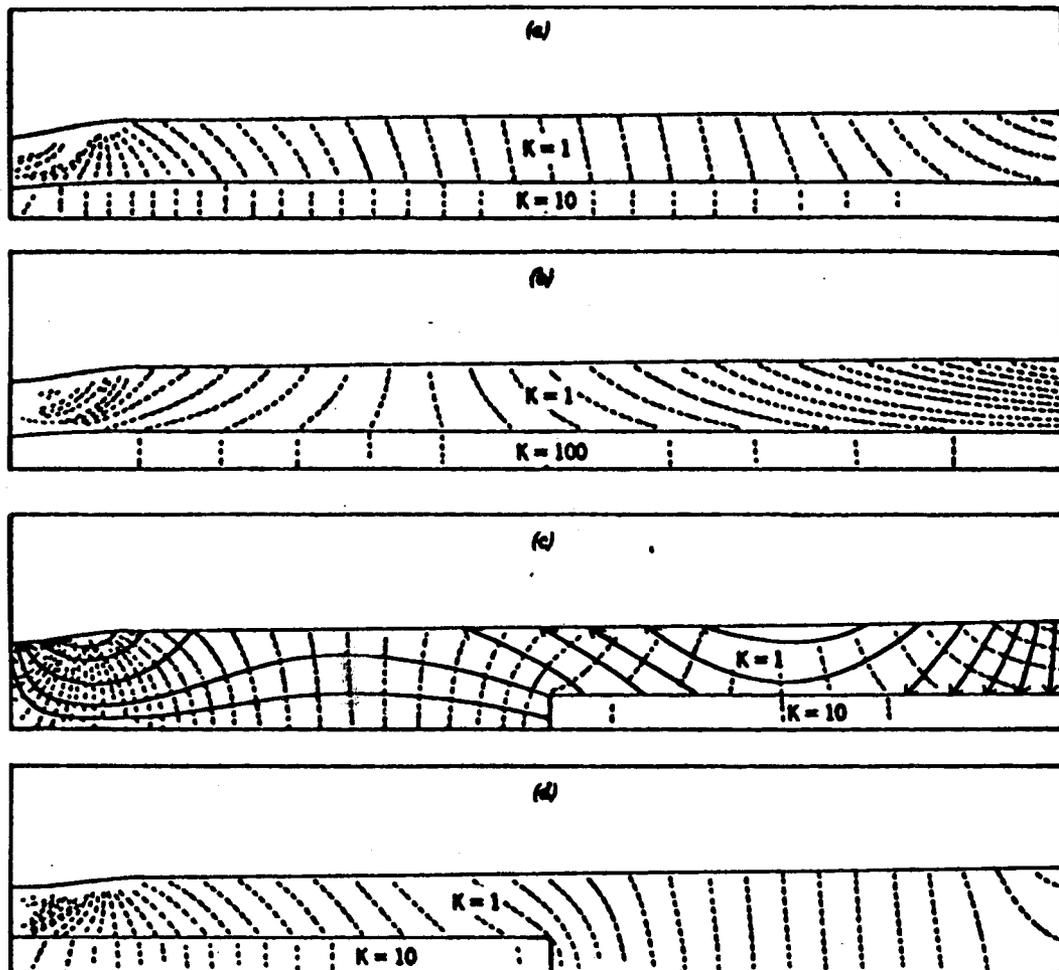


Figure 2.13: Divers patrons d'écoulement régionaux causés par les contrastes de perméabilités entre couches adjacentes (tirée et modifiée de Freeze et Witherspoon, 1967).

L'effet de l'inclinaison de la stratigraphie sur les systèmes d'écoulement est montré à la figure 2.14. Si le lit à plus forte perméabilité est incliné dans la même direction que la topographie (2.14a), l'écoulement se fera le long du lit. Par contre, si le pendage du lit est opposé à l'inclinaison de la topographie (2.14b), l'écoulement aura tendance à se faire le long du lit, vers la surface.

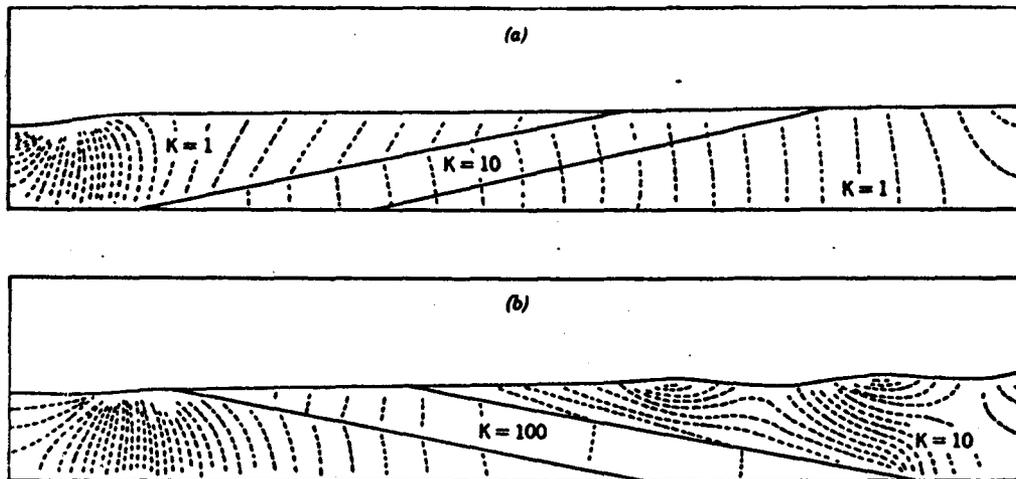


Figure 2.14 a,b: Variation de l'écoulement régional en fonction du pendage d'une couche de forte perméabilité comprise entre deux couches aquitards (tirée et modifiée de Freeze et Witherspoon, 1967).

En résumé, ces études pionnières ont permis de faire ressortir l'impact de la stratigraphie, de la géométrie du bassin et de la topographie sur l'écoulement des eaux souterraines. Les principaux points saillants qu'on peut tirer de ces études sont résumés ci-dessous (Freeze et Cherry, 1979):

1. Les trois facteurs influençant le plus la distribution du potentiel sont :
 - a. Le ratio de la profondeur du bassin sur la longueur
 - b. La configuration du niveau de la nappe
 - c. La variation de la perméabilité
2. La présence d'une vallée importante tend à concentrer la résurgence de l'eau souterraine vers celle-ci. Lorsque le niveau régional de la nappe est uniforme, la totalité des terres les plus hautes constitue la zone de recharge.
3. Un aquifère confiné de forte perméabilité agira comme un conduit qui transmet l'eau vers

la zone principale d'émergence et affectera la magnitude de la recharge ainsi que sa localisation géographique.

4. Une discontinuité stratigraphique importante en profondeur peut créer des zones de recharge et d'émergence qui ne pourraient être anticipées par la simple observation de la topographie.

Ces diverses solutions obtenues à l'aide des modèles mathématiques ont mis en évidence l'importance de la topographie, la géométrie des bassins ainsi que les couches géologiques à perméabilité variables sur les patrons d'écoulement régionaux.

CHAPITRE 3

DESCRIPTION GÉNÉRALE DE LA MRC DE PORTNEUF

3.1 Localisation

La MRC de Portneuf occupe une superficie de 4096 km² (voir figure 3.1). Son territoire est bordé à l'ouest et à l'est par les longitudes 71°50'W et 72°54'W, au sud par le fleuve Saint-Laurent et au nord par la latitude 47°40'N. Les travaux de cartographie hydrogéologique se sont déroulés dans le secteur sud de la MRC. Le choix de cette région est justifié par le fait qu'elle est représentative: 1) des aquifères que l'on retrouve sur l'ensemble du Piémont Laurentien, de l'Outaouais jusqu'à Québec, 2) de l'utilisation du sol qu'on y fait (zones urbaines, agricoles et forestières) ainsi que 3) de l'exploitation de la ressource (plus de 85% de la population de la MRC s'approvisionne à partir des eaux souterraines). De plus, la majeure partie de la population est concentrée sur un territoire d'environ 1500 km² au sud de la MRC, soit sous la latitude 47°00'N. Les limites de la région d'étude par rapport aux limites de la MRC de Portneuf sont présentées à la figure 3.1. Sur cette figure apparaissent aussi les principales routes. La MRC est desservie par l'autoroute 40 qui la traverse d'est en ouest dans sa partie sud et par les routes principales numéro 365, 354, 358, 367 et 363 qui permettent d'atteindre la plupart des villes et villages de la MRC.

Au total, vingt-cinq municipalités font partie de la MRC de Portneuf. La distribution des municipalités à l'intérieur du territoire de la MRC apparaît à la figure 3.2 ainsi qu'à la carte présentée à l'Annexe A. Les municipalités sont : Cap-Santé (SD)⁶, Deschambault (SD), Donnacona (V), Grondines (SD), Lac-Blanc (NO), Lac-Laperyère (NO), Lac-Sergent (V), Linton (NO), Neuville (VL), Pointe-aux-Trembles (P), Notre-Dame-de-Portneuf (P), Pont-Rouge (VL), Portneuf (V), Rivière-à-Pierre (SD), Saint-Alban (SD), Saint-Basile (P), Saint-Basile-Sud (VL), Saint-Casimir (SD), Saint-Casimir (P), Sainte-Christine-d'Auvergne (SD), Sainte-Jeanne-de-Pont-Rouge (P), Saint-Gilbert (P), Saint-Léonard-de-Portneuf (SD), Saint-Marc-des-Carières (VL), Saint-Raymond (V), Saint-Raymond (P), Saint-Thuribe (P) et Saint-Ubalde (SD) (Répertoire des municipalités, 1994). Dernièrement, six municipalités se sont fusionnées, soit celles de Pont-Rouge et Sainte-Jeanne-de-Pont-Rouge, Saint-Raymond Village (V) et Saint-Raymond Paroisse (P) ainsi que Neuville et Pointe-aux-Trembles.

6: P: Paroisse; SD: Sans Désignation; V: Ville; VL: Village, NO: Territoire Non-

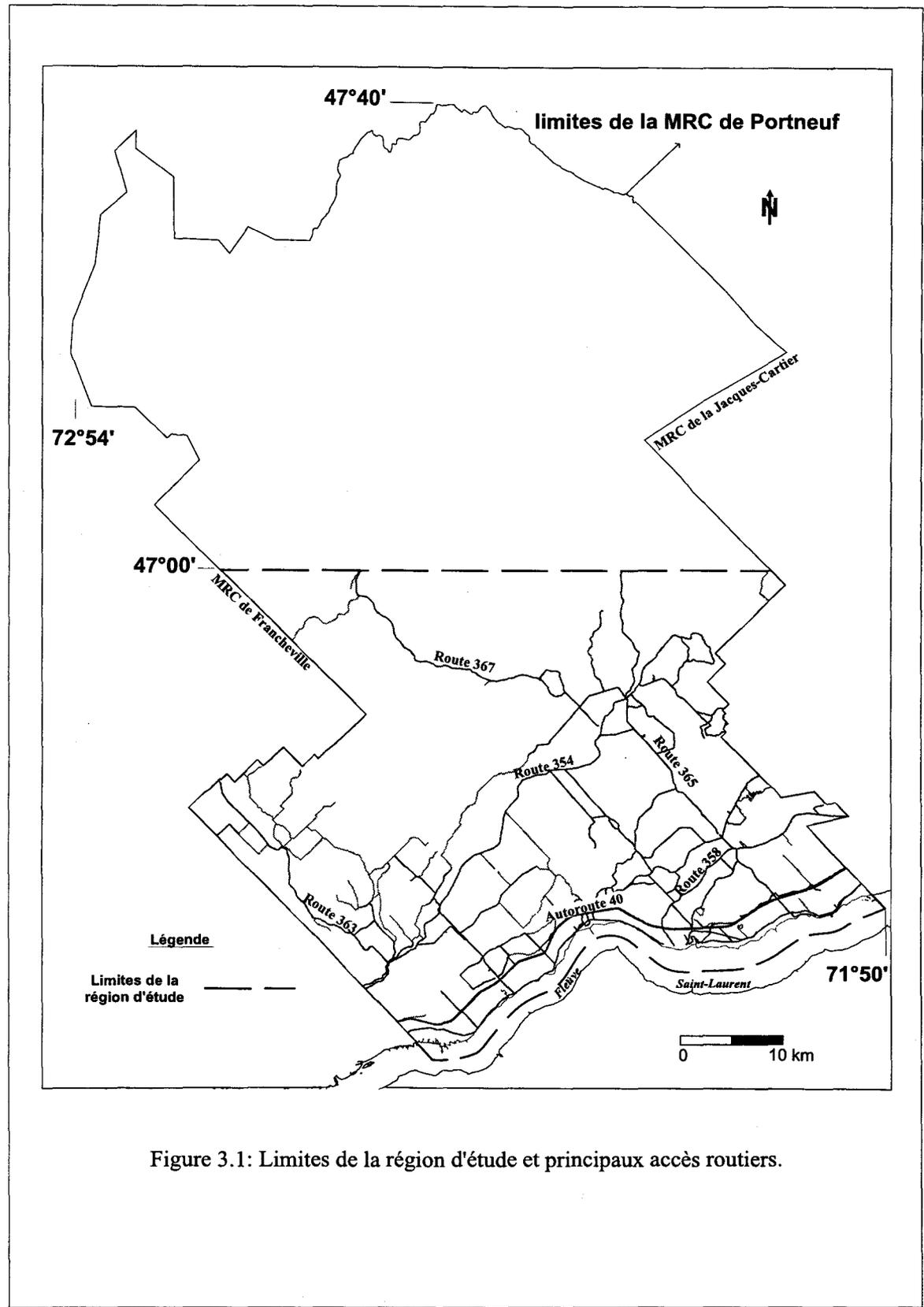


Figure 3.1: Limites de la région d'étude et principaux accès routiers.

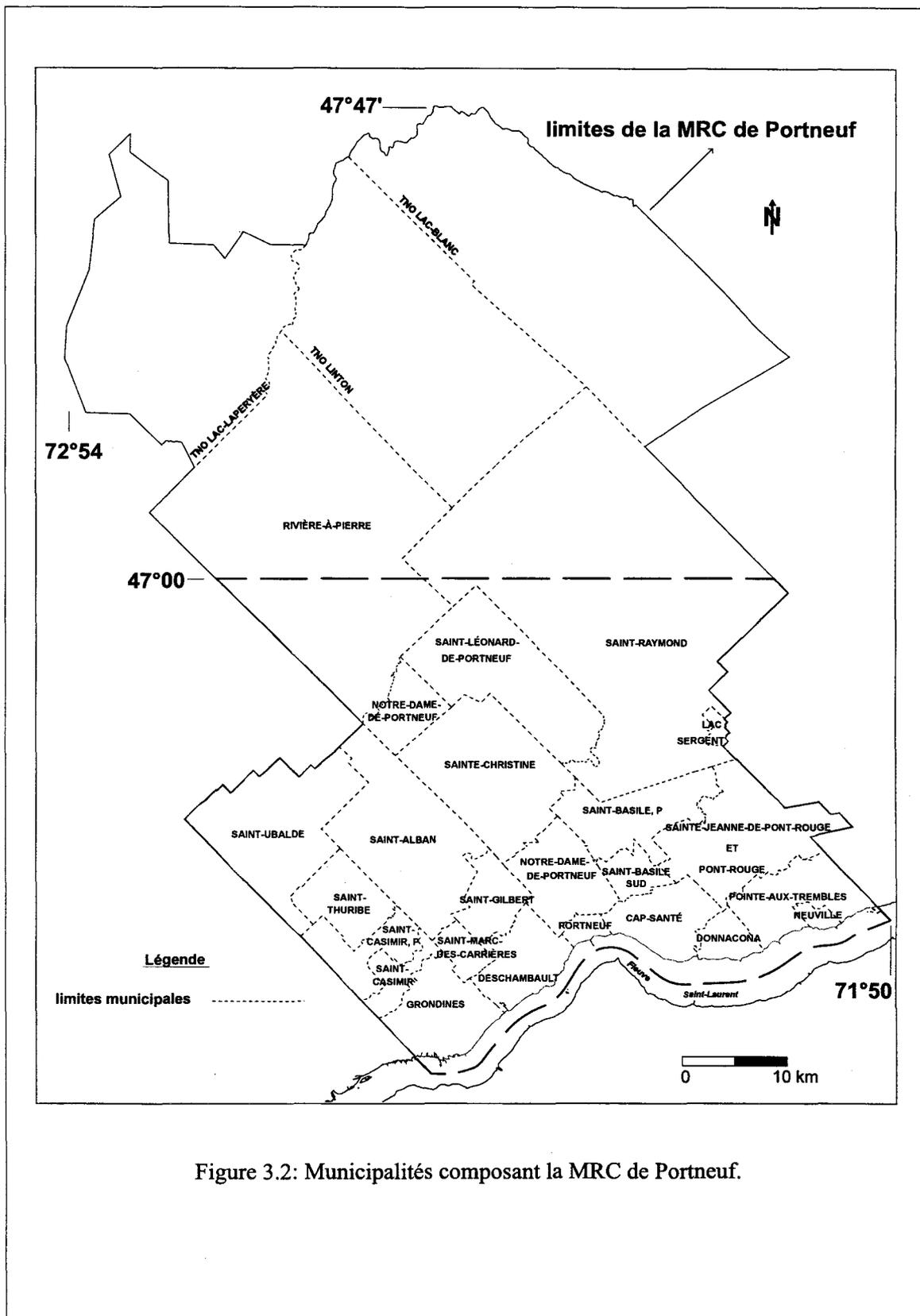


Figure 3.2: Municipalités composant la MRC de Portneuf.

3.2 Physiographie

Le territoire de la région d'étude occupe deux régions physiographiques bien distinctes qui sont les Basses-Terres du Saint-Laurent⁷ et les Laurentides. Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont caractérisées par un relief plat ou ondulé alors que la région des Laurentides se distingue par son relief montagneux. Ces deux régions physiographiques sont illustrées à la figure 3.3 ainsi que sur la carte présentée à l'Annexe B. Dans le secteur ouest de la MRC, la limite entre ces deux régions correspond à un contact de faille séparant les roches cristallines du précambrien des roches sédimentaires du Paléozoïques. Cependant, pour tout le reste de la région d'étude, la limite physiographique entre la région des Basses-Terres du Saint-Laurent et celle des Laurentides va au-delà de cette limite géologique. Les sédiments quaternaires qui recouvrent cette limite contribuent à adoucir le relief montagneux des roches ignées et métamorphiques.

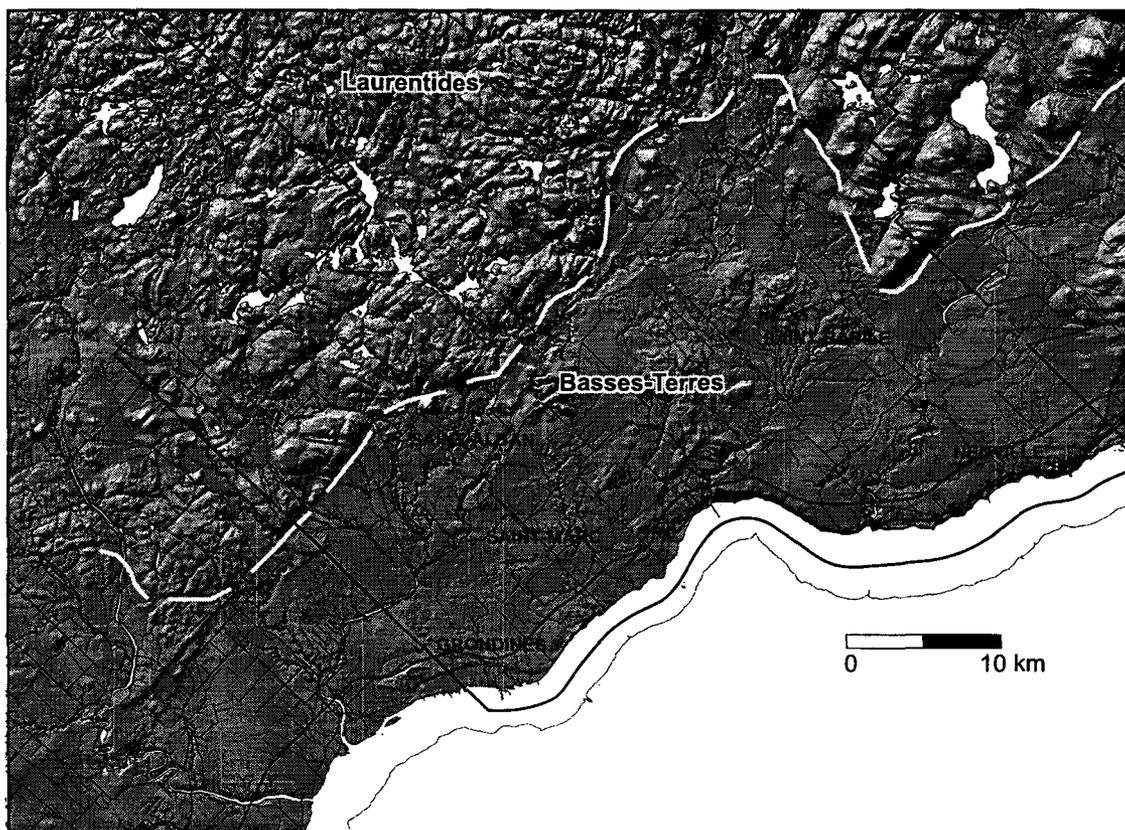


Figure 3.3: Régions physiographiques présentes dans la MRC de Portneuf.

7 : Le terme piémont laurentien est aussi utilisé dans le texte pour désigner la région physiographique des Basses-Terres du Saint-Laurent. L'utilisation du terme piémont laurentien est faite dans le but d'éviter la confusion entre les Basses-Terres du Saint-Laurent physiographiques et géologiques.

3.2.1 Basses-Terres du Saint-Laurent

Le relief à l'intérieur des Basses-Terres est peu accentué. Il y a par contre quelques exceptions venant briser la monotonie du paysage. Une aire montagneuse, constituée de roches précambriennes, est située au centre de la région ainsi que des dépôts de till et des anciens niveaux de plages qui forment plusieurs basses collines. Deux vastes plaines argileuses situées à Saint-Basile et dans les régions de Saint-Alban, Saint-Thuribe et Saint-Casimir sont caractéristiques du territoire et sont marquées par de nombreuses falaises et ravins en bordure des rivières qui les drainent. Quelques affleurements de roches sédimentaires du Paléozoïque peuvent être rencontrés dans les secteurs de Grondines, Saint-Marc-des-Carières et Neuville, tandis que des affleurements de roches précambriennes sont trouvés au nord de Notre-Dame-de-Portneuf à l'intérieur de l'aire montagneuse.

Les sols reflètent de façon générale les assises géologiques sur lesquelles ils reposent. Dans le secteur des Basses-Terres du Saint-Laurent, les sols sont constitués de silt et d'argile lorsqu'ils sont situés à l'intérieur des plaines argileuses et des régions de tills recouvrant les roches sédimentaires. Les sols qui se sont développés sur les tills recouvrant les roches ignées et métamorphiques sont pour leur part plus grossiers et ont une composante plus importante de pierres. Les sols sableux sont principalement localisés le long des segments des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier.

Une grande partie de la plaine des Basses-Terres est recouverte par des terres agricoles. Les sols sableux sont particulièrement prisés pour la culture de pommes de terre, qui constitue d'ailleurs une des activités agricoles importantes de la région.

3.2.2 Laurentides

Les Laurentides se découpent du paysage par leur relief marqué. Le relief est essentiellement montagneux à l'exception de quelques terrains plats cantonnés à l'intérieur de petites vallées remplies de dépôts sablo-graveleux.

Étant donné le relief accidenté de cette région, l'activité agricole est peu développée sur ce territoire. La forêt, les granulats et les mines sont les principales ressources naturelles qui y sont exploitées et représentent les activités économiques prédominantes de ce secteur.

3.3 Hydrographie

Le territoire d'étude s'étale sur plus de cinq bassins hydrologiques qui sont, d'ouest en est : ceux de la Batiscan, de la Sainte-Anne, du fleuve Saint-Laurent, de la Portneuf et de la Jacques-Cartier. L'étendue et l'importance de chacun de ces bassins sont illustrées à la figure 3.4 ainsi que sur la carte présentée à l'Annexe B. Tous ces cours d'eau se déversent dans le fleuve Saint-Laurent à l'intérieur des limites de la MRC à l'exception des rivières Sainte-Anne et Batiscan qui le font dans la MRC voisine. La limite est du bassin versant de la rivière Batiscan est à peine comprise dans la région d'étude et pour cette raison, on n'en tiendra pas compte dans ce mémoire.

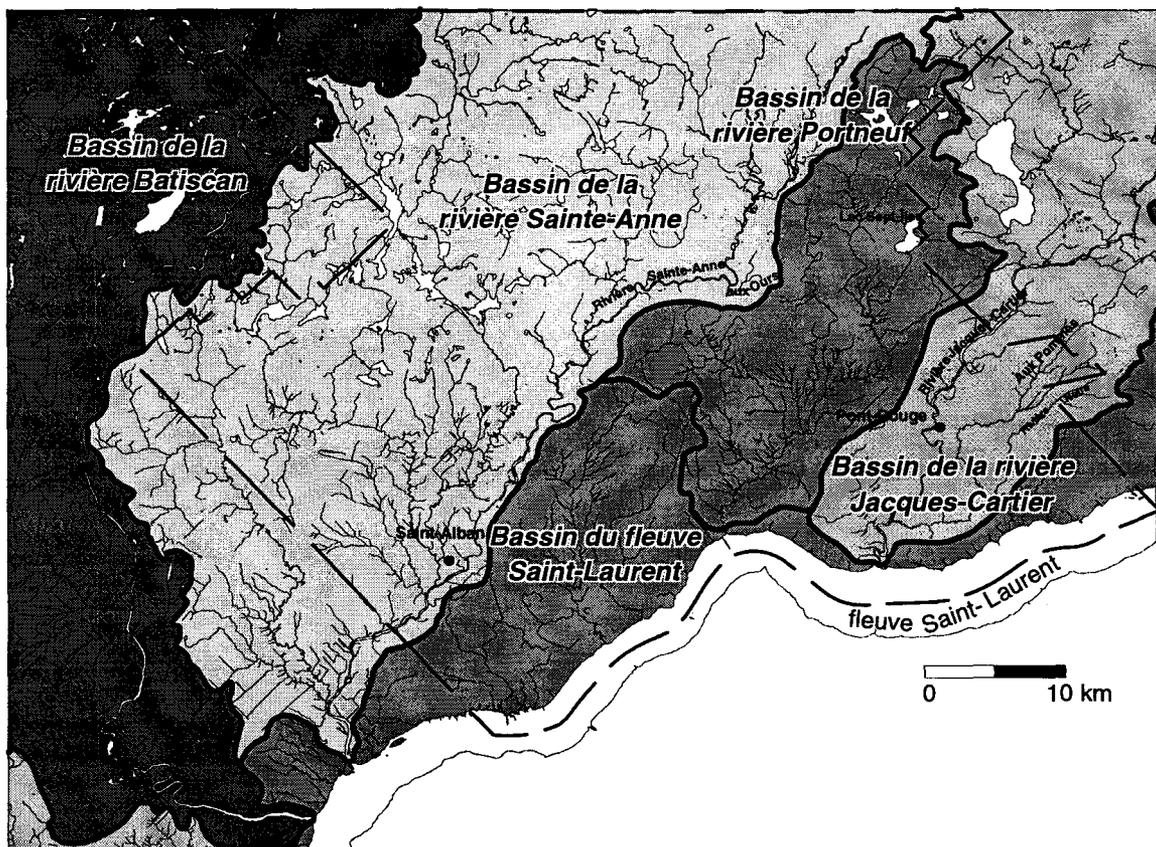


Figure 3.4: Bassins hydrologiques présents dans la région d'étude.

3.3.1 Bassin de la rivière Sainte-Anne

Comme on peut le constater à la figure 3.4, la rivière Sainte-Anne draine approximativement la moitié de la région d'étude. Ses principaux tributaires sont la Blanche, la Noire, la Jacquot, la Mauvaise, le Bras du Nord et la Sainte-Anne ouest. À partir de la limite nord de la zone d'étude jusqu'à la rivière aux Ours, la rivière Sainte-Anne sillonne une large vallée composée d'alluvions récentes et de terrasses. Ces alluvions contribuent à l'écoulement de base des divers ruisseaux effluents de la Sainte-Anne durant les périodes d'étiage. À l'intérieur de ce tronçon de la Sainte-Anne, les alluvions de terrasses surmontent une séquence de sables et graviers deltaïques recouvrant des silts et argiles marins. L'épaisseur de sables et graviers peut varier et, par endroits, la rivière entaille les silts et argiles ou même le socle rocheux.

De la rivière aux Ours jusqu'au village de Saint-Alban, la vallée se rétrécit graduellement et l'importance des dépôts alluvionnaires diminue. Les falaises et ravins qui bordent la vallée à ces endroits consistent en des séquences de silts et argiles marins surmontées de sables deltaïques. Des sources d'eau jaillissent au contact entre la séquence de silts et argiles marins et les sables et ruissellent le long des parois pour éventuellement aller se jeter dans la rivière Sainte-Anne. À l'intérieur de ce segment de la Sainte-Anne, l'eau coule principalement sur des roches cristallines, qui sont parfois recouvertes d'une mince couche d'alluvions récentes ou d'argiles. À partir de Saint-Alban elle se met à dévaler sur des roches sédimentaires du Paléozoïque.

3.3.2 Bassin du fleuve Saint-Laurent

Les rivières à Bélisle et Le Grand Bras sont les principaux cours d'eau qui drainent les terres comprises dans le bassin du Saint-Laurent. Ces cours d'eau ainsi que de nombreux petits ruisseaux se jettent directement dans le fleuve Saint-Laurent. La forme dendritique du réseau de drainage dans le secteur de Saint-Gilbert dénote la présence d'un substratum argileux près de la surface.

3.3.3 Bassin de la rivière Portneuf

La rivière Portneuf prend sa source dans le lac Sept-Iles. Ses principaux tributaires sont la Sept-Iles, la Chaude, la Saint-Jacques et la Blanche. La rivière Portneuf est encaissée dans les dépôts meubles qui, dans ce secteur, sont principalement constitués de silts et d'argiles marins. La forme dendritique du réseau de drainage du bassin de la Portneuf révèle justement la présence de cette couche imperméable à la surface. À plusieurs endroits, la rivière s'encaisse jusqu'au socle rocheux.

3.3.4 Bassin de la rivière Jacques-Cartier

La rivière Jacques-Cartier draine la partie sud-est de la région d'étude et reçoit les eaux de deux principaux tributaires qui sont la rivière aux Pommes et la rivière Noire. Le lit de la rivière Jacques-Cartier à partir de la limite est de la région d'étude jusqu'au village de Pont-Rouge est constitué d'une mince couche de sables et graviers deltaïques ainsi que d'alluvions qui reposent sur le socle rocheux. À quelques endroits, la couche d'alluvions disparaît et la rivière s'écoule sur les roches ignées et métamorphiques. À partir de Pont-Rouge, la rivière s'encaisse dans les roches sédimentaires et ce jusqu'à son embouchure. Sur la majorité de son parcours, la rivière aux Pommes est encaissée faiblement dans les sédiments quaternaires, qui sont principalement des sables et graviers à l'exception d'un petit segment tout près de l'embouchure de la Jacques-Cartier où elle entaille les silts et argiles marins ainsi que le socle rocheux par endroits.

3.4 Hydrologie

L'eau contenue à l'intérieur des formations géologiques provient des eaux de précipitation et de la fonte des neiges. Au Québec, il est généralement reconnu que des quantités équivalentes entre 100 mm et 300 mm d'eau par année s'infiltrent à travers le sol pour aller réalimenter les aquifères. Cette quantité d'eau correspond, de façon approximative, à 10% et 30% de la quantité totale des précipitations annuelles dans le secteur des Basses-Terres. La recharge des aquifères a lieu principalement au printemps et un peu à l'automne. Ceci est dû au fait que l'évapotranspiration durant ces périodes est minimale tandis que l'apport d'eau est important. Durant la période hivernale (décembre à mars) la majeure partie

des précipitations se fait sous forme de neige. Par conséquent, durant cette période, l'infiltration est minimale.

La quantité d'eau qui s'infiltré dépend de la perméabilité des unités géologiques situées en surface et de la pente générale du terrain. Ainsi, la recharge est moindre dans les endroits en pente couverts par des dépôts argileux tandis qu'elle est à son maximum dans les terrains plats constitués de sables et graviers. Les formations géologiques enfouies sont réalimentées à partir des dépôts qui les couvrent. Ainsi une formation rocheuse sous-jacente à des dépôts de sables et graviers obtiendra de bonnes quantités d'eau annuellement. À l'opposé, la recharge des aquifères compris dans les formations rocheuses recouvertes par des dépôts argileux sera moindre étant donné les faibles valeurs de perméabilité de ces dépôts.

Pour caractériser la recharge des aquifères, on doit tenir compte des valeurs de précipitations et du potentiel d'évapotranspiration pour une région ainsi que du type de sols qui conditionne le ruissellement. L'équation du bilan hydrologique résume ces paramètres :

$$P = ET + R + IE \quad (3.1)$$

P: Précipitation
ET: Évapotranspiration
R: Ruissellement
IE: Infiltration efficace (Recharge)

Plus de 12 stations météorologiques sont disponibles dans le secteur de la MRC de Portneuf. La localisation de ces stations est représentée à la figure 3.5.

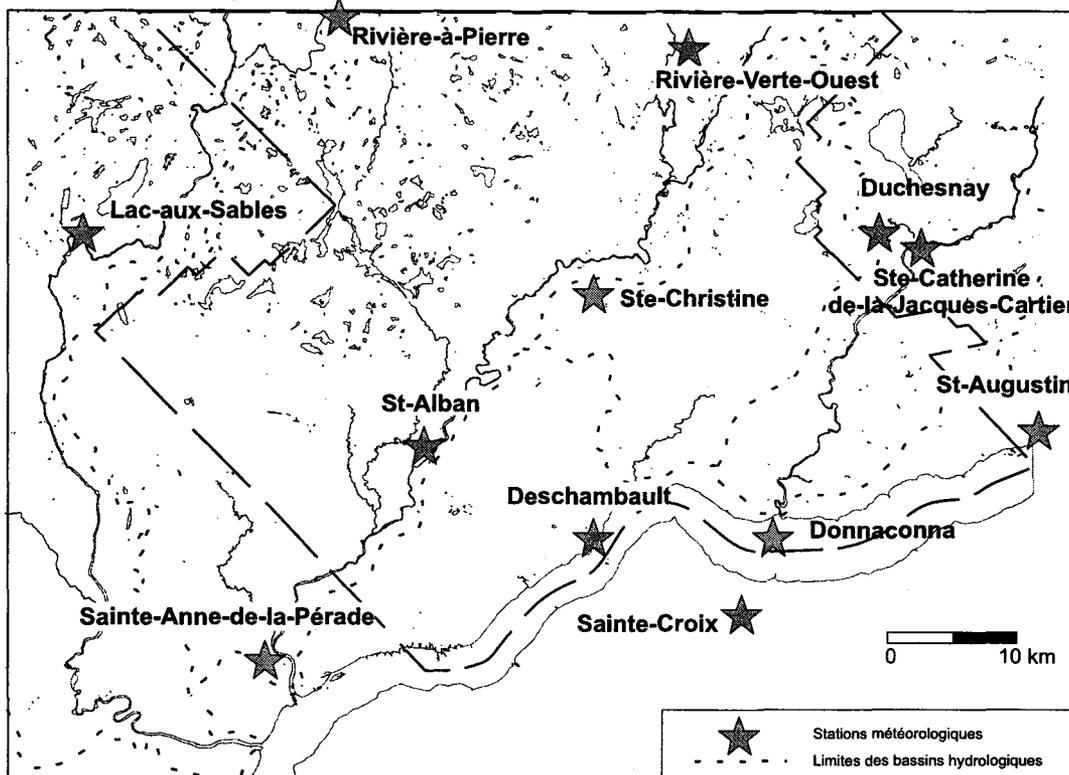


Figure 3.5: Localisation des stations météorologiques dans la région d'étude.

Les données climatiques qui caractérisent la région d'étude sont présentées à la figure 3.6. Les valeurs moyennes annuelles de la précipitation totale (neige et pluie) et de l'évapotranspiration potentielle calculées sur une période de 30 ans aux 12 stations météorologiques sont de 1190 mm et 530 mm respectivement.

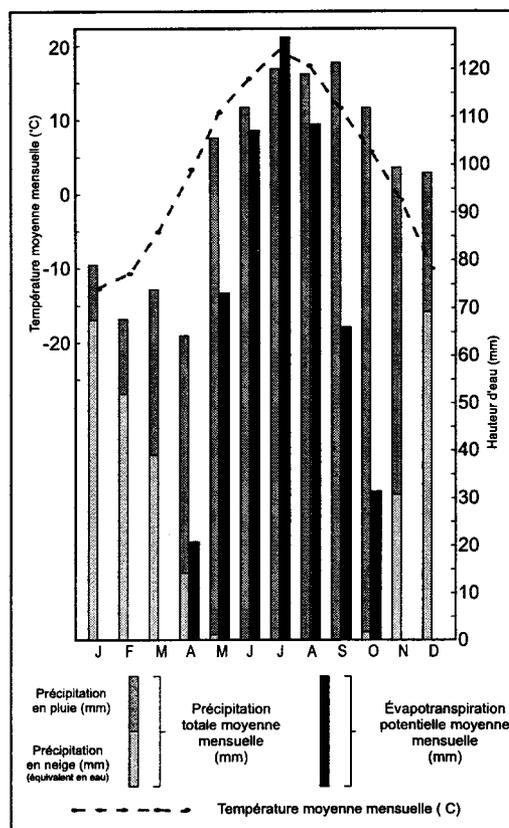


Figure 3.6 : Données climatiques moyennes pour la région d'étude.

3.5 Géologie

Le substrat rocheux dans le secteur de la MRC consiste en deux grands types de roches qui sont les roches ignées et métamorphiques de la Province géologique du Grenville et les roches sédimentaires d'âge Paléozoïque de la Province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent. Allant du fleuve jusqu'à la lisière sud des Laurentides, la majorité du socle est recouvert par une couverture de dépôts quaternaires. La description de ces roches et des dépôts ainsi que leur répartition géographique sur le territoire sont basées sur les travaux de Clark et Globensky (1973, 1975) et les travaux de cartographie des formations superficielles qui ont été récemment effectués par la CGC-Québec (Cloutier et al., 1997).

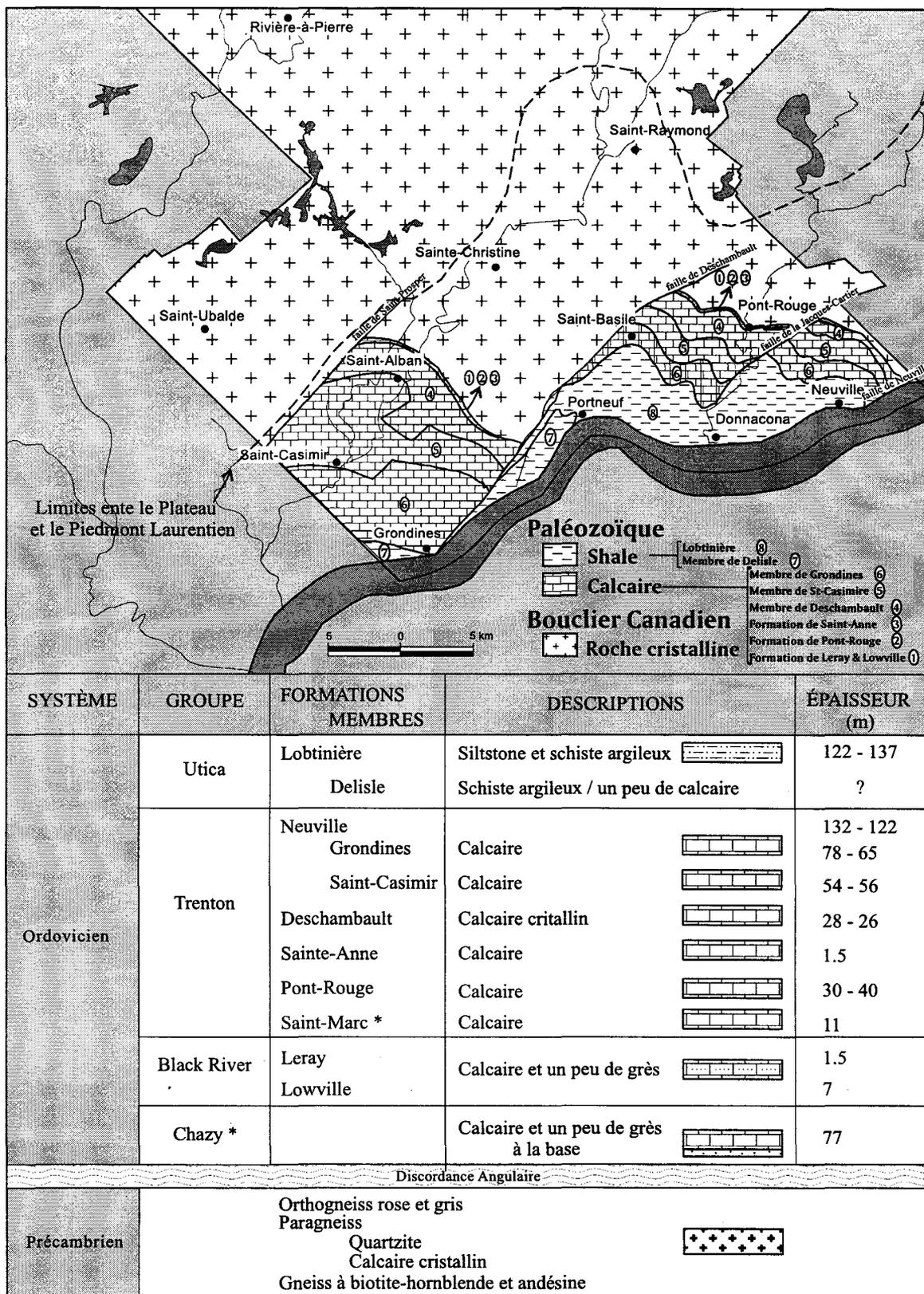
3.5.1 Substrat rocheux

La figure 3.7 ainsi que la carte à l'Annexe C montrent la répartition des différentes formations rocheuses dans le secteur d'étude ainsi que la séquence stratigraphique dans laquelle on les retrouve. Les roches ignées et métamorphiques de la province du Grenville sont d'âge précambrien et constituent les plus vieilles formations rocheuses rencontrées dans le secteur d'étude. On peut les voir affleurer à partir de l'escarpement marquant le début des Laurentides ainsi qu'en quelques endroits à l'intérieur de la plaine des Basses-Terres. Les roches ignées et métamorphiques se prolongent en dessous des roches sédimentaires du Paléozoïque.

Le principal type de roche qui caractérise les formations précambriennes est le gneiss granitique gris. Par contre, d'autres types de roches sont présents dans la région de Portneuf. Entre autres, on reconnaît la présence de gabbro, de dykes de pegmatite et de granite rose. Dans la région de Grondines, des paragneiss, des quartzites et des calcaires cristallins ont aussi été cartographiés.

Des diaclases faiblement inclinées sont présentes dans les roches ignées et métamorphiques mais la structure la plus importante qui affecte ces roches sont des failles normales d'orientation sud-ouest nord-est. Quatre failles majeures de ce type sont reconnues dans la région d'étude, soit celles de Saint-Prosper, de Deschambault, de la Jacques-Cartier et de Neuville. Les deux premières failles définissent la limite entre les roches précambriennes et les roches sédimentaires du Paléozoïque alors que les deux dernières marquent principalement une zone de mouvement séparant les roches sédimentaires.

Les roches du Paléozoïque dans la région d'étude sont constituées d'une séquence sédimentaire comprenant à la base des calcaires du groupe de Chazy, de Black River, de Trenton et de Leray suivi par les schistes argileux du groupe d'Utica. Ces roches ont été déposées dans un environnement marin sur une plateforme continentale constituée de roches précambriennes. L'orogène taconique qui est à l'origine des Appalaches n'a presque pas affecté les roches sédimentaires qui sont situées à la hauteur de la MRC de Portneuf. Le



* : Rencontré dans les forages.

Figure 3.7: Géologie du socle rocheux (adaptée de Clark et Globensky, (1973, 1975)).

pendage régional de ces roches est de 1° à 2° vers le sud et des plis très ouverts tel que le synclinal de Portneuf et l'anticlinal de Cap-Santé marquent la région. C'est seulement le long des failles normales que les roches sédimentaires sont fortement inclinées et peuvent même être à la verticale. Ceci est le résultat des pressions qui les ont poussées contre les roches ignées et métamorphiques.

3.5.2 Sédiments quaternaires

En Amérique du Nord, la période du Quaternaire est marquée par le début de plusieurs glaciations qui ont donné lieu à la mise en place de nombreux dépôts glaciaires. Les formes de terrain que l'on peut observer aujourd'hui sont donc en grandes parties attribuables à l'action des glaciers et des processus associés et pour cette raison l'étude de ces dépôts revêt une importance particulière. Les dépôts du dernier épisode glaciaire et de la déglaciation qui s'en suivie occupent un espace prépondérant dans le paysage québécois. Pour cette raison, la discussion qui suit portera principalement sur la description de ce dernier événement (Parent et Ochiatti (1988) ; Parent (comm.pers.)). Celle-ci est illustrée à la figure 3.8.

Lors du dernier épisode de déglaciation, une vaste étendue d'eau, la Mer de Champlain, a recouvert une grande partie des terres situées au sud du Québec. Cette Mer post-glaciaire a permis la sédimentation de séquences silteuses et argileuses parfois très épaisses au-dessus des dépôts glaciaires plus anciens et du socle rocheux. Une phase de refroidissement temporaire est cependant venue freiner l'incursion de la Mer de Champlain jusqu'à son niveau maximal. Cette période froide qui serait attribuable au Drefas inférieur (Parent, comm.pers.) a permis la réavancée du glacier, lequel événement a donné lieu à la mise en place de la moraine frontale de Saint-Narcisse. Le retour à des températures plus élevées a par la suite permis à la Mer de Champlain de poursuivre sa transgression terrestre, et ce, jusqu'à un niveau maximal qui correspond approximativement à une altitude de 210 m pour la région de Portneuf. C'est durant cette période d'étendue maximale que d'importants dépôts de sables et graviers deltaïques ont commencé à se former à l'embouchure des rivières principales se jetant dans le bassin occupé par la Mer de Champlain. D'autres dépôts de

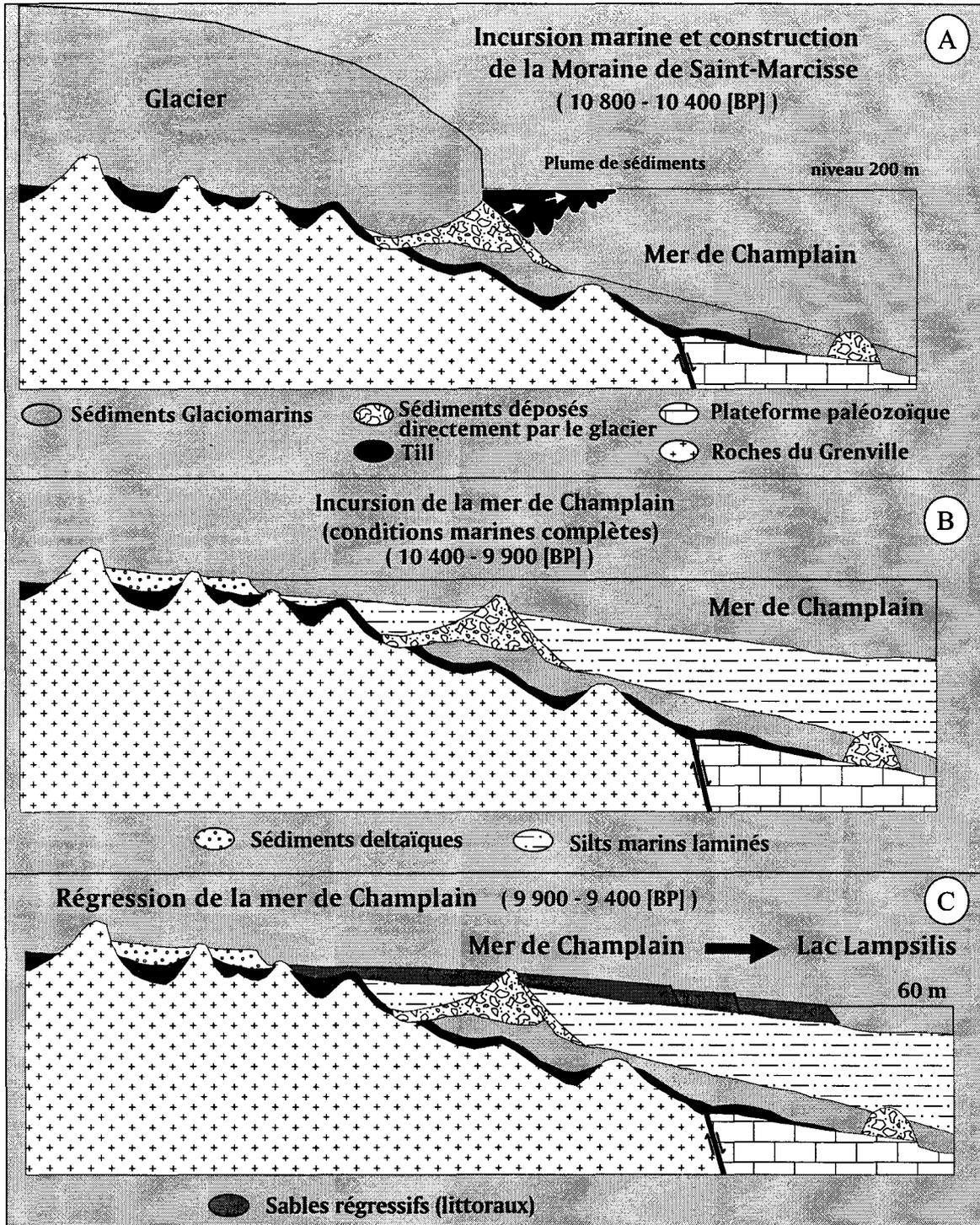


Figure 3.8. Représentation schématique des principales étapes de déglaciation de 10 800 BP à aujourd'hui qui a donné lieu à la mise en place des nombreux dépôts sédimentaires que l'on retrouve dans le sud du Québec ; A) incursion marine et construction de la Moraine de Saint-Narcisse ; B) incursion maximale de la Mer de Champlain et sédimentations de silts et argiles marins ainsi que des sables deltaïques ; C) retrait de la mer de Champlain et mise en place des sables littoraux. À 60 mètres les conditions qui règnent dans le bassin sont celles d'un lac d'eau douce (Lac Lampsilis) (Parent, données inédites).

sables et graviers se sont aussi formés le long des côtes alors présentes aux abords de cette Mer. Le relèvement isostatique suivant le retrait des glaciers explique le retrait graduel de la Mer de Champlain. Cet épisode est marqué par la mise en place de sables littoraux et du début d'une période d'érosion. À l'altitude de 60 mètres environ, les conditions marines de la Mer de Champlain évoluèrent vers des conditions d'eau douce. Le bassin d'eau douce formé à ce moment est communément appelé le Lac à Lampsilis (Parent et Ochietti, 1988).

Le retrait graduel de la Mer de Champlain jusqu'aux conditions que l'on connaît aujourd'hui s'est accompagné d'événements érosionnels. Les dépôts deltaïques ainsi que les argiles marines et les roches précambriennes et paléozoïques ont été érodés par les systèmes fluviaux. De façon simultanée, des alluvions ont été déposées le long des cours d'eau. Aujourd'hui, l'érosion du socle rocheux et la sédimentation d'alluvions récentes sont des processus qui sont toujours actifs. Un schéma représentant l'architecture que forme l'ensemble des dépôts quaternaires tels qu'on les retrouve aujourd'hui est présenté à la figure 3.9.

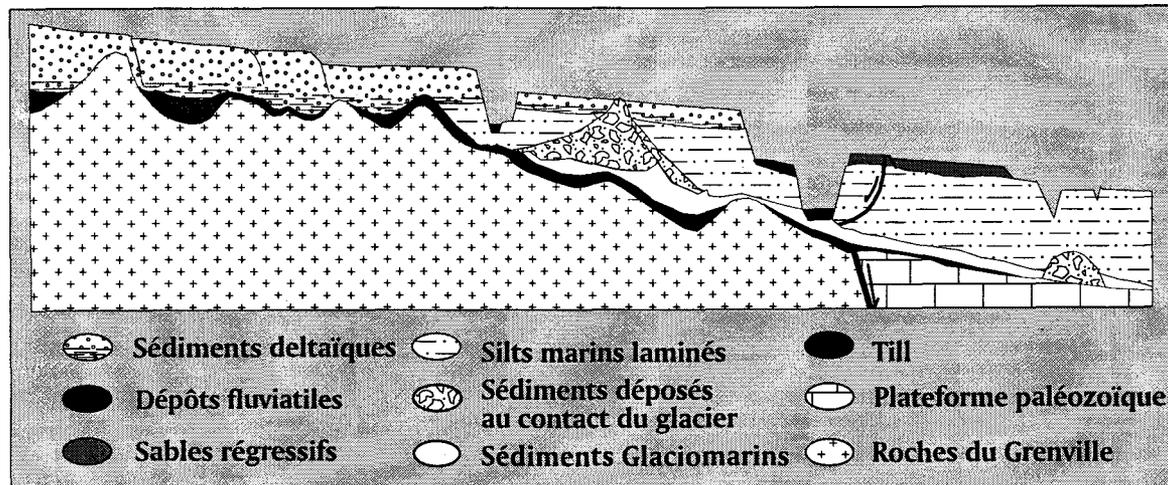


Figure 3.9 : Architecture actuelle des sédiments quaternaires dans la région de Portneuf (Parent *et al.*, 1997).

Les dépôts quaternaires que l'on retrouve dans la région de Portneuf sont donc des diamictons comprenant les tills de fond, d'ablation et la moraine de Saint-Narcisse ainsi que des dépôts fluvioglaciaires. Ces dépôts sont surmontés par les silts et argiles marines de la Mer de Champlain suivit des sédiments deltaïques et littoraux ainsi que des dépôts d'origine alluviale des basses et hautes terrasses. La séquence de déposition des dépôts meubles ainsi que leur distribution dans la MRC de Portneuf sont présentées à l'Annexe D. Une description plus détaillée de chacun des dépôts quaternaires est donnée dans les sections suivantes.

3.5.2.1 Sédiments glaciaires : Tills et Moraine de Saint-Narcisse

La carte du quaternaire (Annexe D) permet de distinguer quatre types de sédiments glaciaires, soit : le till en couverture discontinue (Tv), le till en couverture généralement continue (T), le till remanié (Tr/Tvr) et la moraine frontale de Saint-Narcisse (GxT). Le till en couverture discontinue est un diamicton composé presque exclusivement de faciès d'ablation dont l'épaisseur est généralement inférieure à 1 m. Cette unité se retrouve principalement sur les roches ignées et métamorphiques des Laurentides ainsi qu'en certains endroits où ces roches affleurent dans le secteur des Basses-Terres. Le till en couverture généralement continue est un diamicton qui contient des faciès de fond et d'ablation et qui a une épaisseur supérieure à 1 m. Cette unité dans la région d'étude se retrouve principalement à l'intérieur des vallées des Laurentides. Le till remanié est un diamicton qui se situe sous la limite maximale de la Mer de Champlain et qui comprend des niveaux stratifiés sablo-graveleux résultant du remaniement par les vagues et les courants. L'annotation «v» permet de distinguer les tills remaniés de faibles épaisseurs à travers lequel le roc affleure par endroits. La composition des tills de fond et d'ablation est intimement liée à la roche mère qui était sous-jacente au glacier lors de leur mise en place. Ainsi, les tills qui couvrent les roches ignées et métamorphiques sont généralement composés de cailloux et blocs d'origine précambrienne contenus dans une matrice plutôt sablonneuse, alors que les tills que l'on retrouve au-dessus des roches sédimentaires du paléozoïque contiennent principalement des cailloux et blocs d'origines sédimentaires qui sont contenus dans une matrice plus fine, contenant typiquement 55 % de sable, 26 % de silt et 19 % d'argile (Landry et Mercier, 1986). La moraine de Saint-Narcisse a été mise en place au front du

glacier, lors d'une phase temporaire de refroidissement, et est constituée de till, de diamicton, de blocs ainsi que de sables et graviers formant une bande semie-continue, à plusieurs crêtes. La moraine traverse la MRC de Portneuf du sud-ouest au nord-est. Son expression en surface ne fait pas plus de 500 mètres de largeur et son épaisseur n'est pas bien connue. Les sables deltaïques dans la région de Saint-Raymond et les argiles marines dans les secteurs de Saint-Alban la recouvrent presque entièrement laissant seulement traverser ses crêtes.

3.5.2.2 Sédiments fluvioglaciaires

Les dépôts fluvioglaciaires ont été mis en place par les eaux de fonte au contact ou à proximité du glacier. Trois types de sédiments fluvioglaciaires sont identifiés dans la région d'étude, soit : les sédiments juxtaglaciaires (Gx), les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Gs) et les sédiments d'épandage proglaciaire subaérien (Go). Les sédiments d'épandage proglaciaire subaérien sont constitués de sables, graviers et blocs et forment des dépôts de 1 à 20 m d'épaisseur. La granulométrie de ces dépôts diminue généralement vers l'aval reflétant la diminution de l'énergie des courants qui les ont transportés. Les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique ont été déposés en eaux peu profondes au bout de tunnels sous-glaciaires ou intraglaciaires débouchant dans la Mer de Champlain ou dans un lac proglaciaire. Ils se composent de sables et de sables silteux, avec un peu de graviers et forment des amas de 1 à 20 m d'épaisseur. On peut voir ces deux types de dépôts affleurer en plusieurs endroits dans les secteurs des Laurentides, principalement dans le creux des vallées. Les dépôts les plus fréquemment rencontrés sont ceux d'épandage proglaciaire subaérien. Même si leur présence est soupçonnée dans les Basses-Terres sous les sédiments argileux, leur étendue et localisation restent à ce jour encore inconnues. Les sédiments juxtaglaciaires sont composés de sables, graviers et blocs et à l'occasion de till ou de diamicton. Ces sédiments forment des eskers, des kames et des crêtes morainiques qui peuvent atteindre plus de 40 m d'épaisseur. Ces dépôts se retrouvent concentrés dans le creux des vallées des Laurentides ainsi qu'en bordure de la Moraine de Saint-Narcisse dans le secteur nord de la région d'étude.

3.5.2.3 Sédiments marins

Les sédiments marins ont été mis en place lors de l'épisode de la Mer de Champlain. Ils comprennent des silts et argiles qui ont été déposés en eau profonde ainsi que des sables et graviers littoraux, pré-littoraux et deltaïques.

3.5.2.3.1 Sédiments fins d'eau profonde

Les sédiments d'eau profonde sont formés principalement de silt et d'argile qui forment des dépôts massifs, laminés ou stratifiés. Ils ont été déposés sur les unités quaternaires plus anciennes, constituées principalement de tills, ou directement sur le socle rocheux. L'épaisseur de l'argile est variable tout dépendant de l'endroit où elle se trouve dans le bassin. À certains endroits, tel qu'au pourtour d'affleurements de tills, la couche d'argile peut être très mince variant de 1 à 5 mètres, alors que dans certains secteurs tels qu'à Saint-Casimir, des données de forages indiquent des épaisseurs d'argile pouvant aller jusqu'à 70 mètres. En surface, on peut voir l'argile affleurer dans les secteurs de Saint-Basile, Saint-Alban, Saint-Gilbert et Grondines. Dans les autres secteurs, sa présence et son étendue en profondeur sous les sédiments deltaïques, littoraux et alluvionnaires peuvent être déduites à l'aide des photos aériennes ou en utilisant les descriptions de forages. En général, l'horizon argileux est l'une des unités géologiques les plus fréquemment rencontrées, en surface ou en profondeur. La limite marine dans le secteur d'étude a été établie entre 200 et 210 mètres et par conséquent aucun dépôt marin argileux n'est rencontré au-delà de cette altitude.

3.5.2.3.2 Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation

Les sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation se composent de sables, de silts sableux, de sables graveleux et de graviers stratifiés et généralement bien triés. Ces sédiments ont été mis en place en eaux peu profondes sur les argiles marines. L'épaisseur de ces dépôts varie de 0.5 à 5 mètres. Ces dépôts séparent le plus souvent les sables deltaïques des argiles marines. Ils marquent la transition entre un environnement de déposition contrôlé par un système deltaïque et un environnement d'eau profonde.

3.5.2.3.3 *Sédiments deltaïques*

Les sédiments deltaïques sont principalement composés de sables, de sables graveleux et de graviers stratifiés et biens triés formant des dépôts de 1 à 40 mètres d'épaisseur. Ces sédiments ont été mis en place à l'embouchure des cours d'eau se déversant dans la Mer de Champlain. Ils reposent soit sur le till, le roc ou l'argile marine. Dans la MRC de Portneuf, les principaux dépôts deltaïques se trouvent en bordure des deux plus importantes rivières qui sont la Sainte-Anne et la Jacques-Cartier. Ils sont prédominant dans les secteurs nord et leur présence diminue graduellement vers le sud pour finalement disparaître au-delà du village de Saint-Alban et à mi-chemin entre le village de Pont-Rouge et la ville de Donnacona.

3.5.2.4 *Sédiments du lac Lampsilis*

Le lac Lampsilis est un bassin d'eau douce qui a succédé à la Mer de Champlain. Les dépôts associés à ce lac se retrouvent au sud-ouest de la région d'étude aux environs des municipalités de Saint-Marc-des-Carières, de Saint-Casimir et de Grondines. La transition des eaux saumâtres de la Mer de Champlain aux eaux douces du Lac Lampsilis est placée à l'altitude de 65 mètres. Les sédiments qui ont été mis en place dans ce bassin comprennent principalement des sables et graviers littoraux, pré-littoraux et deltaïques. Les sédiments deltaïques sont des sables et graviers bien triés qui forment des dépôts de 1 à 20 mètres d'épaisseur. Les sédiments littoraux et pré-littoraux se composent de sables, silts sableux, sables graveleux et graviers stratifiés et généralement bien triés. Leur épaisseur varie de 0.5 à 5 mètres.

3.5.2.5 *Sédiments Alluviaux*

Deux types de sédiments alluviaux sont distingués, soit : les alluvions récentes formant les barres et levées des plaines de débordement actuelles, et les alluvions des terrasses qui ont été mises en place lors de l'incision post-glaciaire des cours d'eau dans les formations quaternaires.

3.5.2.5.1 Alluvions des terrasses fluviales

Les alluvions des terrasses prédominent par rapport aux alluvions récentes. Ces alluvions sont composées de sables, silt sableux, sables graveleux et graviers et contiennent peu de matières organiques. Dans le nord de la région, longeant les vallées de la rivière Sainte-Anne et Jacques-Cartier, les alluvions des terrasses forment une mince couche de 1 à 2 mètres, pouvant à l'occasion aller jusqu'à 5 mètres d'épaisseur, qui couvre les sédiments deltaïques. En descendant plus au sud le long de la rivière Sainte-Anne, les alluvions recouvrent directement les argiles, et ce jusqu'à la Pérade. Du côté de la Jacques-Cartier, lorsque la couche de sédiments deltaïques est absente, les alluvions peuvent surmonter le socle rocheux ou l'argile. Les alluvions des terrasses sont aussi présentes le long du fleuve et témoignent de la présence d'anciens chenaux du proto Saint-Laurent. Elles consistent en de minces couches de sables silteux couvrant le roc qui à cet endroit est composé de roches sédimentaires du Paléozoïque.

3.5.2.5.2 Alluvions actuelles

Les alluvions récentes sont constituées de sables, silt sableux, sables graveleux et graviers et contiennent fréquemment de la matière organique. Leur épaisseur varie de 0.5 à 3 mètres. On les rencontre principalement le long de la rivière Sainte-Anne dans sa partie nord, le long du fleuve Saint-Laurent dans la région de la Pérade et Grondines ainsi que de façon très mineure le long de la Jacques-Cartier.

3.5.2.6 Dépôts organiques

Les dépôts organiques sont composés de tourbes, débris végétaux et humus et leur épaisseur varie de 0.3 à 4 mètres. On les retrouve dispersés un peu partout dans la région, surmontant les alluvions des terrasses, le till, le roc ainsi que les sédiments pré littoraux, littoraux et d'exondation. Ils occupent les délaissés, les creux topographiques et les territoires qu'occupaient d'anciens lacs.

3.6. Hydrogéologie

Le contexte hydrogéologique de la MRC de Portneuf est discuté dans les paragraphes suivants de façon préliminaire. Les formations aquifères et aquitards sont identifiées, accompagnées d'une brève discussion sur la vulnérabilité à la contamination des différentes formations aquifères ainsi que d'un aperçu des conditions de l'écoulement de l'eau souterraine à l'intérieur de celles-ci.

Comme défini au chapitre 2, un aquifère est une formation géologique possédant de bonnes capacités d'emmagasinement et pouvant transmettre des quantités d'eau appréciables, suffisantes pour l'alimentation économique d'une famille à l'aide d'un puits ou d'une source. Ce potentiel aquifère dépend en grande partie de la texture des sédiments et de la fracturation des roches. Ces deux caractéristiques serviront à classer de façon préliminaire, les roches et sédiments en tant que formations aquifères ou aquitards.

Dans la MRC de Portneuf, les formations géologiques qui satisfont à la définition d'aquifères, en tenant compte des critères texturaux et structuraux, sont les roches calcaires du paléozoïque, les sables et graviers d'origines deltaïque et littorale (prélittorale et d'exondation) ainsi que les sédiments fluvioglaciers.

Les formations aquitards sont les argiles de la mer de Champlain ainsi que le till surmontant les roches paléozoïques. L'argile constitue la principale unité aquitard pour toute la région d'étude et protège les formations sous-jacentes de l'infiltration des contaminants. Son pouvoir protecteur est proportionnel à son épaisseur et à sa cohésion. Le till couvrant les roches paléozoïques est généralement considéré comme aquitard étant donné la proportion importante de particules fines qu'il contient. Par contre, en certains endroits, la proportion de sable qu'il renferme peut être plus importante, et à ce moment le till peut servir d'aquifère. Ainsi, les conditions de la nappe dans les formations aquifères qui sont sous-jacentes aux tills du Paléozoïque peuvent aller de libres, à semi-captives et captives, tout dépendant de l'épaisseur, de la texture ainsi que de l'étendue des dépôts de tills. Il est important de tenir compte du fait que des fractures dans le till et celles que l'on peut

retrouver dans les premiers mètres des séquences d'argiles marines peuvent grandement augmenter la perméabilité de ces dépôts. Par conséquent, idéalement, des relevés de terrains seraient souvent nécessaires pour confirmer la présence ou l'absence de ces fractures.

Les formations telles que les roches ignées et métamorphiques, le schiste argileux, le till couvrant les roches précambriennes, la moraine de Saint-Narcisse et les alluvions récentes et de terrasses ne constituent pas dans leur ensemble de bonnes formations aquifères. Ceci est en grande partie attribuable aux faibles valeurs de la perméabilité dans le cas des roches ignées et métamorphiques, des schistes argileux et des dépôts de till (de fond et morainique). Le principal obstacle à l'exploitation des alluvions récentes et des terrasses à des fins d'approvisionnement municipales est dû à leur faible épaisseur et à leur étendue parfois limitée. Par contre, à l'intérieur de tous ces dépôts, des zones de haute perméabilité ou de plus grande épaisseur peuvent être rencontrées localement ce qui fait que ces formations géologiques, tout dépendant des conditions locales, peuvent subvenir de façon suffisante à l'alimentation de puits desservant de très petites populations. Dans le cas où ces zones de haute perméabilité ne sont pas rencontrées, une modification peut être apportée aux systèmes de captages conventionnels pour permettre le captage d'eau en quantités suffisantes. Cette modification consiste à approfondir le puits pour qu'il puisse servir de réservoir. Ce plus grand volume d'eau disponible préviendra les pénuries d'eau lors de demandes de pointes. Ces techniques sont surtout utilisées pour l'approvisionnement domestique dans le cas d'un puits aménagé dans les roches ignées et métamorphiques.

3.6.1 Principaux utilisateurs d'eau souterraine

Plus de 85% de la population de la MRC de Portneuf s'approvisionne à partir des eaux souterraines. Seulement deux municipalités, soient Donnacona et Saint-Casimir (SD), s'approvisionnent à partir des eaux de surface. Le tableau 3.3 contient la liste des municipalités qui sont desservies par une ou plusieurs prises d'eau municipales, le nombre d'individus qui sont desservis par ces systèmes de captage et les quantités approximatives d'eau qui sont pompées. Le type et la localisation de ces prises d'eau sont montrés à la figure 3.10. Les résidents qui ne sont pas desservis par ces réseaux obtiennent leur eau à partir de

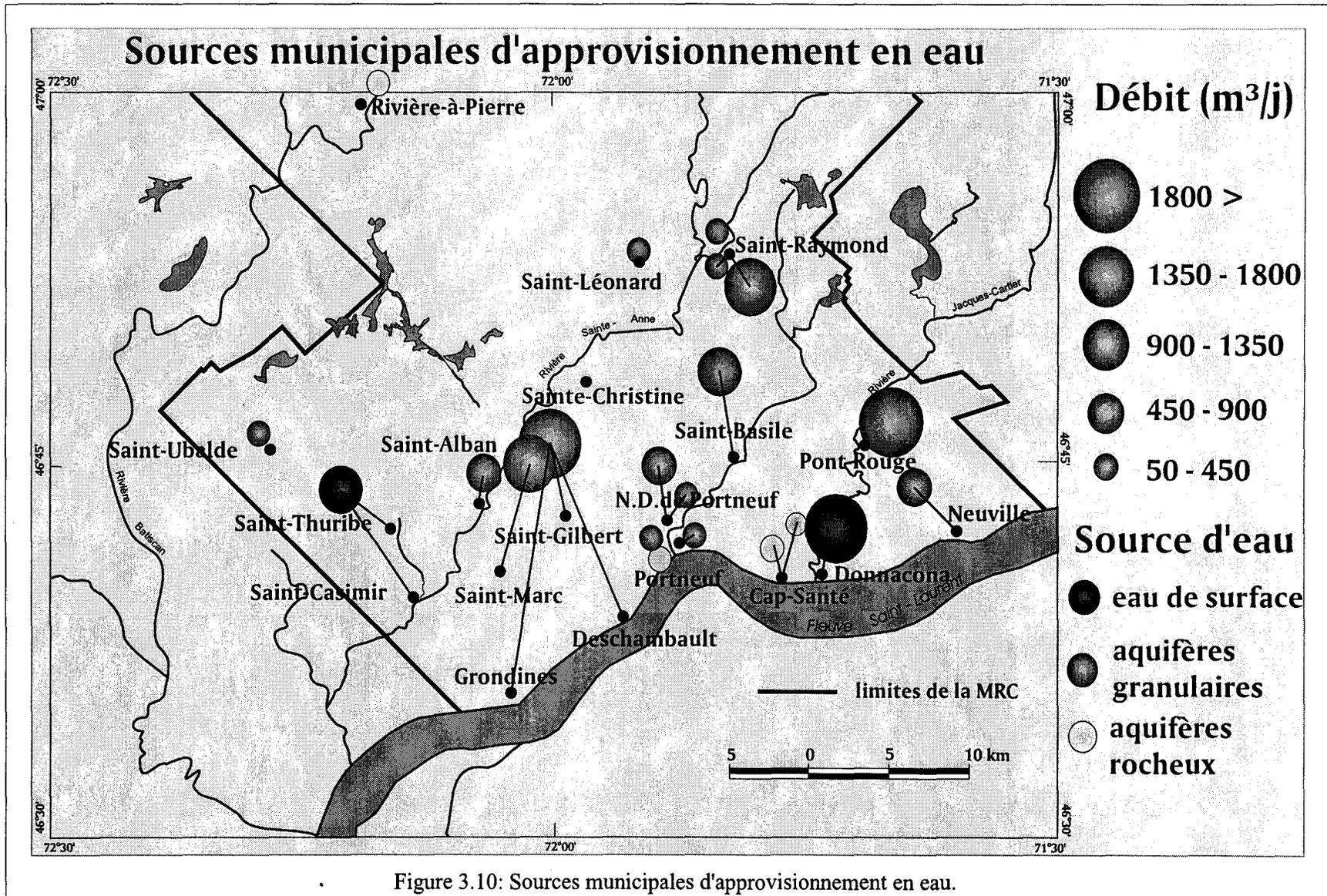
puits individuels (tubulaires ou de surface) ou par l'entremise d'aqueducs privés que nous n'avons pu répertorier.

La majorité des réseaux d'aqueducs municipaux puisent leur eau des formations aquifères situées dans les dépôts meubles (voir figure 3.10). L'eau de ces aquifères est pompée soit à partir de puits crépinés ou à partir de systèmes de captages de sources. Ces aquifères sont non seulement les plus exploités mais aussi les plus productifs de la région. Les débits moyens pompés sont en général supérieurs aux débits provenant des prises d'eau captant les eaux des autres formations aquifères. Un certain nombre de municipalités utilise un système mixte de captage, par exemple la municipalité de Portneuf capte les eaux de trois aquifères à l'aide de trois systèmes de captages différents, soient : par des puits crépinés captant les eaux d'un aquifère situé dans les dépôts meubles (coté ouest de la rivière Portneuf), par l'entremise de systèmes de captages de sources aménagées dans les dépôts meubles situés du côté est de la rivière Portneuf, et par un puits d'appoint installé dans le socle rocheux qui est utilisé durant les périodes de fortes demandes d'eau. Seulement deux municipalités, soit Rivière-à-Pierre et Cap-Santé, s'approvisionnent exclusivement à partir de puits aménagés dans la roche en place. Le débit total moyen, mesuré ou estimé, des prises d'eau municipales est de l'ordre de 650 m³/jour. Le débit maximal pompé est de 2690 m³/j et se retrouve à la prise d'eau de Pont-Rouge, qui dessert plus de 4000 habitants, alors que le débit minimal pompé est de l'ordre de 43 m³/j et est rencontré à la prise d'eau de Saint-Léonard-de-Portneuf, qui dessert 525 habitants.

Tableau 3.1: Municipalité utilisant les eaux souterraines comme source d'eau potable.

Municipalité	Population	Superficie (km ²)	# Id / Prises d'eau municipales	Matériel aquifère	Type de captage	Débit moyen pompé (m ³ /j)	% de la municipalité qui est desservie
			Nom				
Cap-Santé	2,563	54	1 - Puits Julien	-SA-	1 Puits tubulaire (10 m)	40	6
			2 - Puits Bertrand	-SA-	1 Puits tubulaire (20m)	575	75
Deschambault	1,213	56	3 - Prise d'eau Sainte-Christine	-Md-	2 Puits tubulaires (45 m)	1,800	75
Neuville et Pointes-aux-Trembles	2,976	72	4 - Prise d'eau Pointe-aux-Trembles	Mb / Ca	Bassin de captage installé au contact des sables et du calcaire	700	40
Notre-Dame-de-Portneuf	1,676	102	5 - Maurice Hudon	Mb / Al	Source captée	70	34
			6 - Puits no 1, Prise Gauthier & Julien		Puits de 28 m dans horizon sableux, crépiné	360	60
			7 - Puits no 3, Prise Gauthier & Julien		Puits de 26 m dans horizon sableux, crépiné	170	
			8 - Puits no 2, Prise Gauthier & Julien		Puits de 26 m dans horizon sableux, crépiné	170	
Pont-Rouge et Sainte-Jeanne-de-Pont-Rouge	6,099	121	9 - Source Paquet	-Md-	20 pointes filtrantes à une profondeur de 6m	2,690	67
			10 - Source Dansereau	-Md-	Source captée, eau utilisée en cas de feu ou pénurie	0	0
Portneuf	1,393	9	11 - Prise d'eau les Sources	-Md-	Plusieurs sources captées	270	80
			12 - Puits Provencher	-SA-	1 Puits tubulaire (23 m)	55	
			13 - Prise d'eau Puits Thibodeau		1 Puits tubulaire (35 m)	320	
Rivière-à-Pierre	672	521	14 - Rivière-à-Pierre	+ IM +	1 Puits tubulaire (30 m)	330	100
Saint-Alban	1,176	151	15 - Source de Saint-Alban	-Md-	2 Puits de 2.5 m captent des sources par gravité	440	50
Saint-Basile et Saint-Basile-Sud	2,556	98	16 - Source Saint-Joseph	-Md-	Source captée / non utilisée	0	68
			17 - Source Sainte-Anne 2	-Md-	Source captée	530	
			18 - Source Sainte-Anne 1	-Md-	Source captée	530	
Saint-Léonard-de-Portneuf	997	139	19 - Prise d'eau Pettigrow	-SA-	1 Puits tubulaire (21 m)	45	53
Saint-Marc-des-Carrières	2,844	17	20 - Les Sources / Saint-Marc-des-Carrières	-Md-	4 Sources captées	1680	100
Saint-Raymond	8,126	684	21 - Chute Panet	-Md-	Source captée	490	50
			22 - Source Sainte-Croix	-Md-	Source captée	535	
			23 - Prise d'eau rue Pelletier (Grand remous)	-Md-	3 Puits tubulaires (21 m)	1770	
Saint-Ubalde	1,552	141	24 - Prise d'eau aqueduc rang Saint-Paul	Gx	1 Puits tubulaire (16 m)	750	70

Légende du matériel aquifère:	Schiste argileux	Sables et graviers deltaïques	Sables sur calcaire	Sables et alluvions	Moraine de Saint-Narcisse
	Aquifère de sable confiné	Roches ignées et métamorphiques	Sables fluvioglaciaires		



3.6.2 Principales formations aquifères

3.6.2.1 Aquifères compris dans les roches calcaires

Les roches calcaires des Basses-Terres du Saint-Laurent constituent la principale formation aquifère dans le roc. La porosité et la perméabilité des roches sont dues à la présence de fractures, de zones de fissuration et de chenaux de dissolution. Les processus de dissolution menant à la formation de ces chenaux ont été considérables en certains endroits. Par exemple, dans le secteur des municipalités de Saint-Alban et Saint-Casimir, le long de la rivière Sainte-Anne, un circuit de grottes et de cavernes est observé.

Malgré le certain potentiel aquifère des roches calcaires, les concentrations en calcium et en magnésium présentes dans l'eau peuvent limiter leur utilisation. Ces substances auxquelles est associée la dureté de l'eau, ne pose pas de danger pour la santé humaine mais peut occasionner la précipitation de dépôts calcaires dans la tuyauterie ainsi qu'à l'intérieur de certains accessoires ménagers (bouilloire, cafetière, chauffe-eau, etc.). Ces inconvénients peuvent engendrer des coûts d'entretien plus importants et/ou nécessiter que l'on traite l'eau.

Aucun puits municipal dans le secteur d'étude n'est aménagé dans les formations aquifères comprises dans les roches calcaires. Par contre, les résidents du secteur d'étude qui ne sont pas desservis par un réseau d'aqueduc et qui se trouvent à l'intérieur des limites des formations de calcaires possèdent pour la plupart des puits individuels qui sont terminés dans cette formation aquifère. Les exceptions se trouvent dans le secteur sud de Pont-Rouge où l'on retrouve l'aquifère de calcaire surmonté d'un aquifère de sables et graviers d'origine deltaïque. Dans ce cas, le choix de l'aquifère à exploiter relève du résident ou dépend de l'équipement de forage qu'offre l'entreprise de forage contractée.

Sur le territoire de la MRC de Portneuf, l'argile de la Mer de Champlain recouvre une bonne partie des calcaires, contribuant à créer des conditions de nappes captives ou semi-captives et à protéger l'eau contenue dans cette formation aquifère. Entre l'argile et le calcaire se trouve généralement une couche de till. Ce till, lorsque le couvert argileux est absent, peut

aussi servir de couche confinante ou semi-confinante. L'épaisseur de l'argile ainsi que du till est très variable ce qui fait qu'en certains endroits les conditions peuvent être semi-captives et la protection de l'aquifère peut être très minimale. Par exemple, dans le secteur de Saint-Alban où l'on retrouve le système de grottes et cavernes, le couvert argileux est discontinu et l'épaisseur de till semble faible. L'eau peut donc aisément s'infiltrer à l'intérieur des nombreuses cavités. Les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine dans ces systèmes karstiques sont très grandes ce qui augmente la rapidité de propagation d'un éventuel contaminant tout en réduisant son potentiel d'être atténué. Les contextes offrant le moins de protection aux eaux souterraines sont ceux où les calcaires sont affleurants. On retrouve ces conditions dans les secteurs de Neuville, Cap Santé et Grondines. L'importance de bien protéger ces zones est d'autant plus évidente que ces zones sont les lieux où s'effectue une bonne partie de la réalimentation des calcaires.

3.6.2.2 Aquifères compris dans les sédiments fluvioglaciaires

Les sédiments fluvioglaciaires de part leur granulométrie et leur épaisseur forment généralement de bons aquifères. Typiquement, ces dépôts sont de formes allongées et se retrouvent dans le creux des vallées mais peuvent aussi prendre la forme de couvertures étendues. Malgré une épaisseur souvent importante, leur géométrie particulière et leurs dimensions souvent restreintes peuvent grandement limiter les quantités d'eau extractibles.

Dans la région d'étude, les dépôts fluvioglaciaires sont presque exclusivement rencontrés dans les Laurentides. Il est probable qu'ils soient aussi présents à l'intérieur des Basses-Terres mais leur localisation exacte est encore mal connue. Les séquences de sédiments marins de la Mer de Champlain les recouvrent et leur détection doit se faire essentiellement à l'aide de données de forages. Les journaux de forages qui ont été consultés pour la région d'étude indiquent effectivement la présence d'unités graveleuses de faibles épaisseurs comprises entre l'argile marine et le socle rocheux. Il est par contre difficile de statuer si ces unités correspondent réellement à des dépôts d'origine fluvioglaciaire étant donné qu'elles pourraient aussi correspondre à des diamictons.

Les dépôts fluvioglaciers dans la région d'étude sont peu exploités. Ceci est principalement dû au fait qu'ils sont localisés au nord de la région, dans la région des Laurentides, hors des principaux centres habités. Par contre, les quelques résidents de ces secteurs possèdent pour la plupart des puits de surface qui captent les eaux de ces aquifères.

Étant donné la grande perméabilité de ces dépôts et le fait qu'ils sont exposés à la surface, les formations aquifères dans les dépôts fluvioglaciers sont très vulnérables à la contamination. Par contre, le fait que ces dépôts soient de dimensions restreintes, de géométrie allongée et le plus souvent orientés perpendiculairement aux gradients hydrauliques contribue à diminuer les impacts négatifs d'une éventuelle contamination. Comme mentionné plus haut, la plupart des dépôts fluvioglaciers sont situés dans des secteurs peu peuplés des Laurentides. Ce seul fait diminue le risque de contamination.

3.6.2.3 Aquifères compris dans les sédiments deltaïques

Les dépôts deltaïques occupent une bonne partie du territoire de la région d'étude. Ils sont situés le long des deux principaux cours d'eau que sont la Sainte-Anne et la Jacques-Cartier. Les sables et graviers d'origine deltaïque constituent la principale formation aquifère dans les dépôts meubles. Leur grande étendue et leur épaisseur souvent importante expliquent ce fait.

La municipalité de Deschambault possède deux puits à Sainte-Christine d'Auvergne localisés dans cette formation aquifère. Les débits d'eau exploitables sont suffisants pour pouvoir aussi alimenter en eau la municipalité de Saint-Gilbert ainsi qu'une aluminerie située au nord de Deschambault. Lors des travaux d'été de 1995, les autorités de la municipalité de Deschambault et de Grondines étaient en pourparlers concernant le raccordement possible de conduites d'amenées en vue d'une distribution de l'eau dans le réseau d'aqueduc de Grondines. La municipalité de Saint-Raymond exploite aussi les eaux provenant des aquifères de sables et graviers deltaïques. Les systèmes de captages comprennent une série de puits crépinés ainsi que deux systèmes de sources aménagées. Dans ce secteur de la MRC,

on retrouve aussi plusieurs petits aqueducs privés qui captent l'eau des formations deltaïques. Les résidents qui ne sont pas desservis par les réseaux d'aqueduc municipaux ou privés obtiennent leur eau à l'aide de puits de surface ou de pointes (puits instantanés) installés dans ces formations.

Tout dépendant des régions, la base des formations aquifères de sables et graviers deltaïques peut correspondre à l'argile, le till ou le socle rocheux. Les nombreuses résurgences d'eau dans la MRC sont souvent révélatrices de la présence de cette base imperméable. Aussi, la cartographie de ces résurgences dans le secteur d'étude a permis de constater qu'elles sont principalement localisées le long du contact entre les unités silto-argileuses et les sables deltaïques.

Les sables et graviers deltaïques sont généralement affleurants sauf en quelques endroits, tels qu'à l'intérieur des vallées principales, où ils sont recouverts par des dépôts alluvionnaires ou organiques de faibles épaisseurs. En plus d'être presque toujours exposés à la surface, la plupart des dépôts deltaïques occupent des zones topographiques élevées qui correspondent aux zones de recharge. La perméabilité des dépôts deltaïques est très élevée ce qui fait que la recharge annuelle est à son maximum dans les secteurs où ils affleurent. Cette grande perméabilité explique aussi le fait que la nappe d'eau dans ces secteurs peut se trouver à de grandes profondeurs (6 à 15 mètres). Ce fait seul ne devrait pas conditionner un faux sentiment de sécurité face à une éventuelle contamination. En effet, la perméabilité élevée de ces dépôts doit aussi être prise en compte.

Ces conditions réunies font que les sables et graviers deltaïques constituent l'une des formations aquifères les plus vulnérables à la contamination. Une contamination introduite au-dessus de ces zones de recharge a le potentiel de se propager de façon latérale et verticale à travers une grande partie de l'aquifère. Ceci peut mettre en péril une vaste étendue d'eau potable dont dépend une importante partie de la population.

3.6.2.4 Aquifères compris dans les sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation

Dans la région d'étude, l'ensemble des formations littorales, pré-littorales et d'exondation occupe une petite proportion de la superficie totale que couvre l'ensemble des dépôts quaternaires. De plus, les dépôts qu'elles forment sont souvent d'étendue restreinte. Ceci est spécialement vrai dans les secteurs où on les retrouve aux côtés des dépôts de tills et d'argiles. En ces endroits, les sables littoraux apparaissent sous forme de petits dépôts discontinus compris entre les unités de tills et d'argiles. Les seuls endroits où ils sont rencontrés de façon continue sont dans les secteurs de Pont-Rouge et de Saint-Alban, où ils bordent les dépôts deltaïques.

Leur lithologie étant très similaire à celle des dépôts deltaïques, le principal facteur qui permet de distinguer les sables littoraux de ces derniers est leur épaisseur. En effet, de façon générale, les dépôts pré-littoraux sont de plus faibles amplitudes, pouvant parfois faire un peu moins de 1 mètre d'épaisseur. Cette limitation est importante étant donné que le potentiel aquifère est relié à l'épaisseur saturée des formations géologiques qui, elle, est proportionnelle à l'épaisseur totale de la formation. Par contre, dans le cas où l'épaisseur des dépôts qu'ils forment serait importante, les sables et graviers d'origine littorale peuvent constituer de bonnes formations aquifères.

Comme mentionné dans la description géologique, les dépôts littoraux séparent les sables deltaïques des dépôts argileux de la mer de Champlain. Cette transition implique un changement de faciès de sédimentation mais non lithologique ce qui fait que les dépôts littoraux sont hydrauliquement liés aux sables et graviers deltaïques et, de part leur localisation par rapport à ceux-ci, drainent souvent l'eau provenant de ces formations. Tout comme les sables et graviers deltaïques, les formations aquifères littorales ont pour base l'argile, le till ou le socle rocheux. La seule formation géologique qui les recouvre sont les dépôts organiques. La profondeur de l'eau dans les dépôts littoraux est moins importante que celle observée dans les formations deltaïques et varie généralement de 0 à 6 mètres. Les secteurs où la profondeur de la nappe est maximale se trouvent aux abords des systèmes

deltaïques, et ceux où la nappe est affleurante sont dans les régions où les sables littoraux affleurent avec les tills et les argiles. Dans ces secteurs, les conditions imperméables restreignent l'écoulement de l'eau et expliquent les faibles valeurs à la profondeur de la nappe observée dans ces endroits. Le niveau d'eau de la nappe est donc aussi révélatrice de l'épaisseur des dépôts.

Les dépôts littoraux qui sont situés à l'intérieur des plages de tills et de roc, bien que ne constituant pas de bons aquifères, jouent un rôle important au niveau de la recharge des formations rocheuses. De part leur perméabilité élevée ils servent à l'emmagasinement des eaux de précipitations qui par la suite servent à réalimenter en eau les formations sous-jacentes.

De part leur lithologie, les formations aquifères contenues dans les sables littoraux sont très vulnérables à la contamination. De plus, l'accessibilité de la nappe près de la surface contribue à augmenter cette vulnérabilité. Par contre, l'impact régional d'une éventuelle contamination est moindre dans les secteurs où les dépôts littoraux sont discontinus. En effet, le fait que ces aquifères ne soient pas toujours reliés hydrauliquement aux autres formations de sables limite l'étendue possible d'une contamination en surface. Par contre, la faible épaisseur des dépôts littoraux en ces endroits rend les formations aquifères rocheuses plus vulnérables à la contamination, lorsque celles-ci sont directement couvertes par les dépôts littoraux.

3.6.3 Qualité de l'eau souterraine

La caractérisation géochimique des eaux souterraines est une partie intégrante de toute étude hydrogéologique régionale visant la caractérisation complète des aquifères. La connaissance de la géochimie des eaux souterraines en divers endroits des systèmes aquifères permet de caractériser les aquifères en terme de qualité. De plus, les données géochimiques sont essentielles à l'identification des sources de contamination d'origines anthropiques et naturelles. Les caractéristiques géochimiques des eaux souterraines peuvent aussi contribuer

à déterminer la provenance des eaux et à délimiter de façon plus fine les limites entre chacun des aquifères. Finalement, dans le cadre d'études plus pointues, les paramètres géochimiques peuvent aussi être utilisés pour fin de modélisation géochimique des aquifères.

Les travaux de caractérisation géochimique des eaux souterraines dans la MRC de Portneuf ont permis de récolter plus de 100 échantillons d'eau souterraine pour lesquels des analyses physicochimiques, inorganiques et microbiologiques ont été effectuées (Bourque *et al.*, 1996; Bourque *et al.*, 1998). L'analyse préliminaire des résultats permet de constater que la qualité de l'eau souterraine dans la MRC, bien que non parfaite, est généralement bonne. Certains dépassements d'objectifs esthétiques et de concentrations maximales acceptables (CMA) (Santé Canada, 1996) pour les paramètres microbiologiques et physicochimiques ont par contre été notés et on en discute brièvement ci-dessous.

Les principaux dépassements observés pour les paramètres esthétiques sont ceux reliés au pH, aux sulfures, au manganèse, à la dureté et au fer. Les dépassements pour ces paramètres n'entraînent pas de danger pour la santé humaine mais ils peuvent occasionner plusieurs inconvénients en ce qui concerne le goût et l'aspect de l'eau (sulfures, fer et manganèse), la formation de dépôts dans la tuyauterie et les chauffe-eaux (dureté) et la corrosion des conduites d'eau (pH faible). On peut contrôler ces inconvénients à l'aide de divers traitements. La plupart des dépassements se trouvent dans les échantillons d'eau provenant des formations fracturées du Paléozoïque (sulfures, fer, manganèse, dureté) et du Précambrien (sulfures).

Au niveau des paramètres ayant des effets sur la santé, les résultats d'analyses révèlent la présence naturelle en quantités supérieures aux CMA de fluorures dans les formations fracturées du Précambrien et du Paléozoïque (8 échantillons/100). Aussi, des concentrations environ 3 fois supérieures aux normes ont été relevées dans deux échantillons pris dans les formations du Paléozoïque. L'origine de cette contamination semble être naturelle (Lavalin, 1992).

La culture de la pomme de terre occupe une partie prépondérante des activités agricoles de la région de Portneuf. Cette culture, qui se pratique généralement sur des terrains sableux et donc très perméables, nécessite l'utilisation d'engrais et de pesticides chimiques pour le contrôle des nuisances. L'épandage de ces substances sur ces terrains perméables a mené à l'émergence de cas de contamination des eaux souterraines par les nitrates et, de façon mineure, par les pesticides (Paradis *et al.*, 1991, 1997). Les résultats de nos propres analyses sur les nitrates corroborent aussi la présence dans certains secteurs d'une contamination par les nitrates. En effet, des 100 échantillons prélevés, 9 dépassent la norme de 10 mg/l. Les formations de sables et graviers de surface sont les aquifères qui sont touchés par ce type de contamination.

Un fait marquant qui ressort des résultats d'analyses est la présence pour environ 30% des puits échantillonnés, de comptes bactériens dépassant les CMA. Il semble que cette contamination microbiologique ne soit pas reliée à la contamination par les nitrates et ne serait donc pas liée à des activités agricoles. Ces faits permettent de conclure que l'aménagement des puits ainsi que leur entretien sont parfois déficients. Une sensibilisation de la population à cet égard serait souhaitable et permettrait de réduire le nombre de cas de contamination.

CHAPITRE 4

CARTOGRAPHIE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MRC DE PORTNEUF

4.1 Cartographie hydrogéologique: principes de base

La cartographie hydrogéologique comprend toutes les activités et techniques nécessaires pour recueillir, documenter, interpréter et représenter l'information hydrogéologique sous forme graphique, dans le but d'en arriver à une compréhension globale du fonctionnement des systèmes aquifères (Struckmeier et Margat, 1995). Cette compréhension est essentielle pour la gestion de la ressource.

Préalablement à l'entreprise de ces nombreux travaux, il importe d'établir quels sont les buts de la cartographie hydrogéologique pour chaque projet donné (Piteau et Turner, 1993; Struckmeier et Margat, 1995). Cette étape est cruciale car c'est à partir de celle-ci que l'on pourra déterminer le type et la quantité de données nécessaires, le niveau de traitement requis, les sommes d'argent qui doivent être investies ainsi que le degré d'expertise nécessaire pour l'accomplissement des travaux. Les buts d'un projet de cartographie hydrogéologique sont essentiellement conditionnés par l'utilisation projetée des cartes et par les contraintes cartographiques qui sont imposées par l'échelle de la cartographie (Struckmeier et Margat, 1995).

Malgré la diversité des objectifs visés par les nombreux projets de cartographie hydrogéologique, il existe tout de même une constante de base commune à chacun de ces projets. Celle-ci concerne la démarche suivie lors des travaux de cartographie hydrogéologique. Cette démarche comporte de façon généralement invariable quatre étapes, soient: 1) la compilation des données déjà disponibles, 2) les travaux de terrain nécessaires pour obtenir les informations complémentaires ou manquantes, 3) l'intégration et l'analyse de ces données, et, finalement, 4) la production de cartes hydrogéologiques.

4.1.1 Compilation des données existantes et travaux de terrain: informations de base pour la cartographie hydrogéologique

Indépendamment de la complexité du système à l'étude, tout programme de cartographie hydrogéologique dont le but est de donner une image complète de la ressource en eau souterraine devrait répondre à quatre questions fondamentales qui sont (Piteau et Turner, 1993):

- ❶ D'où vient l'eau ?
- ❷ Où va-t-elle ?
- ❸ Est-elle potable ?
- ❹ Quelle est la nature des formations géologiques qui la contient ?

Pour répondre à ces questions, un certain nombre d'informations de base est nécessaire. Émanant du caractère multidisciplinaire de l'hydrogéologie, les informations requises sont souvent nombreuses. Ces informations peuvent déjà être disponibles sous forme de base de données, de cartes ou de rapports mais à l'occasion elles seront absentes et il sera alors nécessaire d'aller les recueillir sur le terrain. Les informations de base qui sont généralement nécessaires pour la cartographie hydrogéologique sont présentées ci-dessous.

1) Les cartes topographiques: L'observation des cartes topographiques permet d'identifier certains éléments indicateurs des conditions hydrogéologiques d'un milieu donné. Par exemple les cartes topographiques permettent de délimiter les limites hydrologiques des bassins versants. Dans la plupart des régions, ces limites coïncident grossièrement avec les limites de bassins hydrogéologiques des aquifères de surface (Struckmeier et Margat, 1995). Beaucoup d'informations peuvent aussi se dégager de l'observation du réseau de drainage contenu sur les cartes topographiques. Par exemple, un réseau de drainage très dense suggère la présence d'un substratum imperméable près de la surface et indique donc un faible potentiel aquifère en surface et la présence de la nappe phréatique à de faibles profondeurs.

- 2) *les cartes du Quaternaire et du socle rocheux* permettent de connaître dans quel type de matériel se trouve les principaux aquifères, de déduire leur géométrie et leur étendue ainsi que de connaître la nature des frontières qui les séparent des autres formations géologiques. Cependant, elles ne permettent pas de connaître leur distribution en profondeur.
- 3) *les rapports géotechniques, hydrogéologiques et/ou géologiques* constituent les sources privilégiées pour l'obtention de paramètres tels que la conductivité hydraulique, la porosité et la granulométrie. Les séquences stratigraphiques qui y sont généralement décrites permettent aussi de connaître l'agencement des diverses couches géologiques en profondeur. Cette information, combinée aux cartes géologiques, permet d'effectuer des coupes hydrostratigraphiques et d'obtenir une image tridimensionnelle des systèmes aquifères.
- 4) *les informations météorologiques et hydrologiques* fournissent les paramètres essentiels pour l'établissement du bilan hydrologique. Celui-ci permet d'évaluer la recharge des aquifères.
- 5) *les cartes pédologiques ou de la géologie des dépôts de surface* apportent des précisions supplémentaires concernant les paramètres physiques contrôlant l'infiltration.
- 6) *la connaissance de la répartition des puits de particuliers et des systèmes de captage municipaux* permet d'identifier les aquifères qui sont exploités et d'en évaluer leur productivité. C'est aussi à partir de ces nombreux points d'accès aux eaux souterraines qu'il est possible de procéder à l'échantillonnage des eaux souterraines, à la prise de mesures de niveaux d'eau ainsi qu'aux essais de pompage lorsqu'ils sont requis.

4.1.2 Analyse et traitement des données

Quelques-unes des informations nécessaires pour la caractérisation hydrogéologique peuvent être directement obtenues des données brutes récoltées lors de la compilation des données. Toutefois, d'autres informations hydrogéologiques nécessitent que l'on procède aux traitements de ces données et à l'interprétation de celles-ci. Une liste exhaustive des paramètres hydrogéologiques qui sont généralement mesurés, interprétés et finalement présentés sur les cartes hydrogéologiques est présentée au tableau 4.1. Ces paramètres ont été divisés selon qu'ils caractérisent de façon physique ou chimique les eaux souterraines ou selon qu'ils décrivent les propriétés hydrauliques des matériaux géologiques à l'intérieur desquels circulent les eaux souterraines (Struckmeier et Margat, 1995).

4.1.3 Production de cartes hydrogéologiques

Le très grand nombre d'information hydrogéologique de base ou dérivée ainsi que le caractère transitoire de certaines de ces données (niveaux d'eau, géochimie etc.) font qu'il est impossible de décrire et représenter à la fois toutes ces informations sur une seule carte sans en diminuer l'intelligibilité. La clarté de la présentation des cartes est un paramètre crucial dont on doit tenir compte lors de l'élaboration des cartes hydrogéologiques. En effet, indépendamment de la validité ou de la qualité des données qui y sont présentées, les cartes surchargées courent le risque de ne pas être utilisées, et ce d'autant plus si elles s'adressent à un public non-initié aux concepts de l'hydrogéologie. Plusieurs cartes sont donc généralement requises afin de bien représenter tous les aspects qui permettent de caractériser la ressource en eau souterraine.

Les cartes hydrogéologiques peuvent être compilées à diverses échelles, allant des cartes locales au 1:20 000 aux cartes nationales au 1:1 000 000 que l'on retrouve par exemple dans les Atlas. L'échelle des cartes est établie en fonction des besoins des utilisateurs, du type et de la quantité d'information à représenter ainsi que des limitations posées par les techniques de reproduction des cartes. Cette diversité dans les échelles des cartes traduit les multiples rôles que remplissent les cartes hydrogéologiques. Plusieurs modes de classification des

Tableau 4.1: Principaux paramètres physiques et chimiques utilisés pour la caractérisation de la ressource en eaux souterraines (Struckmeier et Margat, 1995).

Paramètres brutes ou dérivés permettant de caractériser l'eau souterraine de façon physique, (direction d'écoulement, étendue des eaux souterraines) ou chimique
La caractérisation de ces paramètres est effectuée pour un aquifère. Dans le cas de deux aquifères superposés tous les paramètres énumérés devront être redéterminés pour cet aquifère.
<p><u>Paramètres physiques:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Présence, étendue et continuité des eaux souterraines. • Profondeur à la nappe. • Altitude de la surface libre ou piézométrique mesurée par rapport au niveau de la mer; contours de la surface libre ou piézométrique; délimitation des zones où la nappe est libre et/ou captive. • Directions de l'écoulement et gradients hydrauliques dérivés à partir des cartes de contours de la surface libre ou piézométrique; identification des limites de partages à travers desquelles aucun flux n'est rencontré. • Liens hydrauliques, connus ou déduits, entre les formations aquifères discontinues. • Fluctuation de la nappe à divers périodes de l'année; Délimitation des zones affectées par le pompage. • Volume d'eau dans un aquifère ou par unité de surface. • Volume d'eau pour différents niveaux de saturation. • Distinction entre les zones de recharge et d'émergence. • Détermination des valeurs de la recharge. • Détermination des valeurs de la décharge mesurée aux points d'émergence des eaux souterraines (sources ou rivières). • Caractérisation du régime d'écoulement observé aux sources, celui-ci peut être permanent, intermittent ou temporaire; mesure ou évaluation du débit moyen à ces points d'émergence; hydrographes de sources. • Quantité d'eau souterraine pompée à certaines localisations, i.e. stations de pompage municipales, puits industriels etc. pour une période de temps donnée. <p><u>Paramètres chimiques:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Caractéristiques physiques ou chimiques de l'eau souterraine mesurée à des sources ou puits à une date précise de l'année; distribution spatiale de ces caractéristiques à l'aide de diagramme de Stiff ou de proportion ionique. • Qualité de l'eau définie sur la base de critères de potabilité / paramètres esthétiques ou en fonction de la classification hydrogéochimique de l'eau, ex: solide totaux dissous / concentration en nitrates / proportion Ca/Mg.
Paramètres brutes ou dérivés permettant de caractériser le matériel dans lequel se trouve l'eau souterraine
<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie des formations géologiques classée en fonction de leur capacité à transmettre et à emmagasiner l'eau; type de porosité et perméabilité observée dans les roches et sédiments avec une idée de la valeur de ces deux paramètres (ordre de grandeur). • Étendue, structure et géométrie des diverses formations géologiques en portant une attention particulière sur les formations aquifères. <ul style="list-style-type: none"> • tracé de l'étendue des formations géologiques à la surface; et description du type de limites séparant deux ou plusieurs formations géologiques ayant des valeurs de perméabilité différentes. • hauteur de la base et du sommet des aquifères • épaisseur saturée des formations géologiques • localisation d'hétérogénéités internes qui ont un impact sur le régime d'écoulement de l'eau souterraine, e.g. zones de fractures, couches imperméables, etc. • Valeurs des paramètres hydrauliques telles que la perméabilité, la transmissivité, les coefficients d'emmagasinement avec une idée de leur distribution spatiale. • Identification des éléments hydrographiques permettant de suggérer la présence de limites aquifères. • Relation entre le système de drainage et les aquifères adjacents: lorsque l'eau souterraine de l'aquifère est directement et complètement déchargé dans la rivière on dit que le lien hydraulique est continu, celui-ci peut-être permanent ou temporaire. Lorsque les eaux souterraines font résurgences à un endroit autre que la rivière tel que le long de faces de suintement on dit que le lien hydraulique est discontinu, ce lien peut être permanent ou temporaire. Les eaux d'un aquifère de sable et gravier se jetant dans une rivière coulant au roc est un exemple de lien hydraulique discontinu. Les nappes perchées en sont un autre exemple. • Localisation des points qui font fonction de décharge: sources ponctuelles ou linéaires, faces de suintement, plan d'eau tel que les lacs et rivière. • Classification des zones en fonction de leur complexité et structure: degré d'homogénéité d'une formation aquifère, présence de un ou plusieurs aquifères superposés, aquifère continu ou discontinu, état de la nappe: libre, confinée ou semi-confinée. • Localisation des infrastructures humaines ayant un impact sur la quantité des eaux souterraines: puits de pompage, puits d'injection, terres irriguées à l'aide de fossés de drainage ou tuyaux souterrains, barrages, canaux d'égaux pluviaux, etc.

cartes hydrogéologiques ont été développés au cours des ans (Struckmeier et Margat, 1995). Une de celle-ci est présentée au tableau 4.2. Cette classification fait ressortir les liens étroits qu'entretiennent échelle, fiabilité des données et coûts requis en relation avec les utilisations projetées des cartes ainsi que le niveau d'information représenté.

On note que la cartographie à grande échelle (petits territoires) nécessite l'utilisation de données fiables et nombreuses alors que les projets de cartographie couvrant de vastes territoires, et donc à plus petites échelles, peuvent être menés à bien à l'aide d'un nombre plus restreint de données. Le caractère régional de ces cartes rend cependant impossible l'intégration de tous les détails contenus sur les cartes à grande échelle.

Tableau 4.2: Classification des cartes hydrogéologiques en fonction du niveau d'information qu'elles contiennent et de l'utilisation possible qu'on peut en faire (modifié de Vrba et Zaporozec, 1994).

Utilisation possible Niveau d'information	Faible (données éparpillées et hétérogènes provenant de diverses sources)	Avancé (données provenant de programmes de caractérisation. La fiabilité des données est augmentée)	Élevé (analyse des systèmes aquifères et élaboration de modèles hydrogéologiques)
Reconnaissance et Exploration	Carte hydrogéologique générale (carte des aquifères)	Carte hydrogéologique illustrant divers paramètres (profondeur à la nappe, épaisseurs des aquifères, profondeur au roc, géochimie, T, K S, R)	Carte régionale illustrant la dynamique des eaux souterraines dans les systèmes aquifères (représentation de modèles conceptuels)
Planification et Développement	Carte du potentiel des ressources en eaux souterraines		Représentation graphique dérivé des systèmes d'information géographique (cartes, sections, diagrammes 3-D, illustration de scénarios)
Gestion et Protection	Carte de vulnérabilité des eaux souterraines	Carte hydrogéologique spécialisée (carte pour la planification)	
Utilisation possible Niveau d'information	statique ————— influence temporelle —————> dynamique faible ————— fiabilité —————> élevée faibles ————— coûts —————> élevés vaste ————— région représentée —————> petite petite ————— échelle —————> grande		

Les cartes hydrogéologiques générales et du potentiel de la ressource en eau souterraine sont généralement construites durant les phases préliminaires des travaux de cartographie

hydrogéologique. Les informations qu'elles contiennent ont trait au type d'aquifère ainsi qu'à leur potentiel d'utilisation. Le niveau d'interprétation des cartes hydrogéologiques générales est moins avancé que celui que l'on retrouve sur les cartes du potentiel de la ressource. Ainsi ces cartes s'adressent principalement aux spécialistes en hydrogéologie alors que les cartes du potentiel seront plutôt accessibles aux utilisateurs ou aux gestionnaires de la ressource. Les cartes paramétriques contiennent un ensemble spécifique de données ayant trait à un ou plusieurs aspects touchant l'occurrence, l'étendue et l'importance de la ressource en eau souterraine ainsi que ses caractéristiques géochimiques. Les paramètres présentés, sont par exemple, les contours de la surface libre ou piézométrique, de la profondeur à la nappe, de la base de l'aquifère ou de son épaisseur, de la salinité de l'eau, de sa température ou de sa concentration en certains ions. Étant donné la grande quantité d'information qu'elles présentent, les cartes paramétriques sont généralement conçues à grande échelle. L'utilisation de ces cartes nécessite généralement l'interprétation d'un hydrogéologue.

Les cartes hydrogéologiques des systèmes aquifères sont préparées dans le but de faire ressortir le contexte hydrodynamique des systèmes aquifères et les conditions limites qui règnent dans une région. Leurs principaux buts sont d'améliorer la compréhension du système d'écoulement et de définir le plus précisément possible les conditions aux limites du système à l'étude (Struckmeier et Margat, 1995). Ces cartes sont le fruit de l'intégration de plusieurs cartes paramétriques ainsi que d'informations complémentaires telles que la géologie, la géomorphologie, la pédologie et l'hydrologie. Ces cartes sont très utiles pour l'élaboration de modèles conceptuels qui seront utilisés lors de la modélisation numérique. Ces cartes peuvent aussi servir à l'identification de secteurs où il y a un manque de données ou ceux qui sont les plus appropriés pour l'aménagement de systèmes de surveillance.

Les cartes hydrogéologiques spécialisées répondent à un besoin particulier et visent généralement un public varié. Ces cartes sont généralement utilisées pour trois principales applications, soient: la planification, l'exploitation ou la gestion de la ressource en eau souterraine. Les cartes de planification et de gestion peuvent montrer la qualité des eaux

souterraines en fonction de certains critères particuliers, les cartes de vulnérabilité identifient la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination et les cartes de protection montrent l'état actuel de l'exploitation des eaux souterraines, les régions qui sont déjà protégées et celles qui devraient l'être.

4.1.4 Importance des outils informatiques dans la réalisation des cartes hydrogéologiques

Tout le processus de la cartographie hydrogéologique, c'est à dire celui allant de la phase de la compilation des données, aux traitements et à l'interprétation des informations suivi de la représentation de celles-ci, a grandement été optimisé par l'utilisation des outils informatiques. L'optimisation se trouve principalement au niveau de trois domaines, soient:

- 1) l'entreposage, la manipulation et la gestion des données
- 2) le traitement des celles-ci
- et 3) la visualisation et la représentation des informations.

L'apparition d'un nombre de plus en plus grand de données hydrogéologiques combinée aux différents formats dans lequel on les retrouve (données ponctuelles, linéaires, polygonales) a rendu leur manipulation manuelle de plus en plus difficile, voir même impossible. Cet état de fait a naturellement mené à l'utilisation de logiciels adaptés pour la gestion et l'entreposage de grandes quantités de données variées. Étant entreposées sur support informatique, celles-ci peuvent ensuite être traitées à l'aide d'autres applications. De toutes les applications disponibles sur le marché, les plus communément utilisées en hydrogéologie sont certainement celles qui font l'interpolation de données ponctuelles pour former des lignes (coupes stratigraphiques), des surfaces (surface de la nappe phréatique) ou des volumes (volume saturé d'un aquifère). Proprement appliquées, ces technologies contribuent à augmenter considérablement la compréhension des systèmes aquifères. En effet, en plus de faciliter et d'améliorer le traitement des données, ces outils informatiques ont grandement augmenté les possibilités de représentations graphiques des systèmes aquifères. Leur complexité ainsi que leur aspect dynamique peuvent être de mieux en mieux représentés à l'aide de ces nouvelles technologies.

De plus, un grand nombre de projets impliquant la caractérisation de la vulnérabilité des aquifères à la contamination ont pris avantage des systèmes d'information géographique (SIG). La principale raison de leur utilisation réside dans le fait qu'ils facilitent l'acquisition, l'édition, l'analyse et la représentation des données. Le caractère dynamique des informations qui ont trait aux activités humaines nécessite la constante mise à jour des cartes. Cette mise à jour est beaucoup mieux gérée à l'intérieur d'un système d'information géographique que sur des cartes ou documents papiers. De plus, l'importance de l'impact visuel des cartes de vulnérabilité (couleurs, variété des symboles etc.) sur les utilisateurs ne doit pas être négligée. En effet, les utilisateurs potentiels des cartes de vulnérabilité ne sont pas des spécialistes et l'information doit être présentée de la façon la plus claire et compréhensible possible. Les techniques informatiques ont grandement augmenté ces possibilités de représentation visuelle et par conséquent elles sont toutes indiquées pour être utilisées dans la conception de cartes de vulnérabilité.

Il est important de faire la distinction entre les SIG et les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité. Les SIG représentent des outils permettant de compiler et d'intégrer les données qui seront utilisées dans les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et permettent de visualiser les résultats obtenus à l'aide de ces méthodes. Le SIG en lui seul ne constitue pas une méthode d'évaluation de la vulnérabilité. De plus, les utilisateurs utilisant les SIG pour la représentation des données devraient être avertis du fait que l'agrandissement d'une carte compilée à petite échelle (grand territoire) n'augmente pas la résolution des données. Ceci vient du fait que lors de l'agrandissement (zoom) seule l'échelle est augmentée et non la résolution, le nombre et la précision des données (US EPA, 1993).

4.2 Cartographie hydrogéologique au Québec: rétrospective

La ressource en eau souterraine au Québec a rarement fait l'objet d'une caractérisation exhaustive telle que, par exemple, la cartographie et la classification des diverses formations aquifères. Des initiatives en ce sens ont pourtant été amorcées par le ministère de l'Environnement et de la Faune (MEF) durant les années 1970 et 1980 dans le

cadre de programmes fédéraux (DHI - décennie hydrologique [1965-1975], ARDA - aménagement rural et développement agricole [1967-1975], programmes du MEER (ministère de l'Expansion Économique Régionale)) et provinciaux (PCI: programmes de connaissances intégrées [1975-1982] et volet cartes de vulnérabilité [1985-1988]) (McCormack, communication personnelle). Malheureusement, ces programmes visant l'acquisition des connaissances sur le terrain n'ont été menés à terme que pour certains secteurs du territoire québécois laissant donc la majeure partie du territoire non cartographiée.

Les nombreux documents cartographiques produits par le MEF ont été consultés afin de connaître les paramètres hydrogéologiques qui ont été utilisés, de se familiariser avec le type de représentation graphique utilisé ainsi que le type de données que l'on y retrouve. En général, la plupart des études hydrogéologiques sont accompagnées d'une série de cartes hydrogéologiques et hydrogéochimiques concernant, respectivement: la géologie et la perméabilité des dépôts meubles et de la roche de fond, les utilisateurs d'eaux souterraines ainsi que les types de captages présents sur le territoire, et la zonalité de certains paramètres physicochimiques (fer, dureté, chlorure, pH et conductivité).

La majorité des cartes hydrogéologiques illustrent la géologie en terme de perméabilité ou de potentiel aquifère. Cette classification des formations géologiques en fonction de leur perméabilité est généralement faite de façon qualitative. Par exemple, on opposera les formations perméables, telles que les sables et graviers, aux formations peu perméables telles que les silts, les tills et les argiles. Aussi, sur certaines cartes, ces unités sont rattachées à des valeurs de débits probables disponibles. Par exemple, la carte hydrogéologique du bassin de la rivière Saint-François identifie les formations perméables comme celles pouvant fournir des débits de 400 m³/h et les unités peu perméables ou imperméables comme celles pouvant fournir des débits entre 1 et 6 m³/h (McCormack, 1979). Une autre étude divise les débits disponibles en trois catégories, soient ceux compris entre 0.2 et 2 m³/h, 2 et 12 m³/h et ceux qui sont plus grands que 12 m³/h (Prévot, 1973). Les données additionnelles qui se trouvent

aussi généralement présentées sur ces cartes sont la localisation des puits d'essais, des sondages stratigraphiques et des prises d'eau municipales et privées. Des coupes stratigraphiques complètent à l'occasion ces cartes et la localisation des sources peut aussi y être présentée. Une minorité des rapports hydrogéologiques contient des informations paramétriques (i.e épaisseur des dépôts, topographie du socle, piézométrie, etc.). De tous les documents compilés au MEF, seulement deux rapports hydrogéologiques contiennent ce type d'information. Le rapport hydrogéologique de Grenier (1973) sur la région du lac Maskinongé présente la topographie de la roche en place alors que celui de Simard (1978) sur la région de Mirabel présente les contours d'épaisseur des séquences quaternaires.

La production des cartes de vulnérabilité par le ministère de l'Environnement et de la Faune a débuté au début des années 1980. L'évaluation de la vulnérabilité s'est initialement faite à partir de critères qualitatifs concernant les aspects physiques de la ressource. Par exemple, la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la région de Granby a été évaluée en considérant 1) la perméabilité des formations géologiques (élevée, modérée, faible), 2) la topographie (plane ou accidentée) et 3) le drainage des terrains (externe nul, externe faible, externe excellent) (Grenier et McCormack, 1985). D'autres cartes de vulnérabilité ont été élaborées en fonction des débits probables disponibles. Ainsi, la carte de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin versant de la Yamaska comprend trois classes de vulnérabilité en fonction des débits probables suivants: vulnérabilité élevée = 5.5 m³/h, vulnérabilité modérée = 3 m³/h - 5.5 m³/h, vulnérabilité faible = < 3 m³/h (McCormack, 1985). Les méthodes qualitatives d'évaluation ont éventuellement été remplacées par la méthode DRASTIC qui utilise un système de cotation numérique à pondération. La première application intégrale de DRASTIC au territoire Québécois s'est effectuée en 1990 par Champagne (1990).

Les échelles du 1:100 000 ainsi que du 1:150 000 sont généralement utilisées pour les cartes hydrogéologiques alors que de plus grandes échelles, soient de 1:50 000 ou 1:20 000, sont choisies pour la cartographie de la vulnérabilité.

4.3 Méthodologie pour la MRC de Portneuf

La méthodologie utilisée dans le cadre des travaux de cartographie hydrogéologique de la MRC de Portneuf a consisté en quatre étapes, soient: (1) la compilation des données existantes, (2) les travaux de terrains, (3) le traitement des données et, finalement, (4) la confection et l'édition des différentes cartes hydrogéologiques.

4.3.1. Compilation des données disponibles

La compilation des données existantes a constitué une étape cruciale de la cartographie hydrogéologique étant donné que c'est en grande partie de celle-ci que dépend la qualité et la précision des cartes qui seront produites. Les données hydrogéologiques qui ont été inventoriées dans le cadre du Projet Portneuf sont passées en revue dans les paragraphes suivants. Cette revue comprend la description du type de données hydrogéologiques accompagnée d'un commentaire sur leur fiabilité et leur quantité en vue de leur application à la cartographie hydrogéologique régionale. De plus, une brève description concernant le format des données, leur mode de saisie et d'entreposage est ajoutée.

Les sources ont été classifiées selon le type prépondérant d'information qu'elles contiennent; en -A- on retrouve les données renseignant sur la géologie et la stratigraphie, en -B- les informations concernant l'hydrologie, en -C- les données sur les propriétés hydrauliques des formations aquifères, et, finalement, en -D- toutes les informations concernant l'utilisation des eaux souterraines et les activités humaines pouvant avoir un impact sur cette ressource.

A - Informations géologiques et stratigraphiques:

. Système d'informations hydrogéologiques (SIH) du MEF.

Le système d'informations hydrogéologiques du MEF est principalement composé de données provenant des rapports de forages effectués par les puisatiers. Au Québec, plus de 6000 puits à usage domestique sont forés et installés annuellement par les puisatiers (Perron, communication personnelle). De par la Loi, les foreurs doivent fournir un rapport de forage

au MEF contenant les informations sur la construction de ces puits, les couches géologiques rencontrées en cours de forage, le niveau de l'eau dans le puits ainsi qu'une appréciation des débits disponibles. Au total, le MEF détient jusqu'à ce jour les informations concernant plus de 100 000 forages, la grande majorité de ceux-ci ayant eu pour cible le roc. Outre ce type d'informations, le SIH contient aussi quelques données qui ont été récupérées auprès de deux ministères, soit celui des Transports et celui des Ressources Naturelles. À diverses reprises, dans le cadre de leurs activités respectives, ces deux ministères ont eu à effectuer de nombreux forages à travers le Québec et ce sont ces informations sur ces forages qui sont contenues dans le système d'informations hydrogéologiques. Le pourcentage de ces informations par rapport aux données provenant des puisatiers est par contre très faible.

Avec ces 100 000 données de forages, le système d'informations hydrogéologiques est certainement la source de données hydrogéologiques la plus importante au Québec. Cependant, la qualité des informations est grandement variable. Certains forages sont par exemple mal localisés, ce qui peut contribuer à fausser les interprétations stratigraphiques d'une région donnée. Le MEF évalue à environ 10% le nombre de forages dont la localisation est erronée (Ouellet, communication personnelle). Une autre contrainte d'utilisation de ces données de forages se situe au niveau de la qualité des descriptions stratigraphiques. En effet, bien que la séquence stratigraphique de certains forages soit bien détaillée, une quantité significative de forages possède des descriptions très sommaires où l'on a eu recours à des termes plutôt vagues. Ces faits réduisent considérablement la fiabilité de cette base de données et limitent son utilisation pour certaines applications.

Dans la région d'étude, un total de 2380 données de forages a été récolté du système d'informations hydrogéologiques du MEF. Ce nombre représente 80% de toutes les données ponctuelles compilées dans le cadre de ce projet. La carte présentée à l'Annexe E illustre la répartition et la densité de ces données de forage. Les principales informations pertinentes à la cartographie hydrogéologique contenues dans cette banque sont les unités stratigraphiques majeures rencontrées en cours de forage et les profondeurs au roc. Ces

données de forages nous ont été transférées sous format Excel, logiciel initialement utilisé pour l'entreposage des données.

. Banque de données géotechniques du ministère des Transports.

Dans le cadre de ses diverses activités, le ministère des Transports du Québec doit effectuer à de nombreuses reprises divers sondages stratigraphiques. L'information de ces sondages, au moment de la compilation des données, n'était pas disponible sous forme de base de données. Les informations étaient archivées soit sous format papier ou sous format informatique uniquement accessible à partir de logiciels de traitement de texte. Les informations ont donc dû être ressaisies sur Excel afin de les rendre compatibles avec les autres données compilées dans le cadre de ce projet.

Un total de 159 données de forages a été compilé. Ce nombre constitue 5% de l'ensemble des données de forages qui a été récolté pour la région d'étude. La carte présentée à l'Annexe E montre l'ensemble de ces données. De même que pour le SIH, la banque de données du ministère des Transports contient des informations sur la stratigraphie mais aussi sur les niveaux d'eau. De plus, une partie non négligeable des informations archivées porte sur les propriétés des matériaux. Les mesures telles que la plasticité, la résistance au cisaillement, et la teneur en eau pour les matériaux argileux y sont archivées ainsi que les résultats des essais scissométriques, pressiométriques et au pénétromètre. La qualité de l'information est généralement bonne.

. Autres banques de données du MEF.

La MRC de Portneuf a bénéficié d'un des programmes de suivi environnemental du MEF qui portait sur l'étude de la contamination des eaux souterraines par les nitrates durant les périodes de l'été 1990, automne 1990 et de l'hiver 1991 (Paradis *et al.*, 1991). L'activité qui est à l'origine de cette contamination est attribuée à la culture intensive de la pomme de terre qui nécessite l'épandage de fertilisants. Les sols sableux sur lesquels se pratique ce type de culture procurent peu de protection aux nappes d'eau souterraine face à l'infiltration des fertilisants. C'est donc dans le but de vérifier les concentrations en nitrates dans les eaux

souterraines aux voisinages des champs de pommes de terre que le MEF a aménagé 25 puits d'observation. Les informations concernant ces travaux, telles que la stratigraphie, les niveaux d'eau rencontrés en cours de forage et les concentrations en nitrates détectées ainsi que 52 autres données de forages étaient disponibles sous format Excel et ont pu être consultées. La carte présentée à l'Annexe E montre la distribution des puits d'observation et des forages qui ont été effectués sur le territoire à l'étude. Ces données comptent pour 2.5% des forages compilés dans le cadre de cette étude. L'information a pu aisément être intégrée aux données précédemment compilées étant donné qu'elles avaient été saisies à l'intérieur d'un chiffrier. La qualité de l'information est généralement bonne.

. Cartes géologiques du Quaternaire et du socle rocheux fournies respectivement par la Commission géologique du Canada (CGC) et le ministère des Ressources Naturelles (MRN).

Les récents travaux de cartographie des dépôts superficiels effectués par les chercheurs de la Commission géologique du Canada ont mené à la production d'une carte des dépôts superficiels (1:100 000) couvrant toute la région d'étude (Cloutier *et al.*, 1997). C'est cette carte qui a été utilisée pour les travaux de cartographie hydrogéologique. La carte des dépôts superficiels était disponible sous format numérique et compatible avec le logiciel MapInfo, principal outil informatique qui a été utilisé pour la cartographie hydrogéologique. La carte du socle rocheux et les rapports géologiques l'accompagnant proviennent du ministère des Ressources Naturelles et étaient uniquement disponibles sous format papier ce qui a nécessité la numérisation de la carte afin de pouvoir l'intégrer aux autres données disponibles sous MapInfo (Cusson, 1996).

Ces deux cartes nous renseignent sur le type et la géométrie en surface des formations aquifères ainsi que sur le genre de limites hydrauliques qu'elles entretiennent avec les unités géologiques adjacentes. De plus, elles fournissent les informations structurales telles la localisation des failles et de plis ainsi que la présence de cavités dans les roches calcaires. Ces cartes sont aussi nécessaires pour l'évaluation des paramètres «Aquifère» et «Zone Vadose» de la méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987). La qualité de l'information présentée

sur ces cartes est généralement très élevée.

. Rapports de forages effectués par Hydro-Québec.

Une source d'information hydrogéologique inhabituelle a été ajoutée aux sources traditionnelles. Celle-ci provient des rapports techniques d'Hydro-Québec qui sont effectués dans le cadre de recherches d'emplacements pour la pose de pylônes le long de corridors de transport hydroélectrique. La qualité de l'information contenue dans ces rapports est exceptionnelle et renseigne sur les propriétés des matériaux, les niveaux d'eau et la stratigraphie de façon détaillée.

La carte présentée à l'Annexe E montre la répartition de ces données de forages. Au total 122 données de forages ont été compilées, ce qui ne représente que 4% de toute l'information de forages qui a été compilée dans le cadre de ce projet. L'information de forage était uniquement disponible sous format de rapport écrit et il a donc été nécessaire de saisir cette information à l'intérieur d'une base de données sur Excel.

B - Informations hydrologiques:

. Banque de données météorologiques et hydrologiques du MEF.

Les données provenant des 73 stations de jaugeages ainsi que des 12 stations météorologiques présentes dans la région d'étude ont été compilées. Toutes les informations concernant les débits des rivières, les précipitations ainsi que les données de température sont contenues dans ces fichiers. Les données nous ont été transférées sous format numérique compatible avec Excel.

Les données de précipitations et de températures sont utilisées, entre autres, pour l'évaluation de la quantité d'eau disponible pour la recharge des aquifères. Ce paramètre est nécessaire, entre autre, pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à l'aide de la méthode DRASTIC.

. Cartes numériques de la topographie et du réseau de drainage de Géomatique Canada et le Modèle Numérique de Terrain.

Les cartes numériques de la topographie et du réseau de drainage ont été obtenues auprès de Géomatique Canada. L'inspection des cartes topographiques et du réseau de drainage permet d'identifier de façon préliminaire les zones de recharge et d'émergence ainsi que de localiser les endroits d'affleurement de l'eau souterraine qui se manifestent, par exemple, par des sources et des étangs. Aussi, l'examen de la densité et la forme du réseau de drainage renseigne considérablement sur les conditions hydrogéologiques qui règnent dans une région. Un modèle numérique de terrain a été généré à partir des cartes topographiques numérisées. Il a été obtenu en interpolant les valeurs d'élévation pour chacune des coordonnées des vertex compris sur les contours topographiques numérisés. Le résultat final est un quadrillage uniforme (maillage de 30 mètres) couvrant le territoire d'étude où chaque carré, ou cellule, possède une valeur propre d'altitude. Le type d'algorithme et la procédure utilisée pour ce faire sont décrits plus en détail dans l'article de Paquette (1996). La précision de l'altitude est de ± 10 mètres et la précision en longitude et latitude est de ± 30 mètres.

Les applications des modèles numériques de terrains sont multiples. Ils peuvent, entre autre, permettre la délimitation automatique des bassins versants, permettre de calibrer l'élévation de forages géoréférencés, analyser les systèmes de drainage, examiner les pentes et les formes de terrains. Les nombreux modes de visualisation disponibles pour examiner le MNT (modèle numérique de terrain) permettent d'augmenter le degré d'analyse qui peut être fait de l'information topographique.

Les cartes topographiques et du réseau de drainage nous ont été transférées sous format DXF. Le MNT est un fichier de type «*raster*», qui peut être visualisé sur MapInfo à partir de Vertical Mapper.

. Cartes pédologiques fournies par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

Les cartes pédologiques contiennent l'information concernant les paramètres physiques qui contrôlent l'infiltration et sont donc utiles pour l'évaluation de la recharge. De plus, la carte des sols est l'un des documents qui doit être utilisé pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'aide de la méthode DRASTIC.

La carte des sols numérisée du comté de Portneuf (Raymond *et al.*, 1976) nous a été fournie par le Groupe Éco-Recherche de l'Université Laval qui travaille dans la MRC de Portneuf. Le fichier était disponible sous format MapInfo. L'information originelle provient du MAPAQ.

C - Informations sur les propriétés hydrauliques:

• Rapports d'études hydrogéologiques.

De nombreuses informations hydrogéologiques intéressantes ont été obtenues à partir de rapports publics soumis au MEF ou à d'autres organismes publics. Par exemple, les rapports concernant des demandes de permis pour des sites d'enfouissement sanitaire ou les rapports sur la recherche de sources d'approvisionnement en eau souterraine par des municipalités se sont avérés des sources d'informations privilégiées. Ces rapports renferment plusieurs informations sur les propriétés hydrauliques des aquifères telles que la conductivité hydraulique, les coefficients d'emménagement, la porosité, la granulométrie et la séquence stratigraphique rencontrée en cours de forage. De plus, la composition chimique détaillée des eaux souterraines ainsi que la localisation des sources de contamination potentielles sont souvent des informations complémentaires contenues dans ces rapports. Les valeurs de conductivité hydraulique et les données sur les niveaux d'eau contenues dans ces rapports ont été utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'aide de DRASTIC. La qualité de l'information contenue dans ces rapports est généralement bonne.

Toutes les données contenues à l'intérieur des rapports ont du être saisies sur Excel. La répartition de l'ensemble de ces données est représentée sur la carte à l'Annexe E. Un total de 248 forages, représentant un pourcentage de 8% de tous les forages disponibles, a été compilé.

D- Les données concernant l'utilisation de la ressource ainsi que les activités humaines ayant lieu sur le territoire de la MRC de Portneuf et pouvant avoir un impact sur la quantité et la qualité des eaux souterraines:

Plusieurs informations concernant l'utilisation du territoire ont été récupérées à la MRC de Portneuf. Les paragraphes qui suivent énumèrent ces données et sont accompagnés d'un bref commentaire concernant leur pertinence pour les études hydrogéologiques.

• Principales prises d'eau municipales et privées.

Lors des travaux de terrain de l'été 1995, la MRC avait commencé à faire l'inventaire des prises d'eau municipales et privées existant sur son territoire. Cet inventaire comprenait la localisation des principaux systèmes de captage ainsi qu'une brève description des modes de rétention, de traitement et des capacités de ces ouvrages. Ces informations ont été ajoutées à nos propres données de terrain. Les données d'approvisionnement en eau sont très importantes car elles renseignent sur l'utilisation de la ressource en eau souterraine, les débits pouvant être extraits des formations aquifères et permettent aussi d'orienter les travaux de terrain.

• Réseaux d'aqueducs à l'extérieur des périmètres urbains.

Les municipalités et les MRC sont les principales instances où l'on peut retrouver les informations concernant les réseaux d'aqueducs. Dans le cadre de ce projet, c'est à la MRC de Portneuf que ces informations ont été recueillies. Cette information était compilée sous forme de carte thématique où étaient distingués les réseaux d'aqueducs municipaux et privés à l'extérieur des périmètres urbains. L'étendue de ces réseaux d'aqueducs donne un bon aperçu des secteurs qui sont desservis par les prises d'eau municipales et privées et permet ainsi d'identifier les zones où l'approvisionnement se fait à partir de puits individuels ou par

l'entremise de petits réseaux d'aqueducs privés. Cette information est très pertinente dans les étapes préliminaires de la cartographie hydrogéologique car elle permet de mieux cibler les campagnes de terrain telles que l'échantillonnage et les prises de mesures de niveaux d'eau.

Les cartes de localisation des prises d'eau municipales ainsi que de l'étendue des réseaux d'aqueducs hors des périmètres urbains ont été numérisées à l'aide de MapInfo. L'information accompagnant chacun de ces éléments cartographiques a été saisie à l'intérieur d'une base de données sur MapInfo.

- **Cartes des sites d'extraction.**

Les sites d'extraction de matériaux telles que les sablières et gravières sont des endroits privilégiés pour la prise de mesures de niveaux d'eau. De plus, ces sites, lorsque abandonnés, deviennent parfois les lieux de disposition de déchets domestiques et deviennent donc des sources potentielles de contamination. Les sites d'extraction se retrouvent généralement localisés sur les cartes topographiques. Par contre, l'édition de ces cartes peut parfois remonter à plusieurs années et par conséquent, les informations qu'elles contiennent sur l'utilisation du sol peuvent être désuètes. Pour s'assurer de la contemporanéité des informations, les données de la MRC ont été utilisées étant donné qu'elles provenaient des résultats d'une enquête récemment effectuée auprès des municipalités concernant l'exploitation des carrières et des ressources en granulats sur leur territoire. Au total, 279 sites d'extraction, en opération, inactifs ou abandonnés, ont été compilés.

La carte de localisation des sites d'extraction a été numérisée à l'aide du logiciel AutoCAD. La localisation de ces points ainsi que l'information les accompagnant ont ensuite été transférées sur MapInfo.

- **Sites de disposition des déchets.**

Dans les années 1980, un projet pour la conception d'un atlas environnemental était mis sur

ped par le MEF (MEF, 1985). À la connaissance de l'auteur, une seule édition de cet Atlas aurait été publiée. Aujourd'hui, ce document ne semble plus être disponible et le projet de compilation du MEF n'a pas eu de suite. Par conséquent, la majorité des informations portant sur les sites de dispositions des déchets a été recueillie à la MRC de Portneuf. 86 sites ont été inventoriés, ceux-ci comprennent : les dépôts de pneus et de neiges usées, les lieux d'enfouissement sanitaire et d'entreposage de déchets dangereux et les cimetières d'automobiles. Toutes ces informations apportent une précision supplémentaire aux cartes de vulnérabilité indiquant les activités potentiellement polluantes pour les nappes.

La carte de localisation des sites de disposition des déchets a été numérisée à l'aide du logiciel AutoCAD. La localisation de ces points ainsi que l'information les accompagnant ont ensuite été transférées sur MapInfo.

• **Zones d'épandage de fumier.**

La MRC de Portneuf regroupe de nombreux producteurs porcins, laitiers et de volailles. Le fumier produit par ces élevages constitue un fertilisant de qualité qui peut être épandu sur les champs de cultures variées. L'épandage de ces fumiers en doses raisonnables ne cause pas de dommages aux écosystèmes environnants. Cependant, lorsque les doses épandues dépassent les capacités d'absorption des sols et des plantes, les quantités excédentaires peuvent s'infiltrer plus profondément dans les sols et éventuellement atteindre la nappe phréatique. Par conséquent, la connaissance de la répartition de ces zones d'épandage aide à mieux caractériser le potentiel de contamination des eaux souterraines par ces activités. Les données concernant les zones d'épandage ont été fournies par la MRC de Portneuf. Ces données identifient uniquement les zones d'épandage et ne permettent pas de connaître la localisation et/ou l'identité des producteurs.

La carte de localisation des zones d'épandage de fumier a été numérisée à l'aide du logiciel AutoCAD. La localisation de ces points ainsi que l'information les accompagnant ont ensuite été transférées sur MapInfo.

- **Zones où se pratique la culture de la pomme de terre.**

L'identification des régions où est pratiquée la culture de la pomme de terre permet, comme dans le cas des zones d'épandage et des sites de disposition des déchets, d'améliorer les cartes de vulnérabilité. La superposition de cette information aux cartes de vulnérabilité fait ressortir les secteurs qui sont plus susceptibles d'être contaminés par les nitrates et sert donc d'outil de gestion pour la protection de la ressource.

La localisation des zones où se pratique la culture de pomme de terre nous a été fournie par la MRC de Portneuf. Cette carte était disponible sous forme papier et a donc dû être numérisée à l'aide du logiciel AutoCAD.

- **Carte de l'utilisation du sol.**

La carte de l'utilisation du sol de la MRC de Portneuf illustre la répartition des zones urbaines, rurales et forestières. De plus, les principaux corridors de transport hydroélectrique et routier y sont identifiés. Du point de vue hydrogéologique, la distinction entre les zones urbaines, rurales et forestières permet de mieux caractériser la recharge des aquifères étant donné que celle-ci dépend de la condition des sols (sols compacts, présence de béton, systèmes racinaires bien développés dans les champs où l'on cultive les petits fruits, etc.). De plus, l'identification des principaux corridors de transport hydroélectrique et routier est importante étant donné qu'ils représentent des passages sur lesquels peuvent se faire, respectivement, l'épandage d'herbicides et le transport de matières dangereuses (e.g. transport d'hydrocarbures, etc.) ou l'épandage de sels de déglacage. La caractérisation de la vulnérabilité des formations aquifères sous-jacentes à ces corridors est donc indispensable.

La carte de l'utilisation du sol était disponible sous format numérique à la MRC de Portneuf et a été intégrée aux données sur MapInfo. De plus, cette carte de l'utilisation du sol a été mise à jour par le groupe Éco-Recherche de l'Université Laval à partir de photos aériennes plus récentes. C'est cette carte d'utilisation du sol mise à jour qui a été éventuellement utilisée pour la mise en carte (Thériault *et al.*, 1996).

4.3.2 Travaux de terrains

Les travaux de terrains dans la MRC de Portneuf se sont déroulés durant les étés 1995 et 1996. Le premier été de terrain a eu pour but de se familiariser avec la région d'étude. Les travaux ont par conséquent principalement consisté en la visite des prises d'eau municipales, en la compilation des données hydrogéologiques disséminées à travers les nombreuses municipalités de la région et à la recherche et l'identification de sites d'échantillonnage géochimique des eaux souterraines. Les travaux de l'été 1996 ont essentiellement porté sur les prises de niveaux d'eau dans les formations de sables et graviers de surface. Le manque de données de niveaux d'eau dans ces matériaux ainsi que l'importance de ces aquifères comme source d'approvisionnement ont nécessité ces travaux. Plus de 226 mesures de niveaux d'eau ont été prises dans des puits de résidents (puits de surface fonctionnels), des puits d'observation appartenant au MEF, dans le fond des sablières où la nappe phréatique affleurerait, et à partir de sondages de faible profondeur réalisés à l'aide d'une tarière manuelle en bordure des fossés et dans les champs. L'altitude de la surface libre à ces divers endroits a été mesurée à l'aide d'une sonde à niveau d'eau et d'une station totale (Leica, modèle TC600). Les mesures de niveaux d'eau ont permis de connaître à divers endroits la profondeur de la nappe dans ces aquifères et de produire une carte piézométrique et. Aussi, en complément à ces travaux, 26 échantillons ont été pris dans les matériaux granulaires afin de déterminer leur granulométrie. Les résultats des analyses granulométriques ont permis d'évaluer les valeurs de la conductivité hydraulique de ces matériaux.

4.3.3 Intégration des données et outils de traitements des données

L'ensemble des données qui a été compilé dans le cadre de ce projet est présenté au tableau 4.3. On peut voir que l'ensemble de ces données touche la majeure partie des domaines que couvre l'hydrogéologie.

Comme mentionné antérieurement, la compilation des données s'est initialement faite dans un chiffrier Excel. Chacun des ensembles de données a cependant du être temporairement

Tableau 4.3 Types et sources des données qui ont été compilées pour la cartographie hydrogéologique dans la MRC de Portneuf.

SOURCES										TYPES DONNÉES		
Travaux de terrains	MÉF: Projets de surveillance Environnementale (MRC Portneuf)	Hydro-Québec	Ministère des Transports	Rapports Hydrogéologiques: Consultants / MÉF	Annuaire des Puits et forages (MÉF)	Ministère Richesses Naturelles du Québec	MÉF / division ressources hydriques	Ministère Richesses Naturelles du Canada	Municipalités Régionales de Comté			Municipalités Municipalités
											Géologie du socle	Géologie
											Géologie Quaternaire	
											Stratigraphie	
											Niveau piézométrique	Propriétés hydrauliques
											Débit	
											Débit spécifique	
											Transmissivité	
											Perméabilité	
											Capacité spécifique	
											Coef. d'emmagasinement	
											Granulométrie	
											Pénétrromètre	
											Teneur en eau	
											Limite de plast.-liquid.	
											Scissomètre	
											Sismique	
											Cisaillement	
											Compressibilité	
											Sols	Infiltration & Écoulement
											Hydrologie	
											Météorologie	
											Topographie: cartes topo.	
											Topographie: repères géo- désiques	
											MNT: Modèle Numérique de Terrain	Utilisation de la ressource de l'eau
											Prises d'eau	
											Réseaux d'aqueducs	
											Utilisation du sol	
											Disposition des déchets	
											Activités agricoles	
											Géochimie	Qualité de l'eau

■ : Données généralement excellentes

■ : Fiabilité variable

conservé à l'intérieur de fichiers distincts. En effet, la compilation de données multi-sources pose inévitablement certains problèmes d'intégration et d'uniformisation des données. Les sources diverses des données contribuent à multiplier les champs nécessaires à la description de toutes ces données. De plus, les systèmes de mesures utilisés sont souvent différents d'un ensemble de données à l'autre (unités internationales versus unités anglaises). Un effort d'uniformisation dans les champs et dans les données elles-même, suivit de l'établissement d'une base de données unique à partir de laquelle toutes les données peuvent être honorées a donc été nécessaire.

L'uniformisation des données a été effectuée par Lepage (1996) et a permis d'intégrer tous les fichiers de données en un seul ensemble. Lorsque cette étape a été terminée, une série de procédures de validation des données a été effectuée (Lepage, 1996). Les procédures ont principalement porté sur l'identification des données ayant des erreurs de localisation, des erreurs dans les niveaux d'eau ainsi que des incongruences dans les descriptions stratigraphiques de duplicatas (deux forages situés au même endroit mais n'ayant pas la même stratigraphie). Sur les 2975 données compilées, 25 données ont du être éliminées parce qu'elles n'étaient pas bien localisées. Les informations de niveaux d'eau de quelque 254 forages ont du être aussi éliminées parce qu'elles étaient incohérentes. De plus, on a noté un désaccord dans les descriptions stratigraphiques de 100 doublons. Les données disqualifiées proviennent majoritairement du système d'informations hydrogéologiques du MEF (banque de données des puisatiers).

Une fois les données colligées, validées et uniformisées, elles ont pu être transférées sur ACCESS, qui est plus approprié qu'Excel pour la gestion de données (Boisvert, 1998).

Une fois les données compilées et entreposées dans la base de données, on a pu commencer les divers traitements des données. De nombreux outils informatiques ont été utilisés pour ce faire, ceux-ci sont: MapInfo (MapInfo Corporation, 1995), SURFER (Golden Software, 1994), Vertical Mapper (Northwood Geoscience, 1995), BoreHole Mapper (Northwood

Geoscience, 1997), IDRISI (Eastman, 1997) et Arc/Info (ESRI, 1995). MapInfo a été le principal outil utilisé pour la visualisation des données, pour les tris et les requêtes ainsi que pour l'édition des cartes et leur production finale. SURFER et Vertical Mapper ont servi pour le traitement des données menant aux cartes de contours. Ces derniers outils font parti des principaux logiciels de contours utilisés dans le domaine des Géosciences. BoreHole Mapper a été développé spécifiquement pour les besoins de ce projet en partenariat avec Northwood Géoscience. Ce logiciel permet de générer des coupes stratigraphiques à partir de MapInfo en utilisant les données de forages. Les coupes stratigraphiques effectuées un peu partout sur le territoire permettent de se familiariser avec les divers contextes stratigraphiques présents dans la région. IDRISI a essentiellement servi pour la compilation de la carte finale de vulnérabilité. Le module GRID d'Arc/Info a permis de générer le maillage des pentes à partir du MNT. C'est aussi Arc/Info qui a servi de principal médium de conversion et de transfert des données entre tous ces différents logiciels.

4.4 Délimitation des aquifères granulaires de surface et leurs propriétés

4.4.1 Carte d'épaisseur totale de sédiments

Les premiers travaux de cartographie hydrogéologique ont porté sur la génération de la carte d'épaisseur totale de sédiments (ou profondeur au roc). La pertinence de cette donnée dans le cadre d'études hydrogéologiques tient au fait qu'elle permet d'identifier la localisation probable de vallées enfouies. Ces vallées peuvent contenir d'importants aquifères granulaires. Aussi, dans le cas où ces vallées seraient recouvertes d'argile en surface, on pourrait alors conclure à des conditions de nappes captives ou semi-captives dans ces aquifères. Les cartes de l'épaisseur totale de sédiments permettent aussi d'identifier les secteurs où il n'y a pas d'accumulation significative de sédiments. Ces secteurs d'affleurements rocheux forment souvent les zones de recharge des aquifères captifs en milieu fracturé.

4.4.1.1 Méthodologie

La démarche qui a été utilisée pour la réalisation de la carte d'épaisseur totale au roc comprend trois étapes, soient, la sélection et le tri des données, l'intégration et l'uniformisation de ces données en vue de les utiliser dans un modèle d'interpolation et finalement l'interpolation.

Les données disponibles pour la réalisation de la carte de la profondeur au roc étaient présentes sous deux formats, soient sous forme de données ponctuelles, tels que les données de forages ainsi que les affleurements qui sont répertoriés sur les cartes géologiques, ou sous forme de données polygonales, telles que les unités géologiques identifiant les zones d'affleurements rocheux ou de till mince sur roc répertoriées sur la carte du Quaternaire.

Données ponctuelles

Au total, dans la base de données, plus de 1753 forages ont atteint le roc et ont donc pu être utilisés pour générer la carte de l'épaisseur totale de sédiments. La distribution de ces données est présentée à la figure 4.1.

Plusieurs affleurements rocheux répertoriés sur la carte géologique du socle rocheux sont situés le long de la rivière Sainte-Anne. Cependant, ces données n'ont pas été retenues pour la création de la carte d'épaisseur totale de sédiments. En effet, même si en de nombreux secteurs la rivière coule sur le socle rocheux, les berges qui la bordent sont dans une grande majorité des cas constituées d'une épaisse couche de sédiments. Ainsi, l'attribution de cotes de 0 m d'épaisseur de sédiments le long de ces tronçons de rivières fausserait l'image réelle de la distribution de l'épaisseur de sédiments. Ainsi, seul les affleurements répertoriés à l'intérieur des terres ont été considérés. La figure 4.2 montre la distribution de ces données.

Données polygonales

Des points de contrôle pour chaque polygone correspondant à des unités de till mince sur roc ou de roc affleurant identifiées sur la carte du Quaternaire ont été ajoutés de façon

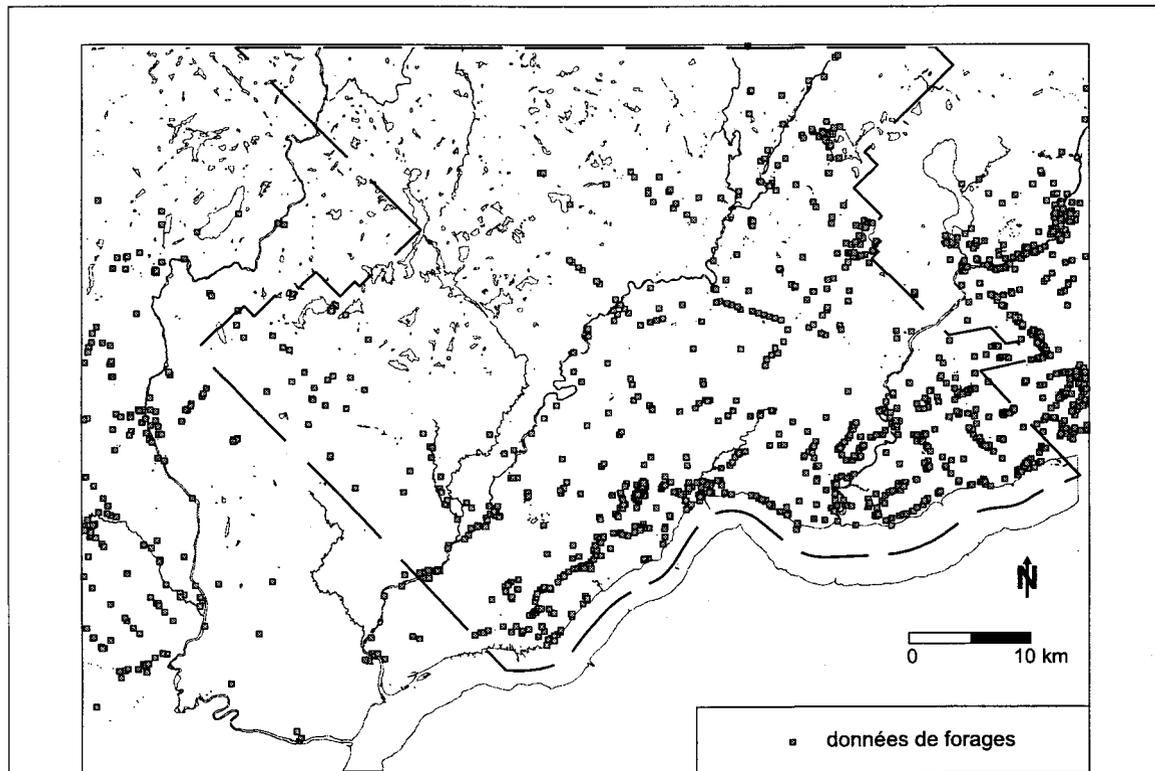


Figure 4.1: Localisation des données de forages qui ont atteint le roc.

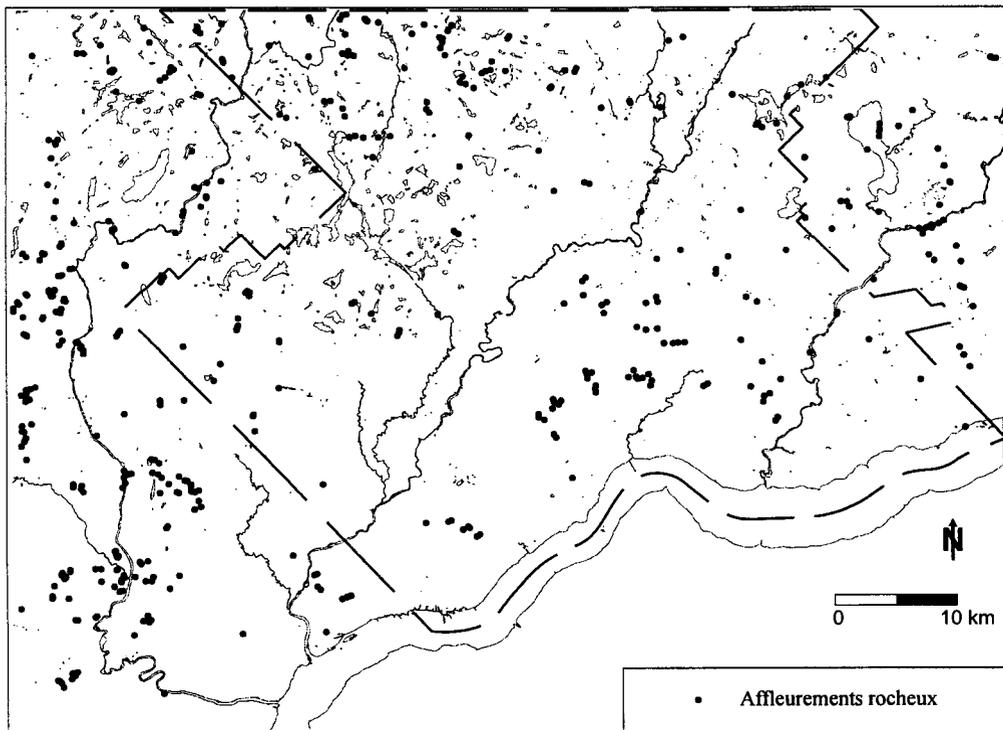


Figure 4.2: Localisation des affleurements rocheux.

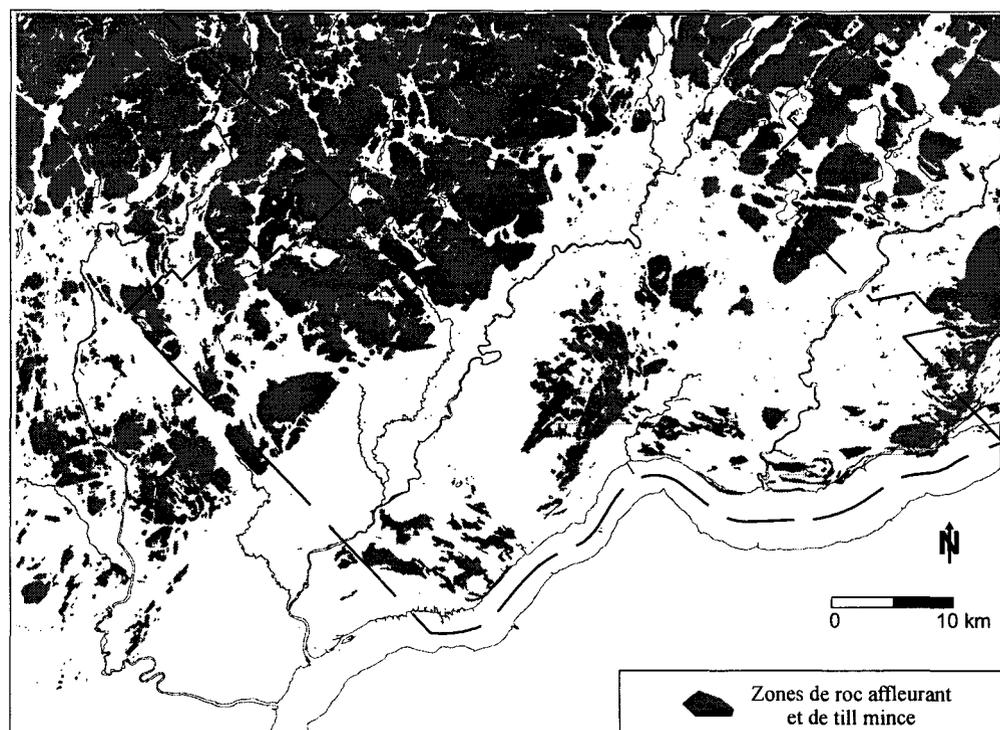


Figure 4.3: Zones de roc affleurant et de till mince.

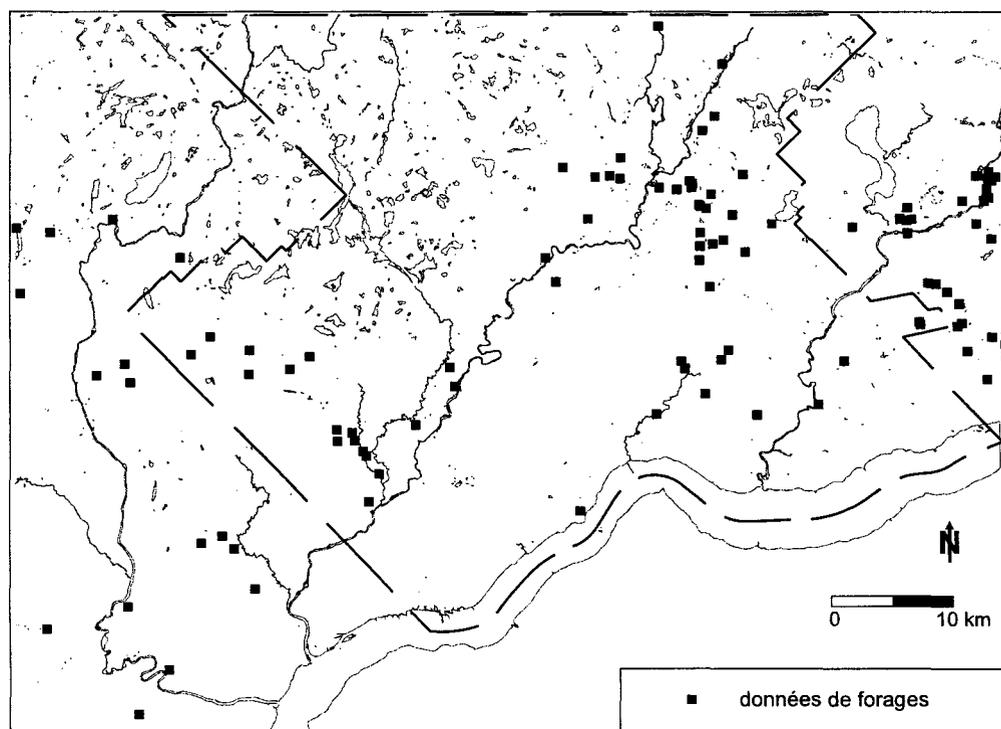


Figure 4.4: Localisation des données de profondeurs minimales au roc.

semi-automatique, c'est à dire un point de contrôle à tous les 600 mètres. Tous ces points se sont vus attribués une cote de 0.75 m de profondeur au roc. La figure 4.3 présente la répartition des unités quaternaires qui ont permis d'identifier la proximité du roc.

4.4.1.2 *Intégration et traitement des données*

L'ensemble des données décrites ci-haut a été réuni à l'intérieur d'un même fichier afin de pouvoir les soumettre à un programme d'interpolation. L'interpolation des valeurs ponctuelles de profondeur au roc s'est faite à l'aide de la méthode d'interpolation du krigeage universel. Le logiciel qui a été utilisé pour ce faire est la version 6.0 de SURFER.

Le résultat de l'interpolation a été par la suite visualisé sous forme de carte de contours sur laquelle on a ensuite superposé toutes les autres données de forages qui n'avaient jusqu'ici pas été utilisées, c'est à dire tous les forages n'ayant pas atteint le roc. Le but de cet exercice est de raffiner davantage la carte en utilisant des données d'épaisseur minimale aux endroits où 1) il y a un manque de données, et 2) aux endroits où les données d'épaisseur minimale changeraient dramatiquement l'image de la carte d'épaisseur totale de sédiments. En effet, certains de ces forages ont traversé des épaisseurs significatives de sédiments et le fait de tenir compte de ceux-ci peut contribuer à améliorer la carte. Par exemple, certaines données de forages indiquaient des valeurs d'épaisseurs de sédiments de plus de 70 mètres à des endroits où les contours issus de la première interpolation démontraient des valeurs d'épaisseur de 10 mètres. Dans ces cas précis, le fait de tenir compte des données d'épaisseur minimale augmente grandement la validité de la carte.

Ainsi, toutes les données d'épaisseurs minimales jugées pertinentes ont été incorporées aux données de base et une deuxième interpolation a été effectuée. Plus de 111 points de mesures ont été ajoutés de cette façon. La distribution de ces données est présentée à la figure 4.4.

4.4.1.3 *Représentation des résultats*

La carte de l'épaisseur totale de sédiments est présentée à l'Annexe F. Les valeurs

maximales d'épaisseur totale de sédiments sont de 90 mètres et l'intervalle des contours utilisé est de 10 m. Ce choix d'intervalle nous est apparu le plus adéquat. Il représente bien la fiabilité que l'on peut accorder aux données. Il reflète la densité et la distribution des données sur le territoire et le contexte régional dans lequel elles sont utilisées. Un choix d'intervalles plus petits aurait donné une fausse impression de précision alors que des intervalles plus larges auraient caché certains détails importants. Les données ponctuelles qui ont été utilisées pour générer la carte ont été reportées sur celle-ci.

Quatre principaux secteurs de fortes épaisseurs ressortent sur la carte, soient celui de Saint-Alban/Saint-Thuribe, Sainte-Christine, Saint-Raymond et Pont-Rouge. Les fortes épaisseurs rencontrées dans le secteur de Saint-Alban/Saint-Thuribe sont reliées à une importante séquence sédimentaire d'argiles et de silts marins. Les secteurs de Sainte-Christine, Saint-Raymond et Pont-Rouge sont aussi caractérisés par la présence de séquences de silts et d'argile mais ces secteurs sont marqués de façon plus importante par d'épaisses couches de sables et graviers de surface.

4.4.1.4 *Portée et limitations des résultats*

La carte de l'épaisseur totale de sédiments permet d'avoir, d'un coup d'oeil rapide, une idée de la distribution et de l'épaisseur de l'ensemble des séquences quaternaires. Les secteurs à fortes épaisseurs sont les secteurs à l'intérieur desquels on peut trouver des aquifères granulaires, soit en surface ou confinés. Cette carte constitue par contre un produit préliminaire menant à l'identification du potentiel aquifère dans une région. En effet, la présence ou l'absence de ces aquifères doit être vérifiée. Ceci peut être fait en observant les autres cartes hydrogéologiques, telles que la carte d'épaisseur de sables, ou en allant faire une vérification sur le terrain. En ce sens, la carte d'épaisseur totale de sédiments contribue aussi à orienter les travaux de terrain.

Pour une utilisation optimale de cette carte, il est important de considérer la distribution et la provenance des données utilisées. C'est pour cette raison que les points de contrôle ont été

reportés sur la carte. Ils permettent à l'utilisateur de juger du niveau de confiance qu'il peut accorder à la carte en fonction de la problématique envisagée ainsi que des secteurs d'intérêts visés.

Cette carte est de nature régionale et ne devrait donc pas être agrandie afin de l'utiliser pour résoudre une problématique locale. L'échelle de 1:200 000 utilisée doit être conservée afin de préserver la validité de la carte.

4.4.2 Carte de l'épaisseur de sables et graviers de surface

La plupart des aquifères productifs de la MRC de Portneuf se trouvent dans les sables et graviers de surface localisés le long des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier. Ces dépôts, qui regroupent des sables et graviers d'origines deltaïques, littorales et alluvionnaires peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur. La connaissance de la distribution des épaisseurs de sables représente la première étape menant à l'identification du potentiel aquifère dans les matériaux granulaires de surface. En effet, les débits d'extraction disponibles pour une formation donnée sont proportionnels, entre autres choses, à l'épaisseur saturée de la formation. Celle-ci est généralement proportionnelle à l'épaisseur totale de sables et graviers.

4.4.2.1 Méthodologie

L'approche qui a été suivie pour la génération de la carte d'épaisseur de sables est similaire à celle qui a été utilisée pour créer la carte de l'épaisseur totale de sédiments. C'est-à-dire que l'on a procédé au tri et à la sélection des données, suivit de l'uniformisation de celles-ci en vue de pouvoir les utiliser dans un modèle d'interpolation pour finalement procéder à l'interpolation.

En premier lieu, on a sélectionné les forages qui comprenaient une unité de sable ou de gravier en surface reposant sur une unité d'argile d'épaisseur significative, ou du socle rocheux (la base de l'unité sableuse correspond à l'argile ou au socle rocheux). Plus de 611

forages ont rempli cette condition et leur répartition est représentée à la figure 4.5. Les valeurs d'épaisseur minimale ont aussi été utilisées et ce particulièrement aux endroits où il n'y avait pas d'autres informations disponibles. Un total de 108 données d'épaisseurs minimales de sables ont été utilisées, celles-ci sont illustrées à la figure 4.6. De plus, les observations de terrain ainsi que les informations provenant de la carte du Quaternaire ont été utilisées. Les unités quaternaires identifiant les formations argileuses, de tills, et de roc affleurant se sont vues attribuées des cotes d'épaisseur de sables de 0 m. Les points de contrôle issus de la carte du Quaternaire ont été ajoutés de façon semi-automatique, c'est-à-dire qu'un point de contrôle à tous les 600 mètres à l'intérieur des polygones correspondant aux unités d'argiles, de tills et de roc affleurant a été ajouté. La répartition de ces zones de contrôle est présentée à la figure 4.7. Les observations de terrain nous ont permis d'identifier des secteurs le long de la rivière Jacques-Cartier où les épaisseurs de sables étaient très faibles. Des points de contrôle ont donc été ajoutés à ces segments de rivière pour tenir compte de l'amincissement des formations de sables à l'approche de la rivière Jacques-Cartier.

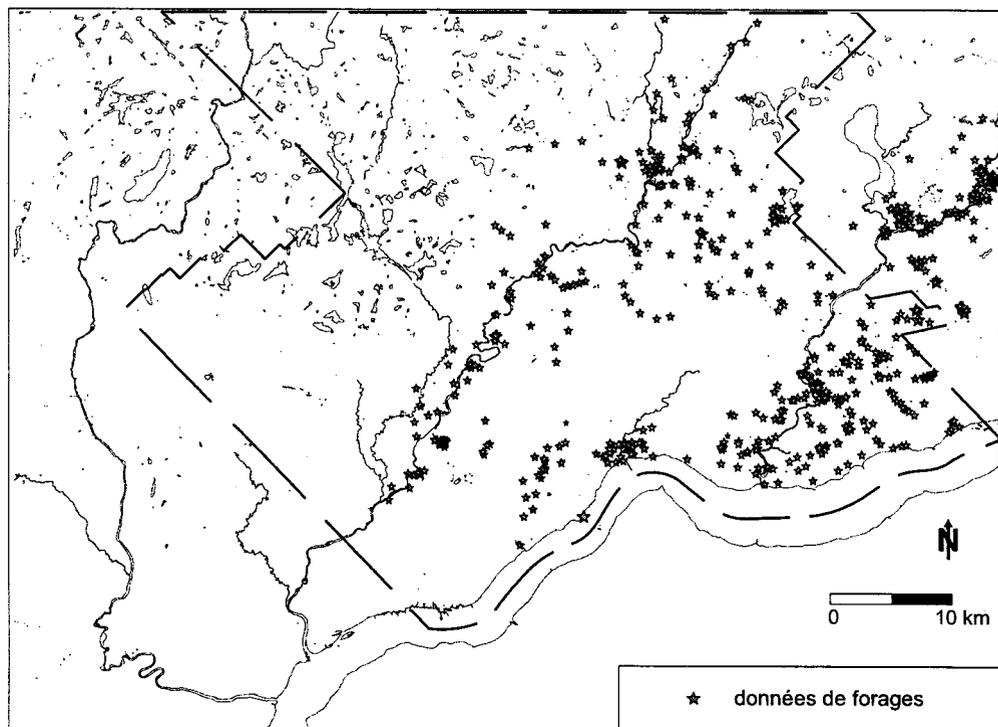


Figure 4.5: Données de forages contenant des valeurs d'épaisseurs totales de sables et graviers.

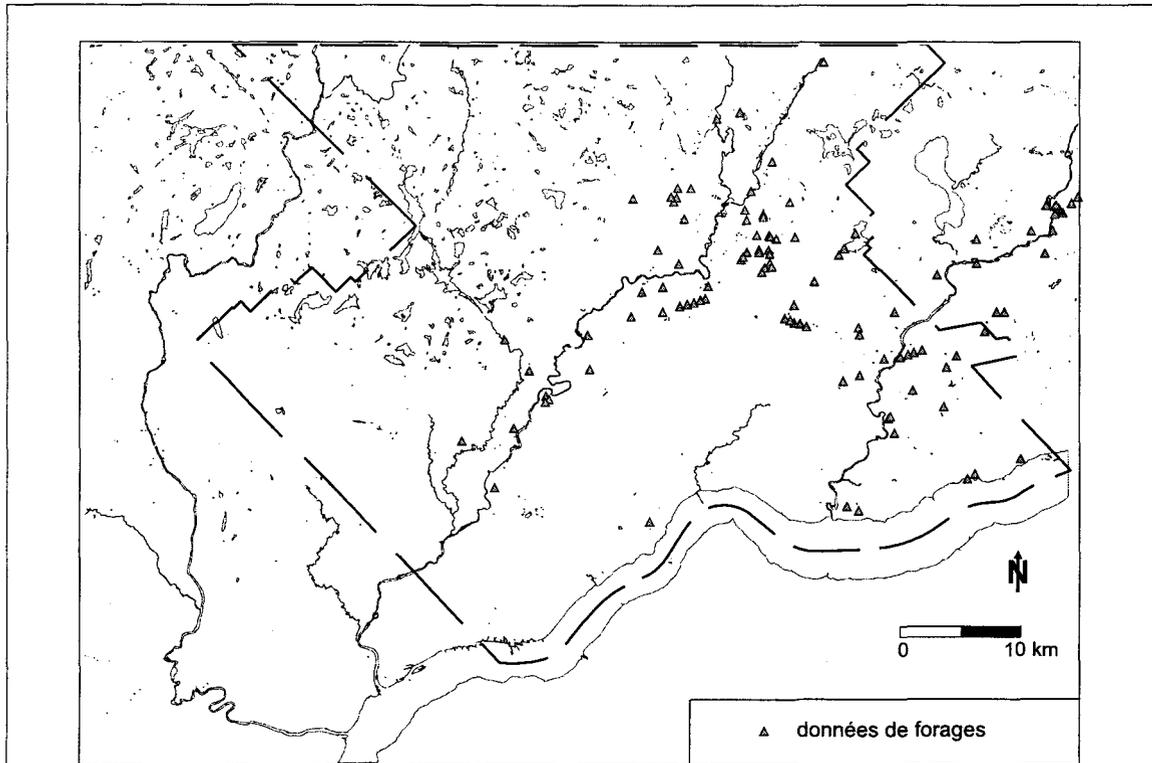


Figure 4.6: Données de forages contenant des valeurs d'épaisseurs minimales de sables et graviers.

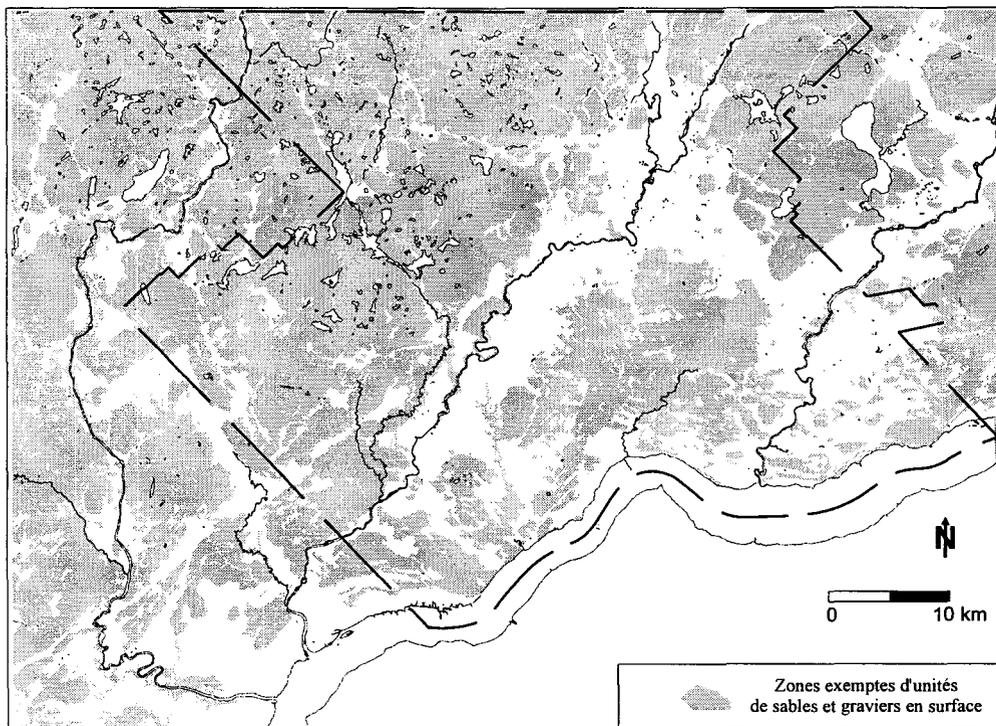


Figure 4.7: Zones exemptes d'unités de sables et graviers en surface.

4.4.2.2 *Traitement des données*

Étant donné la distribution non uniforme des points de contrôle, la fiabilité variable des données et les variations rapides d'épaisseur, nous avons arrêté notre choix sur le krigeage universel comme méthode d'interpolation. Cette méthode nous a permis de représenter de façon régionale la distribution des zones d'accumulations sablo-graveleuses importantes. Le résultat final est présenté à l'Annexe G.

4.4.2.3 *Représentation des résultats*

L'étendue occupée par les isoplèthes d'épaisseur de sables correspond généralement à la superficie qu'occupent les unités sablo-graveleuses de surface. Les intervalles sont de 5 mètres à l'exception du premier intervalle qui est de 2,5 mètres. Le choix de ces intervalles est basé sur le caractère régional des données. Les zones grises représentent le relief topographique dérivé du modèle numérique de terrain (MNT). Les régions où apparaît le MNT correspondent aux zones où l'on retrouve des formations silto-argileuses, glaciaires (till) ou de roc. Il est à noter qu'il existe des unités sableuses dans ces secteurs (cf carte des formations superficielles, Annexe D). Cependant, leur faible étendue, leur irrégularité, leur épaisseur souvent limitée ainsi que la rareté des données dans ces secteurs font en sorte que ces unités ne peuvent être représentées adéquatement à l'échelle régionale.

4.4.2.4 *Portée et limitations des résultats*

La carte de l'épaisseur des sables et graviers de surface donne un aperçu régional et préliminaire du potentiel aquifère dans les formations granulaires de surface. Pour utiliser adéquatement cette carte, il faut examiner la distribution et la provenance des valeurs ponctuelles utilisées. Tous les points de contrôle ont été reportés afin que l'utilisateur puisse juger du degré de confiance qu'il peut allouer à la carte en fonction de la problématique envisagée ou des secteurs d'intérêt.

Cette carte ne remplace pas les études locales requises pour la localisation et la conception de systèmes de captage. Elle n'indique pas non plus l'épaisseur saturée en eau souterraine des dépôts sablo-graveleux.

4.4.3 Délimitation des aquifères compris dans les sables et graviers de surface

L'érosion des dépôts laissés par le dernier épisode de déglaciation est un processus continu, et ce depuis le retrait de la mer de Champlain. Ce processus a grandement modifié le paysage que devait être celui présent lors de l'emplacement des grands systèmes deltaïques. En effet, ce qui était jadis deux grandes unités de sables et graviers associées aux rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier, a graduellement été morcelées par les rivières pour former aujourd'hui plusieurs petites unités de sables et graviers. Du point de vue hydrogéologique, ce morcellement est significatif. En effet, les rivières qui ont encaissé les dépôts ont physiquement découpé ce qu'était deux grands aquifères en plusieurs plus petits. Ces rivières constituent maintenant des limites hydrauliques isolant les aquifères les uns des autres. Ce fait a une importance considérable dans l'interprétation des systèmes hydrogéologiques. En effet, on sait maintenant que l'écoulement de l'eau qui se fait à l'intérieur d'un aquifère est indépendant de celui qui se fait dans un autre. Cette connaissance est cruciale du point de vue de la gestion de la ressource car elle permet de savoir qu'une contamination ayant lieu dans un aquifère donné n'aura pas d'impact sur un autre.

4.4.3.1 Méthodologie

La subdivision des grandes unités de sables et graviers de surface en aquifères distincts a été effectuée en utilisant le réseau de drainage et la carte d'épaisseur de sables. Toutes les principales rivières qui dissèquent les unités de sables et graviers ont été considérées comme des limites d'aquifères. Ainsi, on a identifié un total de 14 aquifères dans les formations de sables et graviers de surface.

4.4.3.2 Représentation des résultats

La carte des aquifères est présentée à l'Annexe H. La carte de fond utilisée pour représenter les aquifères est la carte d'épaisseur de sables et graviers de surface. On retrouve aussi sur cette carte les limites de chacun des aquifères avec leur nom. La nomenclature qui a été utilisée fait référence au réseau de drainage ainsi qu'aux régions administratives à l'intérieur desquelles se trouvent les aquifères.

4.4.3.3 Portée et limitations des résultats

La carte des aquifères identifie les aquifères présents dans les formations de sables et graviers de surface. Cette carte permet de constater la présence de 14 aquifères distincts. L'écoulement de l'eau souterraine est indépendant dans chacun de ces aquifères ce qui fait qu'une contamination survenant dans un aquifère ne peut se propager, en condition naturelle, à un autre aquifère. La délimitation des aquifères n'a pas été faite en fonction des limites des bassins hydrogéologiques (cf section 4.4.4) étant donné que ces limites ont été déterminées à l'échelle régionale.

4.4.4 Carte piézométrique des formations aquifères compris dans les sables et graviers de surface

Dans la MRC de Portneuf, le long des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier, se trouvent d'importants dépôts de sables. Ces dépôts, qui regroupent des sables d'origines deltaïque, littorale et alluvionnaire, renferment les principaux aquifères granulaires de surface de la MRC de Portneuf. De ces trois types de dépôts, ce sont les sables et graviers deltaïques qui contribuent le plus significativement au potentiel aquifère. En effet, leur perméabilité élevée ainsi que leur épaisseur souvent importante les rendent propices au captage de l'eau souterraine. La superposition des alluvions sur ces sables ainsi que la juxtaposition des sables littoraux contribuent à augmenter ce potentiel aquifère. Comme mentionné plus haut, ce sont dans ces aquifères granulaires de surface que les mesures de niveaux d'eau ont été effectuées. Ces données de niveaux d'eau sont essentielles pour la détermination de la piézométrie dans ces formations aquifères.

La direction de l'écoulement des eaux souterraines est une donnée importante dans de nombreux aspects en hydrogéologie. À l'échelle régionale, les cartes piézométriques peuvent être utiles pour la localisation et la conception de systèmes de captage, pour les études préliminaires portant sur la propagation des contaminants ainsi que pour la gestion conséquente de la ressource. Plus précisément, les cartes piézométriques permettent d'identifier la provenance de l'eau souterraine approvisionnant les nombreux systèmes de

captage aménagés dans les sables et graviers de surface. En ce sens, ces cartes peuvent être pertinentes pour l'évaluation préliminaire du risque que pose une activité potentiellement polluante face à un système de captage d'eau. Ces cartes peuvent aussi servir d'outil de base pour la planification de projets visant la cartographie hydrogéologique détaillée telle qu'elle doit être effectuée lors de la détermination des périmètres de protection autour des puits ou pour la localisation de sites d'enfouissement de déchets.

4.4.4.1 Relevés et sources d'information

La carte piézométrique des formations granulaires et perméables de surface a été générée à l'aide de 226 points de mesures de niveaux d'eau provenant de nos propres relevés de terrain, ainsi que de 116 autres mesures obtenues à partir des différentes banques de données disponibles (système d'informations hydrogéologiques captif du MEF -données des puisatiers-, ministères des Transports, ministère des Ressources Naturelles, Hydro-Québec, rapports de consultants). De plus, une série de points de contrôle d'élévation a été ajoutée le long des principales rivières. Les valeurs d'altitude ont été obtenues à partir du modèle numérique de terrain. Ces données sont présentées, respectivement, aux figures 4.8, 4.9, 4.10.

Les 226 données de terrain comprennent des mesures de niveaux d'eau dans des puits de particuliers (puits de surface) dont la plupart était toujours utilisés lors des mesures, de puits d'observation appartenant au MEF, dans le fond de sablières là où la nappe phréatique affleurerait, à partir de forages faits à la tarière manuelle, ainsi que sur le bord de fossés. La mesure de l'altitude de la surface libre à ces divers endroits a été effectuée à l'aide d'une station totale (théodolite électronique, précision ± 10 cm). Les 116 autres points de contrôle ont été choisis à partir des diverses banques de données, rapports et cartes qui ont été compilés dans le cadre de ce projet. La sélection de ces données a été basée sur la description stratigraphique des forages.

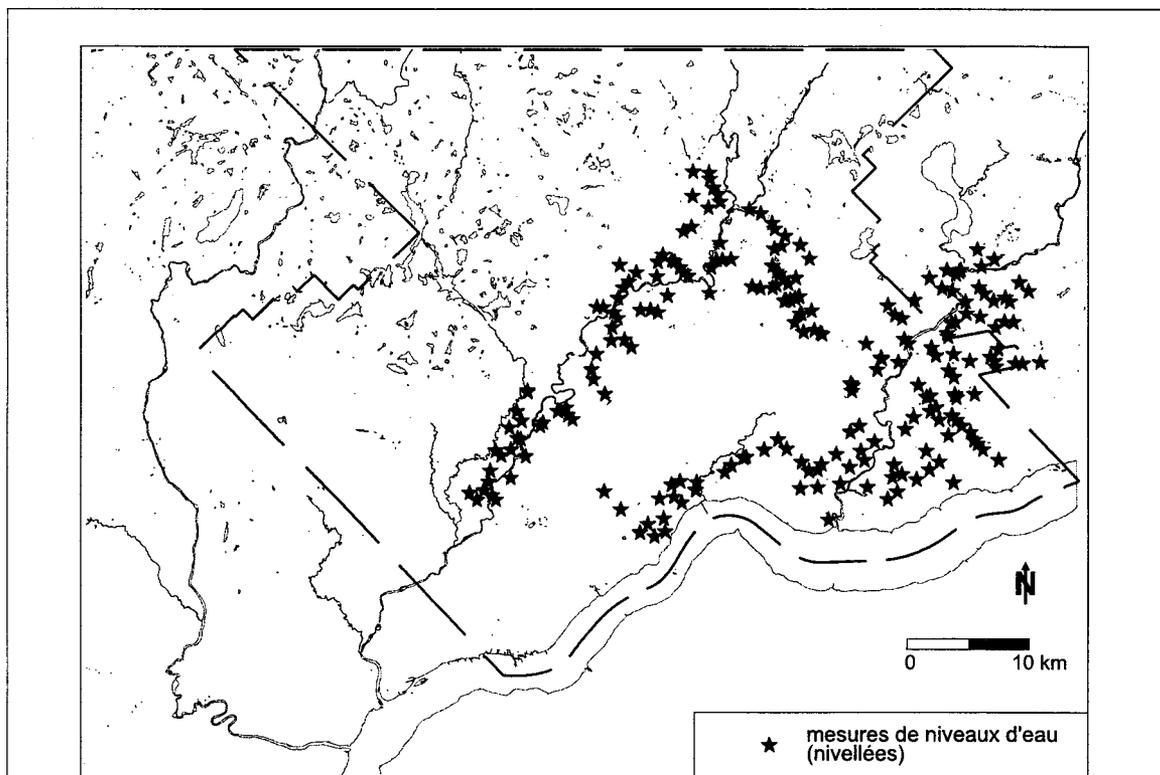


Figure 4.8: Relevés de terrain: localisation des mesures de niveaux d'eau.

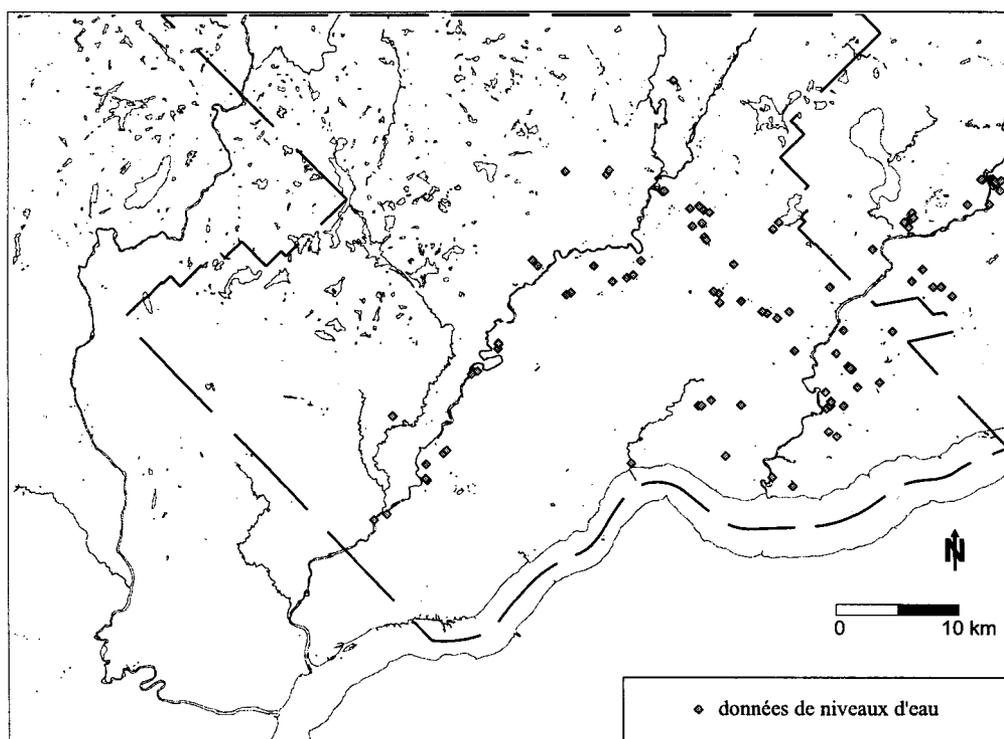


Figure 4.9: Données de niveaux d'eau provenant de la base de données.

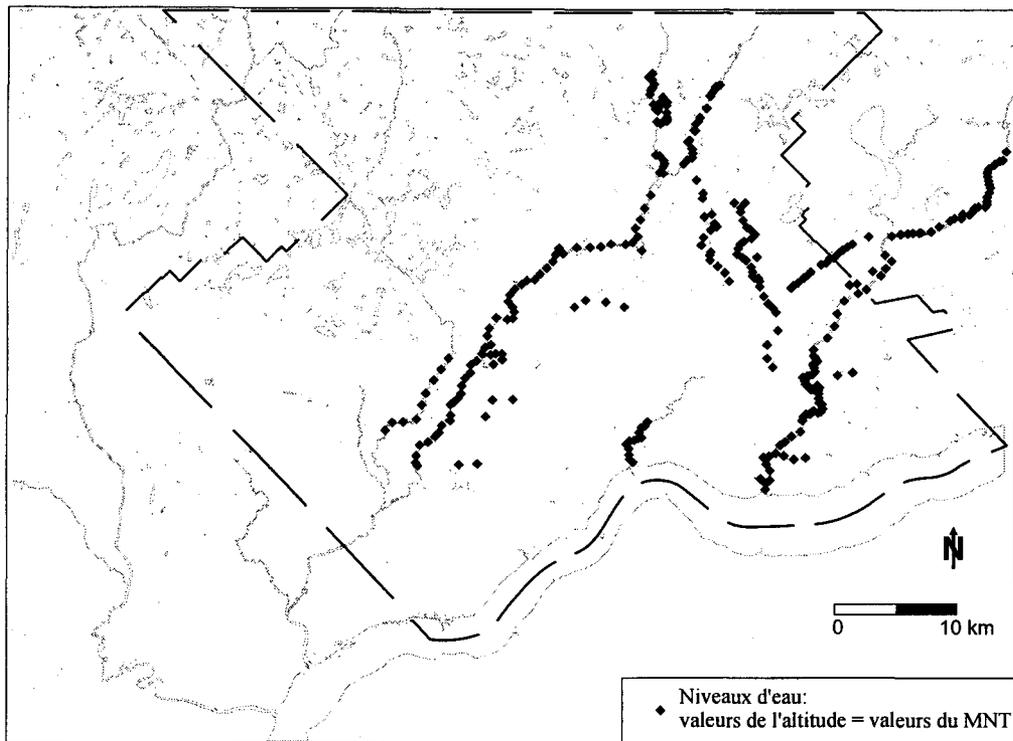


Figure 4.10: Points de contrôle de l'altitude de la nappe ajoutés le long des rivières principales.

Tous les forages dont la description stratigraphique correspondait à des sables et graviers et ayant été arrêtés dans ces mêmes matériaux sans avoir rencontrés une formation aquitard ont été retenus. L'altitude de l'eau dans ces puits ou forages a été déterminée à partir des données d'altitude provenant du MNT.

L'ajout des points de contrôle à partir du MNT pour tenir compte du réseau hydrographique a été effectué de la façon suivante: lorsque les formations poreuses avaient un lien hydraulique direct avec les rivières, les valeurs d'altitude de la surface piézométrique le long de ces segments ont été supposées égales aux valeurs de l'altitude tirée du MNT. Aux endroits où il n'y avait pas de lien hydraulique entre les formations poreuses de surface et le réseau hydrographique, une estimation de l'altitude de la nappe phréatique a été effectuée.

4.4.4.2 Traitement des données

La carte finale a été préparée en incorporant tous les différents points de mesure de niveaux d'eau à l'intérieur d'un même fichier et en les contournant à l'aide d'iso-lignes. La méthode d'interpolation utilisée pour générer ces iso-lignes a été la triangulation à l'aide du logiciel Vertical Mapper. Le résultat de l'interpolation est présenté sur la carte contenue à la pochette 1.

4.4.4.3 Représentation des résultats

Cette carte montre en plan le tracé de la surface libre (surface de la nappe phréatique) dans les aquifères granulaires de surface à l'aide d'iso-lignes qui sont exprimés en mètres au-dessus du niveau de la mer. Chacune des iso-lignes représente une valeur de la charge hydraulique exprimée en mètre par rapport au niveau de la mer. Les valeurs de l'altitude des iso-lignes vont de 0 m, au niveau du fleuve, jusqu'à 195 mètres, aux limites nord de la carte. Une échelle de couleur passant du bleu au rouge a été choisie pour illustrer cette gradation de l'altitude de la surface libre. Pour connaître la direction de l'écoulement de l'eau à l'aide de cette carte, il suffit de tracer des droites perpendiculaires aux iso-lignes. La direction de l'écoulement se fait des iso-lignes dont la valeur de l'altitude est plus élevée vers les iso-lignes aux valeurs plus faibles. Des flèches montrant la direction de l'écoulement ont été tracées en différents endroits afin de mieux illustrer ce principe. Les traits pointillés représentent les lignes de partage des bassins hydrogéologiques. Ces endroits correspondent aux régions topographiques élevées par rapport aux rivières qui les bordent et sont généralement les lieux où se fait une grande partie de la recharge des aquifères. L'étendue occupée par les contours piézométriques correspond généralement à la superficie qu'occupent les unités de sables et graviers de surface. Les zones grises représentent le relief topographique qui a été dérivé à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Les régions où apparaît le MNT correspondent aux zones où l'on retrouve des formations d'argile, de till ou de roc. La piézométrie n'a pas été déterminée dans ces secteurs étant donné l'absence de dépôts importants de sables et graviers. L'eau contenue dans ces formations géologiques circule très lentement et est peu ou pas impliquée dans les processus d'écoulement que l'on

observe dans les milieux granulaires perméables de surface. Il est toutefois à noter qu'en dessous des unités peu perméables de silt, d'argile et de till peuvent se trouver des horizons à fort potentiel aquifère tels que des sables et graviers. Ainsi, l'utilisation du MNT ne doit pas être comprise comme le signe de l'absence d'aquifères mais plutôt le fait du faible potentiel aquifère en surface.

La localisation des relevés de terrain est aussi indiquée sur la carte à l'aide de symboles triangulaires. L'endroit où ont été effectuées les mesures est indiqué à l'aide d'un chiffre positionné au-dessus du triangle, les valeurs de l'altitude de la nappe phréatique sont indiquées à droite du symbole, la profondeur à la nappe se retrouve en bas de celui-ci, et la profondeur de l'excavation (sablère, gravière), lorsque pertinente, est indiquée à gauche.

Le type de lien hydraulique entre les formations aquifères de sables et graviers de surface et les principales rivières qui les drainent (Sainte-Anne et Jacques-Cartier) est indiqué sur la carte à l'aide de segments colorés le long de ces mêmes rivières. Les segments verts indiquent un lien direct entre la rivière et la formation aquifère, c'est-à-dire que la rivière coule sur le matériel aquifère qui est composé de sables et graviers. Dans certains cas, l'épaisseur de sables et graviers sous la rivière peut être très mince, laissant apparaître ici et là des affleurements rocheux. Il n'en demeure pas moins que le lien hydraulique entre l'aquifère et la rivière, même dans ces conditions, reste ininterrompu. Les segments bleus indiquent que l'eau souterraine suinte le long des berges composées de silts et d'argiles. Dans ces cas, le lit de la rivière repose soit sur les unités silto-argileuses soit sur le socle rocheux. Lorsque le roc est présent, des segments de couleur orangée sont alors utilisés. Les segments roses correspondent à des zones où l'eau souterraine suinte le long des berges composées de silts et d'argiles ou de roc. L'épaisseur des séquences silto-argileuses, lorsque présentes, est généralement moindre que celle que l'on retrouve dans le cas des segments bleus. Dans ce cas, le lit de la rivière repose principalement sur les formations rocheuses du Paléozoïque composées de calcaires et de shales.

D'autres informations jugées pertinentes sont ajoutées à la carte piézométrique, telles que: les prises d'eau municipales et privées, les réseaux d'aqueducs hors des périmètres urbains, le réseau routier ainsi que les limites municipales et de la MRC sont présentées. Les types de captage (sources captées, puits au roc ou dans les dépôts meubles, eau de surface) sont identifiés à l'aide de cercles de différentes couleurs dont la dimension est proportionnelle aux débits moyens pompés.

4.4.4.4 Portée et limitations des résultats

La carte piézométrique des formations aquifères comprises dans les sables et graviers de surface indique les directions générales de l'écoulement des eaux souterraines dans ces formations granulaires. La cartographie de la piézométrie a été effectuée à l'échelle du 1:100 000 et en ce sens permet d'avoir un aperçu régional de l'écoulement. Cette carte ne peut remplacer les études à échelles locales portant sur des problématiques qui nécessitent une plus grande précision dans les résultats et un meilleur contrôle de la piézométrie.

CHAPITRE 5

VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES DE LA MRC DE PORTNEUF

5.1 Problématique

L'intensification des activités agricoles et d'élevage, l'apparition de sites d'entreposage de déchets divers et les déversements accidentels de produits toxiques représentent quelques-uns des nombreux facteurs pouvant affecter la qualité des eaux souterraines. Déjà, au Québec, de nombreux cas de contamination de l'eau souterraine provenant des activités humaines ont été rapportés. À titre d'exemple, les prises d'eau publiques de deux municipalités dans la région de Portneuf, soient Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier et Pont-Rouge, ont dû être abandonnées à cause de la présence respective de pesticides et de nitrates. Ces deux cas relatant la dégradation ponctuelle de la qualité de l'eau dans la MRC de Portneuf ne sont pas uniques et il est donc primordial d'exercer un meilleur contrôle de la qualité des eaux souterraines.

Qu'elle soit d'envergure régionale ou locale, la contamination sporadique des eaux souterraines par de nombreuses substances chimiques est une réalité et constitue aujourd'hui une des questions environnementales les plus pressantes que l'on se doit d'aborder. De plus, les coûts reliés à la décontamination sont souvent très élevés. Des mesures de protection doivent donc être mises en place pour que l'eau souterraine reste une ressource de qualité qui soit disponible en quantité suffisante pour les populations qui en dépendent. La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination est un des nombreux outils qui est à notre disposition pour la protection de cette ressource à l'échelle régionale (Golder Associates Ltd., 1995). L'identification des zones vulnérables permet une meilleure gestion de la ressource en offrant un guide sur lequel les gestionnaires du territoire peuvent se baser pour mener à bien leurs activités d'aménagement du territoire tout en minimisant l'impact qu'elles peuvent avoir sur l'eau souterraine. Les mesures de protection entreprises en fonction de la vulnérabilité des eaux souterraines doivent tenir compte du fait qu'une protection insuffisante peut résulter en une contamination de l'eau souterraine alors que des

mesures de protection excessives peuvent nuire inutilement au développement socio-économique d'une région. Aussi, l'équilibre entre les bénéfices que procurent les diverses activités humaines et les tords potentiels qu'elles peuvent causer à la ressource en eau souterraine doit être justement atteint.

Les pages suivantes décrivent de façon plus détaillée les fondements sur lesquels se base le concept de la vulnérabilité, donnent un bref aperçu des divers types de méthodes utilisées pour son évaluation, en accordant une attention particulière à la description de la méthode DRASTIC, traitent des limitations de chacun des types de méthodes et discutent des contraintes d'utilisation des cartes de vulnérabilité. Aussi, une vue d'ensemble des travaux sur la caractérisation de la vulnérabilité au Québec est donnée et certaines des limitations relevées à partir de la littérature concernant l'application de la méthode DRASTIC au territoire québécois sont citées.

5.1.1 Définition des termes

Il est important de mentionner qu'il n'existe à ce jour aucune définition officielle de la vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994). Certains auteurs mettent l'emphase sur la détermination des facteurs et des causes qui rendent les aquifères vulnérables, d'autres préfèrent donner une définition large sans spécifier les facteurs régissant cette vulnérabilité. L'utilisation généralisée d'un terme plus ou moins bien défini peut porter à confusion et venir obscurcir la compréhension générale de la vulnérabilité. C'est pourquoi un consensus sur la définition de la vulnérabilité serait souhaitable. C'est en ce sens que les auteurs de la publication "Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability" (Vrba et Zaporozec, 1994), qui constitue la première compilation exhaustive des concepts, méthodes d'évaluation et avancements en ce qui a trait à la vulnérabilité des eaux souterraines, ont proposé la définition suivante de la vulnérabilité : "La vulnérabilité est une propriété intrinsèque des systèmes aquifères qui dépend de la sensibilité qu'ont ces systèmes aux impacts humains et naturels".

Comme cette définition l'indique, la vulnérabilité des aquifères n'est pas seulement causée par les activités humaines mais est aussi attribuable aux processus naturels tels que les séismes, les périodes de sécheresse, etc. Quelques cartes de vulnérabilité ont été produites pour prédire les différents impacts que pourraient avoir ces processus naturels sur les régimes aquifères (Vrba et Zaporozec, 1994). Par contre, le contexte environnemental d'aujourd'hui a fait que la plupart des méthodologies développées pour l'évaluation de la vulnérabilité ont été orientées vers la résolution des problèmes posés par l'introduction de contaminants dans les systèmes aquifères. Par conséquent, tout au long de ce mémoire, nous traiterons exclusivement de la vulnérabilité des eaux souterraines posée par les facteurs anthropiques.

Dans le but de mieux évaluer la sensibilité des aquifères aux impacts humains, et pour tenir compte des différentes approches disponibles pour ce faire, deux catégories de vulnérabilité ont été définies : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Vrba et Zaporozec, 1994). La vulnérabilité intrinsèque considère uniquement les paramètres naturels d'un site influençant sa vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994). Pour sa part, la vulnérabilité spécifique, en plus de tenir compte des facteurs intrinsèques, considère l'impact que peuvent avoir certaines activités sur la qualité des eaux souterraines (Vrba et Zaporozec, 1994). Par exemple, dans l'évaluation de la vulnérabilité spécifique on tiendra compte de la nature du contaminant, son mode d'emplacement (source ponctuelle ou diffuse) ainsi que les activités humaines qui ont effectivement lieu sur un territoire et qui posent un risque réel de contamination. La vulnérabilité spécifique donne donc un aperçu dynamique du contexte hydrogéologique en y associant la notion de risque de contamination. Plusieurs autres appellations sont communément utilisées dans la littérature pour exprimer ces deux termes. Par exemple, mentionnons les termes «sensibilité» (Berg et Abert, 1994; Keefer, 1995; US EPA, 1991), «susceptibilité à la contamination» (US EPA, 1991), «potentiel de pollution» (Evans et Myers, 1990) et «vulnérabilité» (Aubre, 1992) qui expriment ce qui est énoncé dans la définition de la vulnérabilité intrinsèque donnée par Vrba et Zaporozec (1994). Aussi, les termes tels que «vulnérabilité des aquifères» (US EPA, 1991; 1993), «vulnérabilité des aquifères à la pollution» (Foster, 1987) «probabilité de contamination» (Evans et Myers,

1990), «vulnérabilité de l'aquifère» (Vrba et Zaporozec, 1994), «vulnérabilité totale» (US EPA, 1991) et «évaluation du risque» (Aubre, 1992) ou risque à la pollution (Hiscock *et al.*, 1995) sont souvent utilisés pour référer à la vulnérabilité spécifique telle que définie par Vrba et Zaporozec (1994).

Les cartes de vulnérabilité intrinsèque sont généralement produites et utilisées dans les phases initiales de projets de planification de la gestion de la ressource en eaux souterraines. Ce sera généralement dans les étapes plus avancées de la planification que les cartes de vulnérabilité spécifique seront produites et utilisées. Les zones à évaluer en terme de vulnérabilité spécifique pourront être sélectionnées à partir des régions sensibles, présentant des valeurs élevées de vulnérabilité, identifiées sur les cartes de vulnérabilité intrinsèque.

5.1.2 Vulnérabilité et processus d'atténuation

Le principe de base qui sous-tend la notion de la vulnérabilité est fondé sur l'existence de processus d'atténuation des contaminants à l'intérieur des sols et matériaux granulaires constituant les diverses unités du sous-sol géologique (Vrba et Zaporozec, 1994). Ces phénomènes d'atténuation sont causés par l'interaction de plusieurs différents processus physiques, chimiques et biologiques. Le tableau 5.1 présente les principaux processus et réactions responsables de l'atténuation des contaminants (Vrba et Zaporozec, 1994). L'intensité et l'occurrence de ces processus en un endroit donné peuvent varier grandement tout dépendant de la géologie du site et du type de contaminants qui y est introduit. C'est cette variation dans l'occurrence et l'intensité des processus d'atténuation qui fait que certains terrains sont plus vulnérables que d'autres à la contamination. Plusieurs méthodes sont disponibles pour caractériser la vulnérabilité de ces zones mais aucune n'est encore universellement acceptée. Les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité d'une région ou d'un site à l'aide d'une de ces méthodes sont généralement représentés sur une carte à l'aide de polygones dont la coloration, les indices ou les qualificatifs qui s'y rattachent permettent de connaître leur vulnérabilité relative à la contamination.

Tableau 5.1: Liste des divers processus naturels ayant un impact sur l'atténuation des contaminants (modifié de Vrba et Zaporozec, 1994).

Processus Géochimiques	Processus Biochimiques	Processus Physique	Processus Biophysique
Réactions acide-base Adsorption-désorption Complexation Oxydation-réduction Solution-précipitation	Synthèse cellulaire Biodégradation Transpiration	Advection Dispersion Évaporation Filtration Transport des gaz Désintégration radioactive	Filtration des micro-organismes Transport des micro-organismes

En résumé, tout dépendant du contexte hydrogéologique, les eaux souterraines sont en mesure de profiter d'une protection naturelle contre les menaces présentées par les diverses activités humaines. L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines permet de déterminer le degré de protection des eaux souterraines face à ces divers facteurs. Le regroupement de cette information sur une carte synthèse devrait donc constituer un outil des plus efficace pour la gestion et la protection de la ressource en eaux souterraines.

Avant d'introduire les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, un bref aperçu des paramètres naturels influençant la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique des aquifères est présenté ci-dessous.

5.1.3 Paramètres utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque

Les principaux éléments du milieu naturel influençant le degré de protection des aquifères et qui sont généralement pris en considération lors de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque sont : les sols, la zone vadose, le type d'aquifère et la recharge (Vrba et Zaporozec, 1994). D'autres facteurs considérés moins importants dans les processus d'atténuation mais qui ont quand même un impact sur la vulnérabilité des aquifères sont: la topographie et la couche géologique sous-jacente à l'aquifère (Vrba et Zaporozec, 1994). Les principales caractéristiques qui sont évaluées pour chacun de ces paramètres sont décrites dans les paragraphes suivants et résumées au tableau 5.2. On peut constater que les

informations nécessaires pour bien évaluer le potentiel protecteur d'une région donnée peuvent être considérables.

Tableau 5.2: Principaux paramètres et facteurs utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (tiré et modifié de Vrba et Zaporozec, 1994).

Sols	Zone non saturée	Aquifère	Recharge
Principaux facteurs			
Texture Structure Épaisseur Composition Perméabilité Matière Organique Pourcentage d'argile	Épaisseur Lithologie Perméabilité	Épaisseur Porosité effective Conductivité hydraulique Lithologie Direction d'écoulement de l'eau souterraine	Recharge annuelle nette Précipitation annuelle

5.1.3.1 Les sols

Les sols jouent un rôle très important dans les processus d'atténuation des contaminants. Ce fait réside dans leur capacité à contrôler la quantité d'eau qui s'infiltré à travers eux (perméabilité) et à leur potentiel de biodégradation (Vrba et Zaporozec, 1994; Aller *et al.*, 1987).

Les sols constitués de silts et d'argiles sont peu perméables et restreignent l'écoulement de l'eau. Plus les quantités d'argiles et de silts dans les sols seront importantes, moins grandes seront les chances pour que le contaminant soit entraîné par la recharge à travers les sols et qu'il atteigne éventuellement la nappe phréatique. Pour leur part, les sols grossiers ont des perméabilités élevées et laissent l'eau s'infiltrer rapidement à travers ceux-ci. Ils offrent un très faible potentiel d'atténuation.

Outre sa composition, la texture et la structure des sols vont aussi influencer l'intensité des processus d'atténuation (Keefer, 1995; Aller *et al.*, 1987). Ainsi, la présence seule d'argile dans un sol n'est pas suffisante pour freiner la propagation verticale des contaminants.

Encore faut-il connaître son degré de cohésion. Dans le cas d'un sol argileux fissuré, les contaminants pourront emprunter les plans de faiblesses créées par les fissures pour s'acheminer plus rapidement vers la zone vadose. D'autres types de fissures telles que les macro-pores produits par les divers organismes vivant dans les sols constituent aussi d'autres conduits permettant au contaminant de rejoindre les niveaux inférieurs du sous-sol sans avoir subi aucune altération (Vrba et Zaporozec, 1994).

D'autres facteurs tels les processus d'adsorption, de filtration et de biodégradation jouent un rôle important au niveau des sols et peuvent grandement altérer la dynamique de propagation du contaminant à travers le reste du système aquifère (Aller *et al.*, 1987). Par exemple, l'adsorption de contaminants est particulièrement favorisée par la présence d'adsorbants tels que les argiles, zéolites, hydroxydes et hydrates de fer et manganèse, hydrates d'aluminium et de substances organiques (Vrba et Zaporozec, 1994). De plus, la présence de matières organiques dans les sols procure un environnement propice pour la vie de nombreux micro-organismes dont certains ont la capacité d'utiliser le contaminant comme source d'énergie et donc de contribuer à sa dégradation (Keefer, 1995).

L'atténuation des contaminants est aussi fonction de l'épaisseur de sol qu'a à traverser un contaminant (Aller *et al.*, 1987). Dans le cas d'un sol épais, les processus d'atténuation pourront avoir lieu sur une plus grande surface et durant une plus grande période. Ceci favorisera la dégradation et le retard du contaminant vers les zones vadose et aquifère.

Il faut être critique face à la capacité d'atténuation des sols: elle n'est pas illimitée et possède un seuil de rendement. Cette capacité d'atténuation peut facilement être désamorcée si la quantité ou le type de contaminant déversé est tel qu'il excède le seuil de rendement. De plus, le temps requis pour que le sol retrouve ses caractéristiques initiales peut être très long, ce qui inhibera à court et possiblement à long terme son potentiel de protection des eaux souterraines.

5.1.3.2 La zone vadose

La zone vadose est la portion non-saturée de l'aquifère située au-dessus de la nappe phréatique (Freeze et Cherry, 1979). Le type de matériel qui la constitue, la perméabilité verticale ainsi que son épaisseur (profondeur à la nappe) sont les principaux facteurs influençant l'atténuation des contaminants (Vrba et Zaporozec, 1994). Le type de matériel déterminera à quel degré les mécanismes d'atténuation tels que : la biodégradation, neutralisation, filtration mécanique, l'advection et la dispersion seront actifs au sein de la zone vadose (Aller *et al.*, 1987). Par exemple, les matériaux fins, tels que les silts et argiles, offrent une plus grande surface de réaction pour un même volume de matériel par rapport aux sables et graviers, et leur présence contribue à augmenter l'adsorption ainsi que l'intensité des interactions entre le matériel géologique et le contaminant et par conséquent augmente son atténuation. La perméabilité verticale à l'intérieur de la zone vadose détermine la rapidité à laquelle le contaminant traversera cette zone et atteindra la nappe phréatique. Aussi, plus la perméabilité est élevée et plus rapide sera le parcours et moins intense seront les processus d'atténuation. De plus, l'épaisseur de l'unité contribuera à retarder l'arrivée du contaminant à la nappe d'eau souterraine ainsi qu'elle déterminera la période à l'intérieur de laquelle les processus d'atténuation pourront avoir lieu (Aller *et al.*, 1987).

Il est important de mentionner qu'en général l'effet des processus d'atténuation des contaminants s'affaiblit à mesure que l'on s'achemine plus profondément vers les couches inférieures du sous-sol géologique (Vrba et Zaporozec, 1994; Aubre, 1992). Ceci peut être expliqué par le fait que la présence de matière organique et de plusieurs des principaux adsorbants ainsi que l'intensité de l'activité microbienne diminuent lorsque que l'on quitte les horizons de sols vers les zones vadose et aquifère. Néanmoins, l'atténuation causée par les processus biochimiques, biophysiques et géochimiques dans ces zones est toujours active mais en moindre intensité, et ce sont les processus physiques tel que l'advection et la dispersion qui deviennent les facteurs prédominants (Vrba et Zaporozec, 1994; Aubre, 1992; Keefer, 1995).

5.1.3.3 La zone aquifère

Les principaux facteurs qui déterminent la capacité du milieu aquifère à transporter ou à atténuer les contaminants sont : le type de matériel, l'épaisseur, la porosité effective (le pourcentage des pores en interconnexion), la conductivité hydraulique et la direction de l'écoulement (Vrba et Zaporozec, 1994).

Comme pour la zone vadose, la perméabilité du matériel aquifère détermine la rapidité à laquelle peut se propager le contaminant. Cette information permet d'évaluer l'étendue de la contamination probable ainsi que l'intensité des processus d'atténuation qui pourront avoir lieu (Aller *et al.*, 1987). Un aquifère constitué de matériaux grossiers offrira peu de résistance à la contamination alors qu'un aquifère constitué de matériel fin limitera la migration des contaminants ainsi qu'il favorisera les phénomènes d'atténuation (adsorption et filtration par exemple).

Les processus d'atténuation sont aussi dépendant de l'épaisseur et l'étendue de l'aquifère (Aller *et al.*, 1987). Par exemple, un contaminant soluble se propageant à l'intérieur d'un aquifère épais et de grande superficie pourra être plus efficacement dilué (Aller *et al.*, 1987). La dilution du contaminant jusqu'à des concentrations respectant les normes de potabilité pourrait être ainsi envisageable. Par contre, dans un contexte où le contaminant est peu soluble, l'étalement de celui-ci à l'intérieur d'un vaste aquifère aurait pour effet d'amplifier l'étendue de la contamination et d'augmenter les difficultés de la restauration du site (Fetter, 1993). En général, un aquifère épais de grande étendue favorisera l'atténuation des contaminants solubles grâce au processus de dilution (Vrba et Zaporozec, 1994). En ce qui concerne les contaminants non soluble, l'étude de leurs propriétés physico-chimiques ainsi que la dynamique de propagation est préalable avant d'émettre des hypothèses concernant l'éventuel impact des processus d'atténuation offerts par ce type d'aquifère (Fetter, 1993). Assumant que la densité du contaminant est similaire à celle de l'eau, la direction de l'écoulement régit par le gradient hydraulique déterminera si la contamination de l'aquifère s'effectuera en superficie ou en profondeur. Par exemple, un fort gradient vertical en

direction de la surface, tel qu'on en retrouve à l'intérieur des zones d'émergence, contribuera à limiter la propagation de la contamination à l'intérieur de l'aquifère. La direction et l'importance des gradients peuvent donc avoir des conséquences importantes sur la gravité des dommages causés à l'aquifère.

5.1.3.4 La Recharge

La recharge annuelle nette est la portion des eaux provenant des précipitations qui s'infiltré jusqu'à l'aquifère pour le réalimenter à chaque année (Freeze et Cherry, 1979). Cette donnée est importante car le transport vertical et le lessivage des contaminants en dépendent. Plus la valeur de la recharge sera grande et plus le potentiel de contamination de la nappe sera grand. La recharge constitue le véhicule par excellence pour le transport des contaminants jusqu'à la nappe (Aller *et al.*, 1987).

5.1.4 Paramètres utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité spécifique

En contraste avec l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque qui requiert uniquement l'appréciation des paramètres naturels formant les systèmes aquifères, l'évaluation de la vulnérabilité spécifique, en plus d'inclure les paramètres naturels, tiendra compte des paramètres relatifs aux types de contaminants, aux activités humaines ou par exemple aux populations à risque. Ainsi, on tiendra compte par exemple de l'impact spécifique d'un certain type de contaminant sur un milieu géologique particulier. En effet, comme mentionné plus haut, de par la variété des propriétés physico-chimiques et toxicologiques des substances chimiques, certains contaminants réagiront différemment au contact d'un même média aquifère (Vrba et Zaporozec, 1994). Cet état de fait peut conduire à l'accroissement de la vulnérabilité ou à l'inverse, si les capacités d'atténuation des matériaux géologiques ont été augmentées par l'introduction du contaminant (Vrba et Zaporozec, 1994). De plus, il est possible qu'aucun des processus d'atténuation n'affecte un contaminant récalcitrant et que celui-ci atteigne la nappe phréatique sans avoir été altéré ou ralenti dans sa trajectoire.

Un aspect majeur qui est souvent considéré lors de l'évaluation de la vulnérabilité spécifique est l'utilisation du sol (Vrba et Zaporozec, 1994). Par exemple, les sols d'une région urbanisée ne peuvent offrir les mêmes potentiels protecteurs des sols forestiers. La présence de zones bétonnées, et de sols remaniés réduisent d'une façon significative l'impact de ceux-ci sur la protection des aquifères (Vrba et Zaporozec, 1994). Ces facteurs doivent être pris en considération car ils peuvent profondément diminuer l'intensité des processus d'atténuation. Aussi, la présence d'activités potentiellement polluantes telles que les sites de disposition de déchets ou par exemple l'épandage de fertilisants sur les terres agricoles contribuent à l'augmentation du risque de contamination et doivent donc être considérés. En terme général, plus la densité de la population est grande et plus les risques de contamination seront élevés (Vrba et Zaporozec, 1994). La probabilité pour que la population entre en contact avec la contamination peut aussi être prise en considération (Vrba et Zaporozec, 1994). Pour ce faire, on tiendra compte de la proximité de la source de contamination à des puits ou des aquifères exploités. De plus, une évaluation des groupes d'individus d'une population qui sont le plus à risque, i.e. enfants, adultes ou travailleurs, peut s'avérer nécessaire pour bien mesurer l'impact réel d'un contaminant (Aller *et al.*, 1987).

Étant donné qu'elle fait généralement intervenir une grande quantité de paramètres dont la compilation peut s'avérer laborieuse et l'évaluation complexe et coûteuse, l'évaluation de la vulnérabilité spécifique est généralement effectuée dans le cadre de projets locaux en vue de résoudre une problématique bien précise, le plus souvent celle-ci étant reliée au potentiel de contamination posé par des sources ponctuelles.

5.2 Évolution et description des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

Depuis les trente dernières années, une panoplie de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité a vu le jour (e.g. : Albinet et Margat, 1970; Keith *et al.*, 1981; LeGrand, 1983; Aller *et al.*, 1987; Foster, 1987; Berg et Abert, 1994; Robins *et al.*, 1994). Plusieurs approches pour la classification de ces méthodes d'évaluation sont possibles. Par exemple, on peut les classer selon qu'elles visent l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque ou

spécifique, selon l'échelle à laquelle elles sont utilisées, selon la nature de la source de contamination ou selon les procédures utilisées pour arriver aux résultats (Aubre, 1992; Fréchette, 1987). Dans cet essai, nous utiliserons la classification proposée par Vrba et Zaporozec (1994) qui est basée sur le type de procédure utilisée pour arriver aux résultats. Leur compilation selon cette classification leur a permis d'identifier l'existence de trois catégories de techniques pour l'évaluation de la vulnérabilité : les méthodes pionnières où l'on utilise les méthodes cartographiques pour l'identification des grandes unités hydrogéologiques caractérisant une région et la vulnérabilité qui s'y rattache, les méthodes basées sur des systèmes à cotation numérique qui peuvent ou non comporter une composante cartographique, et finalement les méthodes analytiques et de modélisation numérique. Ces trois catégories, énumérées dans cette séquence, représentent la progression des efforts dans le temps vers le développement de techniques de plus en plus spécialisées pour la détermination de la vulnérabilité. La description de ces méthodes dans les prochains paragraphes sera donc accompagnée d'une brève note historique mettant en contexte leur développement. Quelques exemples d'application seront donnés pour illustrer le fonctionnement de chacune de ces catégories de méthodes. L'emphase sera mise sur les méthodes développées pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque et qui sont conçues pour les études à échelle régionale.

5.2.1 Méthodes faisant appel aux techniques cartographiques

La notion de vulnérabilité des aquifères à la contamination n'est pas une nouveauté, mais, ce n'est qu'à partir de la fin des années soixante que le problème fut abordé de façon systématique et que des cartes exprimant la notion de vulnérabilité des eaux souterraines furent produites (Vrba et Zaporozec, 1994). Ces premiers développements eurent lieu surtout en Europe et, plus spécifiquement, c'est à la France que l'on doit l'instigation du concept de la vulnérabilité au rang d'instrument (Albinet et Margat, 1970). À ce moment, le choix du type de procédures à utiliser pour l'évaluation de la vulnérabilité s'est porté sur les méthodes cartographiques. Le but de l'entreprise était de donner un aperçu visuel de la variabilité spatiale de la protection naturelle des aquifères sur de très grands territoires et cet objectif

pouvait être le mieux atteint à l'aide des techniques cartographiques qui permettaient de faire ressortir les divers contextes hydrogéologiques. Aussi, le fait que les données de base telles que la topographie et la géologie étaient déjà disponibles sous forme cartographique et que la plupart des autres propriétés hydrogéologiques choisies à ce moment pour l'évaluation de la vulnérabilité s'apprêtaient bien à la représentation cartographique ont naturellement mené au choix des méthodes cartographiques comme outil de travail (Vrba et Zaporozec, 1994).

Le concept d'unités hydrogéologiques est basé sur le fait que certaines régions possèdent des caractéristiques physiques similaires et par conséquent démontrent des conditions de vulnérabilité qui sont fort semblables face à l'introduction de contaminants (Aller *et al.*, 1987). Les cartes de base telles que la topographie, l'hydrographie et la géologie sont généralement utilisées pour l'identification des contextes hydrogéologiques (Vrba et Zaporozec, 1994). Celles-ci sont superposées sur une carte unique sur laquelle on regroupe ensuite les zones homogènes à l'aide de ligne de contours. La vulnérabilité des eaux souterraines à l'intérieur de chacun de ces contextes hydrogéologiques est ensuite évaluée en les comparant à des critères reconnus comme représentant des conditions de vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994). Les critères de comparaison utilisés peuvent varier d'une étude à l'autre, tout dépendant du concepteur de la carte. En général, les paramètres suivants sont considérés : les types de sols, matériel de la zone vadose et aquifère, la profondeur de la nappe et la topographie (Vrba et Zaporozec, 1994). Les paramètres qui sont sélectionnés pour ce faire sont ensuite divisés en différents intervalles représentant bien les degrés de vulnérabilité engendrés. Les intervalles de valeurs ou de classes, tout comme les paramètres, peuvent aussi varier d'une étude à l'autre, tout dépendant du jugement professionnel du concepteur de la carte (Vrba et Zaporozec, 1994).

La compilation des cartes de vulnérabilité est obtenue en superposant les cartes de chacun des paramètres considérés. Le but final visé est de regrouper toutes ces informations sur une seule carte sur laquelle on pourra distinguer, dans un premier temps, les zones homogènes représentant des contextes hydrogéologiques distincts et, dans un deuxième temps, identifier

les différentes zones de vulnérabilité qui s'y rattachent (Vrba et Zaporozec, 1994). La vulnérabilité est généralement exprimée en termes qualitatifs. Pour évaluer la vulnérabilité spécifique, on tiendra compte des utilisations du sol ainsi que des activités humaines. Celles-ci seront le plus souvent représentées sur de transparents qui peuvent être superposés aux cartes de la vulnérabilité intrinsèque.

Ces méthodes sont spécialement appropriées pour la cartographie de grands territoires à l'intérieur desquels on retrouve différents contextes hydrogéologiques (Vrba et Zaporozec, 1994). Étant donné qu'elles peuvent être utilisées dans n'importe quel milieu physiographique, ces méthodes sont souvent désignées sous le terme d'«universel».

Avec le temps, plusieurs pays européens emboîtèrent le pas en utilisant plus ou moins le même genre d'approche. Aujourd'hui, les pays tels que le Danemark et l'Allemagne possèdent des cartes de vulnérabilité à petite échelle (1:1 000 000) couvrant la totalité de leur territoire et construites au moyen des méthodes cartographiques (Andersen et Gosk, 1989; Robins *et al*, 1994; Vrba et Zaporozec, 1994). Ces cartes donnent essentiellement un aperçu général des grandes tendances de la vulnérabilité, et, pour avoir une idée de la variation de la vulnérabilité à plus grande échelle, il faudra se diriger vers les autres catégories de méthodes d'évaluation.

5.2.2 Méthodes utilisant un système de cotation numérique

Du côté Nord-Américain, l'attrait pour le développement de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines n'a réellement commencé que vers les années quatre-vingt (Vrba et Zaporozec, 1994). Un des objectifs visés était l'amélioration des méthodes cartographiques traditionnelles par des techniques plus systématiques et rigoureuses faisant appel à l'attribution de valeurs numériques aux paramètres influençant la vulnérabilité. L'utilisation de ces systèmes à cotation numérique a permis non seulement de raffiner l'évaluation de la vulnérabilité mais aussi de prendre en compte un plus grand nombre de paramètres à la fois. Ainsi, un utilisateur nécessitant un outil très précis pour

l'évaluation la vulnérabilité des eaux souterraines à un type de contaminant spécifique dans un contexte donné aura la possibilité de sélectionner une méthode qui exploite un grand nombre de paramètres. Citons en exemple la méthode EPIC qui évalue la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides à l'aide de 56 paramètres (Groupe de recherche en environnement «Eco-Recherche», Université Laval, communication personnelle). L'introduction de ces nouvelles méthodes répondait à un besoin précis : celui de se munir d'outils à caractère local pouvant résoudre des problématiques bien spécifiques. Par exemple, la problématique concernant la localisation des sites d'enfouissement de déchets a généré, à elle seule, un nombre important de méthodes (Aller *et al.*, 1987; LeGrand, 1983; Michigan Department of Natural Resources, 1983). Il est évident que ces méthodes, pour être opérantes, doivent être utilisées dans les conditions hydrogéologiques et selon les modalités prescrites par les concepteurs (Aller *et al.*, 1987; Sellar et Canter, 1980). Sans nier l'utilité de ces méthodes, on se rendit compte qu'elles présentaient un certain désavantage quant à leur applicabilité à des besoins et territoires différents : pour chaque nouveau projet de caractérisation de la vulnérabilité, on devait soit adapter une méthode d'évaluation pour refléter le contexte hydrogéologique examiné ou carrément en créer une autre. De plus, certaines de ces méthodes d'évaluation très spécifiques sont souvent dépourvues de moyens cartographiques (Fréchette, 1987). La raison étant principalement attribuable à l'échelle de travail utilisée et à la difficulté de compiler un grand nombre de paramètres sur une même carte (Vrba et Zaporozec, 1994). L'intérêt donc pour une méthode rigoureuse, polyvalente et d'intérêt régional était clair. Sentant ce besoin, l'EPA (Agence de Protection Environnementale des États-Unis) commanda à la Water Well Association la production d'une méthode d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité qui serait applicable dans toutes les conditions hydrogéologiques rencontrées aux États-Unis (Vrba et Zaporozec, 1994). De cet exercice est né la méthode DRASTIC dont l'acronyme représente les sept paramètres employés pour l'évaluation de la vulnérabilité (Aller *et al.*, 1987). La caractérisation de la vulnérabilité avec la méthode DRASTIC fut perfectionnée par rapport aux autres méthodes à cotation numérique par l'introduction d'une valeur de pondération venant préciser l'importance des sept paramètres face à la vulnérabilité des aquifères (Aller

et al., 1987). De plus, cette méthode est assortie d'une composante cartographique permettant de visualiser à l'échelle régionale les diverses unités hydrogéologiques et le degré de vulnérabilité qui y est associé. Cette méthode fut testée dans 10 différents comtés représentant bien la diversité des contextes hydrogéologiques, les différents types d'utilisation du territoire (régions urbanisées et rurales) et la disponibilité des données hydrogéologiques aux États-Unis (Aller *et al.*, 1987). Cette méthode, en plus de présenter le potentiel de pouvoir être applicable dans tous les domaines hydrogéologiques rencontrés aux États-Unis, permettait une caractérisation plus ample de la vulnérabilité intrinsèque tout en gardant un degré satisfaisant de précision. Ainsi, DRASTIC venait combler le vide qui existait entre les méthodes traditionnelles offrant un aperçu des grandes tendances nationales de la vulnérabilité et les techniques pointues se concentrant au cas par cas (Aller *et al.*, 1987). Depuis l'introduction de DRASTIC, d'autres méthodes semblables ont vu le jour. Mentionnons la méthode SINTACS qui constitue une adaptation de DRASTIC au contexte hydrogéologique Italien (Napolitano et Fabri, 1996).

Les procédures suivies pour l'élaboration d'une méthode d'évaluation à l'aide de systèmes à cotation numérique sont similaires à celles des méthodes cartographiques. On doit procéder à la sélection de paramètres considérés pertinents pour l'évaluation de la vulnérabilité. À ces paramètres on attribue ensuite une échelle comprenant des intervalles représentatifs de la vulnérabilité. Les échelles peuvent être traduites par des variations de valeurs numériques d'un paramètre (e.g. valeurs de la conductivité hydraulique) ou à son classement en catégories (e.g. lithologie des formations géologiques). L'innovation vient du fait qu'une valeur numérique, généralement désignée sous le nom de «cote», est ensuite assignée pour chacun de ces intervalles, cette valeur reflétant le mieux possible le degré de vulnérabilité engendrée. De plus, certaines de ces méthodes intègrent une cote de pondération permettant de préciser l'importance relative de chacun des paramètres face à la vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994). Les indices finaux de vulnérabilité peuvent être obtenus en multipliant ou additionnant ensemble chacune des cotes, ou en utilisant un système matriciel. Trois exemples de méthodes utilisant un système de cotation numérique sont présentés ci-bas.

L'emphase est portée sur la description de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque.

5.2.2.1 Formation d'un système matriciel

L'utilisation de systèmes matriciels requiert en général le choix d'un nombre limité de paramètres qui refléteront le plus fidèlement possible les contextes hydrogéologiques considérés (Vrba et Zaporozec, 1994). Les combinaisons possibles entre les différents paramètres à l'intérieur de la matrice mèneront à différents indices de vulnérabilité. Chaque cellule de la matrice correspond donc à une valeur qualitative de vulnérabilité.

C'est par exemple ce genre de système que l'Angleterre a utilisé pour évaluer la vulnérabilité à la contamination par les nitrates d'un des plus importants systèmes aquifères situés au centre du pays (Robins *et al.*, 1994). La méthode d'évaluation est basée sur la classification de quatre catégories de sols en fonction de leur potentiel de lessivage des contaminants, en combinaison avec trois différents types d'aquifères qui tient compte de la présence ou l'absence d'une couche protectrice. La matrice produite est présentée au tableau 5.3. Les résultats de l'évaluation ont été publiés sur une série de sept cartes à l'échelle de 1:100 000.

Tableau 5.3: Système matriciel utilisé en Angleterre pour la classification des eaux souterraines en fonction de leur vulnérabilité. La vulnérabilité est obtenue en combinant le type d'aquifère et la classe de sol rencontrés. La gamme de vulnérabilité possible va de faible à extrême, (tiré de Vrba et Zaporozec, 1994).

Classification des aquifères	Différentes classes de sols			
	1	2	3	4
1	Extrême	Élevé	Modéré	Faible
2	Élevé	Modéré	Faible	Faible
3	Faible	Faible	Faible	Faible

5.2.2.2 Addition ou multiplication des valeurs (cotes)

La méthode GOD est un exemple d'une méthode utilisant la multiplication de cotes pour obtenir une valeur numérique de la vulnérabilité (Foster, 1987). Dans cette méthode d'évaluation, trois paramètres sont utilisés, soit le type et le matériel de l'aquifère, ainsi que la profondeur de la nappe. Les différentes classes et leurs cotes respectives sont décrites dans les tableaux 5.4, 5.5 et 5.6.

Tableau 5.4: Classification de six types d'aquifères avec leurs cotes correspondantes. La vulnérabilité augmente avec la cote: la cote minimale est zéro et correspond à l'absence d'aquifère, la cote maximale est de 1 et est donnée pour un aquifère non-confiné (tiré de Aubre, 1992).

Type d'aquifère	Cote
aucun aquifère	0
aquifère confiné et artésien	0,1
aquifère confiné	0,2
aquifère semi-confiné	0,3
aquifère avec ouverture de surface	0,4 - 0,6
aquifère non-confiné	0,7 - 1

Tableau 5.5: Classification de sept types de matériaux aquifères. La classification reflète les gammes possibles de conditions de terrains rencontrés en Angleterre. Les cotes de vulnérabilité varient de 0,4 à 1 (tiré de Aubre, 1992).

Matériau de l'aquifère	Cote
sol résiduel	0,4
limon alluvial; loess; shale; calcaire fin	0,5
sable éolien; siltite; tuf; roche ignée et métamorphique fracturée	0,6
sable et gravier; grès; tuf	0,7
gravier (colluvion)	0,8
calcaire	0,9
calcaire fracturé ou karstique	1

Tableau 5.6: Classification de la profondeur à la nappe à l'intérieur de sept classes (tiré de Aubre, 1992).

Prof (m)	0 - 2	2 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 50	50 - 100	> 100
Cote	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4

La valeur de la vulnérabilité est obtenue en faisant la multiplication de chacune des cotes obtenues.

$$I = \prod_{i=1}^3 \text{Cote } i, \quad I_{\min} = 0 \quad \text{et} \quad I_{\max} = 1$$

Les valeurs de vulnérabilité peuvent varier de 0 à 1 et un système de classement est prévu pour relier l'index à un qualificatif significatif de vulnérabilité (tableau 5.7).

Tableau 5.7: Classification des indices de vulnérabilité en différentes catégories de vulnérabilité (tiré de Aubre, 1992).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
aucune vulnérabilité	0
vulnérabilité négligeable	0 - 0,1
faible vulnérabilité	0,1 - 0,3
vulnérabilité modérée	0,3 - 0,5
vulnérabilité élevée	0,5 - 0,7
vulnérabilité extrême	0,7 - 1

Ces deux exemples de méthodes d'évaluation sont parmi les plus simples que l'on retrouve à l'intérieur des méthodes à cotation numérique (Aubre, 1992). Elles font intervenir un nombre plutôt restreint de paramètres dont l'évaluation semble assez aisée et les résultats sont généralement représentés à des échelles régionales.

5.2.2.3 Multiplication des cotes obtenues pour chaque paramètre à une valeur de pondération: l'exemple DRASTIC

La méthode DRASTIC fut l'une des premières méthodes à intégrer le concept de pondération dans son système d'évaluation (Vrba et Zaporozec, 1994). Avant de décrire plus avant la façon dont se fait l'intégration de ces cotes pondérées, nous allons en premier lieu présenter le fonctionnement général de la méthode DRASTIC.

La méthode DRASTIC est composée de deux parties distinctes : la première partie comprend l'identification des unités hydrogéologiques présentes dans la région d'étude et la seconde comporte l'évaluation de sept paramètres hydrogéologiques à l'aide d'un système de cotation

numérique. C'est ce système à cotation numérique qui permet de déterminer la vulnérabilité relative observée pour chacune des unités hydrogéologiques.

L'identification des unités hydrogéologiques permet de faire ressortir les principaux facteurs d'une région influençant l'écoulement de l'eau souterraine et par le fait même permet d'apprécier de façon préliminaire la capacité du milieu à atténuer et retarder la contamination. Par exemple, une unité hydrogéologique constituée d'un dépôt d'argile reposant sur un aquifère de sable et gravier procure une plus grande protection à l'eau souterraine située dans l'aquifère qu'une unité hydrogéologique dont les formations aquifères sont dépourvues de telles couches protectrices.

La détermination des conditions de vulnérabilité à l'intérieur de chacune de ces unités hydrogéologiques se fait en considérant l'influence de sept paramètres hydrogéologiques sur la vulnérabilité des eaux souterraines. Ces sept paramètres sont les suivants : la profondeur de la nappe (Depth to water), la recharge nette (net Recharge), le type de matériau composant l'aquifère (Aquifer media), le type de sol (Soil characteristics), la pente du terrain (Topography), le type de matériau de la zone non saturée ou vadose (Impact of the vadose zone) et finalement, la conductivité hydraulique de l'aquifère (hydraulic Conductivity) (Aller *et al.*, 1987). L'impact de la plupart de ces paramètres sur la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination a été décrit à la section 5.1.3, néanmoins un résumé de l'effet de chacun d'eux sur le devenir des contaminants est présenté aux pages 127 à 132.

Chacun des sept paramètres a été divisé en intervalles de valeurs ou de classes reflétant le mieux possible l'éventail naturel de valeurs ou de classe de ces paramètres rencontrés à travers les nombreux contextes hydrogéologiques des États-Unis. Les cotes pour ces intervalles varient entre 1 et 10. Une cote de 1 signifie un faible impact sur la vulnérabilité alors qu'une cote de 10 traduit des conditions extrêmes de vulnérabilité. Donc, la vulnérabilité occasionnée par un paramètre observé sur le terrain est établie en consultant la cote qui lui revient en fonction des intervalles déjà établis. Les intervalles de valeurs ou de

classes ainsi que leurs cotes correspondantes sont présentés aux tableaux 5.8 à 5.14. La cote de chacun des paramètres est affectée d'une valeur de pondération, comprise entre 1 et 5, qui permet de faire ressortir l'importance de chacun des paramètres dans les processus d'atténuation des contaminants. Ainsi, un paramètre considéré crucial dans les processus de contamination se verra accorder une pondération de 5 alors qu'un paramètre jugé relativement moins important aura une cote de 1. DRASTIC offre le choix entre deux différents systèmes de pondération tout dépendant de l'application pour laquelle on a choisi d'utiliser DRASTIC. La pondération régulière est utilisée pour modéliser l'impact de contaminants autres que les pesticides. Alors que la pondération «pesticides» a spécifiquement été développée dans le but de mieux refléter les processus de propagation des pesticides en milieu agricole. Cette pondération est donc utilisée lorsque le but de l'étude est d'évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides. Le choix des valeurs de pondération pour chaque paramètre a été réalisé à l'aide d'un consensus de type Delphi et ne peut être changé (Aller *et al.*, 1987).

Les pondérations sont donc multipliées aux cotes déterminées pour chacun des paramètres. La compilation de l'indice final de la vulnérabilité pour chaque unité hydrogéologique se fera en additionnant les cotes pondérées pour chacun des sept paramètres:

$$I = \sum_{i=1}^7 P_i C_i$$

Plus l'indice est élevé et plus le potentiel de contamination est grand. La gamme possible de valeurs de vulnérabilité se retrouve entre 23 et 226 pour la pondération standard, et entre 26 et 256 pour la pondération «pesticides». Il est important de mentionner que DRASTIC fut conçu afin de produire des valeurs numériques relatives pouvant être comparées à d'autres valeurs DRASTIC obtenues dans différents contextes hydrogéologiques. En ce sens, la valeur numérique d'un indice DRASTIC prise seule n'a pas de signification à moins qu'elle soit comparée à d'autres valeurs d'indices DRASTIC obtenues dans d'autres régions.

Ainsi, chaque unité hydrogéologique dans la zone étudiée sera marquée d'un ou plusieurs indices de vulnérabilité (Aller *et al.*, 1987). C'est ainsi que les unités hydrogéologiques initialement identifiées peuvent être divisées en sous-unités. Ceci reflète le fait qu'à l'intérieur d'une même unité hydrogéologique, même si les conditions sont considérées uniformes, certains paramètres peuvent tout de même varier.

5.2.2.3.1 Hypothèses de départ

Lors du développement de la méthode DRASTIC, les auteurs ont dû poser certaines hypothèses afin de simplifier la complexité de l'évaluation. Ainsi, ils ont assumé que la source de contamination potentielle est localisée à la surface du sol, que les contaminants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère par la recharge et que le contaminant possède les mêmes caractéristiques que l'eau.

Avant d'utiliser la méthode DRASTIC pour l'évaluation de la vulnérabilité d'un territoire il est primordial de reconnaître ces hypothèses de départ afin que la méthode réponde réellement aux buts visés de l'évaluation. La reconnaissance de ces hypothèses permettra aussi une meilleure utilisation des cartes de vulnérabilité produites avec la méthode DRASTIC.

D'autres aspects concernant l'application de la méthode DRASTIC doivent aussi être cités. Entre autres, mentionnons qu'elle a été développée pour évaluer le potentiel de pollution pour des unités qui ont une superficie égale ou supérieure à 100 acres (600 m X 600 m). De plus, la méthode ne permet pas d'évaluer la vulnérabilité de deux aquifères qui sont superposés. Deux cartes différentes devront être effectuées pour représenter leur vulnérabilité respective. Par contre, il peut s'avérer nécessaire et pratique de déterminer quel aquifère est le plus pertinent à être évalué. Par exemple, dans le cas d'un aquifère de sables et graviers reposant directement sur un aquifère de calcaire, on pourra se limiter à l'évaluation de la vulnérabilité de l'un des deux seulement. Le choix de l'aquifère sur lequel on devra procéder à l'évaluation peut être déterminé de différente manière. Par exemple, on peut se baser sur l'utilisation de la ressource. Ainsi on choisira d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère de

sables et graviers si celui-ci correspond à l'aquifère qui est le plus intensivement exploité. Dans le cas où l'information sur l'exploitation est manquante, on pourra se baser sur des données reflétant le potentiel aquifère, telles que les valeurs de l'épaisseur saturée et de la conductivité hydraulique. Par exemple, dans le cas où l'aquifère de sables et graviers serait d'étendue limitée et posséderait de faibles épaisseurs saturées on pourra choisir le calcaire comme formation aquifère principale sur laquelle procéder à l'évaluation de la vulnérabilité.

Bien que la méthode DRASTIC ait principalement été développée pour évaluer la vulnérabilité des aquifères qui sont en condition de nappe libre, les concepteurs de la méthode DRASTIC ont toutefois jugé approprié d'adapter la méthodologie pour aussi tenir compte de la présence d'aquifères confinés. Pour ce faire, la modification de l'interprétation de quelques-uns des paramètres a été nécessaire. Par exemple, la profondeur à la nappe dans le cas d'un aquifère confiné est définie comme étant la profondeur jusqu'au toit de l'aquifère. En ce qui concerne l'évaluation de l'impact de la zone vadose, l'utilisateur devra assigner la cote 1 qui correspond à la classe «unité confinante». Cette cote minimale reflète le fait qu'une couche imperméable offre une bonne protection aux aquifères sous-jacents.

5.2.2.3.2 Paramètres DRASTIC

Profondeur à la nappe

Selon les concepteurs de la méthode DRASTIC, la probabilité pour que les processus d'atténuation prennent place augmente au fur et à mesure que la profondeur de la nappe augmente. De grandes profondeurs à la nappe impliquent des temps de transport plus long du contaminant, ce qui favorise l'action des processus chimiques, physiques et biologiques menant à l'atténuation des contaminants.

Tableau 5.8: Profondeur à la nappe (tiré de Aller *et al.*, 1987).

		Pondération	
		Standard: 5	Pesticide: 5
<u>Intervalles des valeurs</u> Profondeur (m)		Cotes correspondantes	
0 - 1,5		10	
1,5 - 4,5		9	
4,5 - 9		7	
9 - 15		5	
15 - 23		3	
23 - 31		2	
> 31		1	

La recharge

La recharge constitue le principal véhicule pour le transport des contaminants. Plus la recharge est élevée et plus le risque de contamination est grand. Les classes déterminées pour la recharge sont assez larges. Ceci reflète le fait que les valeurs de la recharge sont généralement difficiles à obtenir et moins précises que les autres paramètres.

Tableau 5.9: Recharge nette (tiré de Aller *et al.*, 1987).

		Pondération	
		Standard: 4	pesticide: 4
<u>Intervalles des valeurs</u> Recharge (cm/a)		Cotes correspondantes	
0 - 5		1	
5 - 10		3	
10-18		6	
18 - 25		8	
>25		9	

Milieu aquifère

Le potentiel d'atténuation des contaminants est fonction de la texture des sédiments ou de la structure des roches. Ainsi, des sédiments fins tels que des silts ou argiles auront pour effet de réduire les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine et favoriseront donc l'action des processus d'atténuation. Des eaux souterraines contaminées traversant des formations rocheuses fracturées ne pourront être aussi bien neutralisées en raison des vitesses d'écoulement plus élevées.

Tableau 5.10: Matériau de l'aquifère (tiré de Aller *et al.*, 1987).

Intervalles des classes: Matériau de l'aquifère	Cotes	Pondération	
		Standard: 3	Pesticide: 3
		Cotes moyennes données	
Shale massif	1-3	2	
roche métamorphique ou ignée non altérée	2-5	3	
roche métamorphique ou ignée altérée ou fracturée	3-5	4	
till	4-6	5	
séquence de grès, calcaire et shale	5-9	6	
grès ou calcaire massif	4-9	6	
sable et gravier	4-9	8	
basalte	2-10	9	
calcaire karstique	9-10	10	

Type de sol

Les sols qui contiennent un plus grand pourcentage d'argile, de silt et de matière organique sont plus aptes à ralentir et atténuer la propagation de la contamination. En effet, la présence d'argile et de silt contribue à retenir l'eau et favorise donc l'action des processus d'atténuation. La matière organique pour sa part favorise la dégradation ainsi que l'adsorption du contaminant. Les sols grossiers et minces offrent peu de protection face à l'introduction des contaminants dans les aquifères.

Tableau 5.11: Matériau du sol (tiré de Aller *et al.*, 1987).

	Pondération	
	Standard: 2	Pesticide: 5
Intervalles des classes: Matériau du sol	Cotes correspondantes	
mince ou absent; gravier	10	
sable	9	
matériel organique (tourbe)	8	
argile fissurée ou agglomérée	7	
loam sableux	6	
loam	5	
loam limoneux	4	
loam argileux	3	
matériel organique (terre noire)	2	
argile intacte	1	

Pente du terrain

On tient compte de la pente du terrain dans l'évaluation de la vulnérabilité étant donnée qu'elle influence le ruissellement, et donc la recharge des aquifères. Les régions qui sont caractérisées par des pentes de terrain importantes sont sujettes au ruissellement de l'eau. Elles sont par conséquent mieux protégées de l'infiltration des contaminants. En contraste, les régions planes sont les lieux où l'infiltration verticale est maximale. Elles constituent des zones plus vulnérables à la contamination.

Tableau 5.12: Pente du terrain (tiré de Aller *et al.*, 1987).

	Pondération				
	Standard: 1			Pesticide: 3	
Pente du terrain (%)	0-2	3-6	7-12	13-18	>18
Cotes correspondantes	10	9	5	3	1

Zone vadose

La zone vadose réfère à la partie non saturée située au-dessus de la nappe phréatique et en dessous de la zone racinaire. Les textures et structures des couches géologiques composant la zone vadose sont les facteurs dont on doit tenir compte dans l'évaluation du potentiel d'atténuation. Les textures et structures qui favorisent une propagation rapide des contaminants sont jugées non favorables à l'atténuation des contaminants. Ce principe est le même que celui invoqué pour le paramètre du milieu aquifère.

Tableau 5.13: Matériau de la zone non-saturée (tiré de Aller *et al.*, 1987).

Matériau de la zone non-saturée	Cotes	Pondération	
		Standard: 5	Pesticide: 4
		Cotes moyennes données	
aquifère confiné	1	1	
silt/argile	2-6	3	
shale	2-5	3	
calcaire	2-7	6	
grès ou séquence de grès, calcaire et shale	4-8	6	
sable et gravier avec une bonne proportion de limon et d'argile	4-8	6	
roche métamorphique ou ignée	2-8	4	
sable et gravier	6-9	8	
basalte	2-10	9	
calcaire karstique	8-10	10	

Conductivité Hydraulique

La conductivité hydraulique fait référence à la capacité du matériel aquifère à transmettre l'eau. Plus grande est la conductivité hydraulique et plus rapide sera la propagation des contaminants ainsi que moins intense seront les processus d'atténuation.

Tableau 5.14: Conductivité hydraulique de l'aquifère (tiré de Aller *et al.*, 1987).

	Pondération	
	Standard: 3	Pesticide: 2
K (m/j)	Cotes correspondantes	
<4	1	
4-12	2	
12-29	4	
29-41	6	
41-81	8	
>81	10	

5.2.2.3.4 Représentation de la vulnérabilité

Les concepteurs de la méthode DRASTIC ont établi huit classes d'indices pour la représentation des résultats de l'évaluation de la vulnérabilité (tableau 5.15) (Aller *et al.*, 1987). Les couleurs chaudes comme le rouge, l'orange et le jaune représentent les régions où le potentiel d'occurrence de problèmes liés à la contamination est important, et les couleurs froides telles le bleu, l'indigo et le violet dénotent des conditions où la vulnérabilité à la contamination est moindre.

Tableau 5.15: Indices de vulnérabilité associés à une charte de couleur exprimant le degré de vulnérabilité (tiré de Aller *et al.*, 1987).

Indices DRASTIC	Couleur
<79	Violet
80-99	Indigo
100-119	Bleu
120-139	Vert foncé
140-159	Vert pâle
160-179	Jaune
180-199	Orange
>200	Rouge

5.2.3 Méthodes analytiques et de modélisation numérique

Les dernières méthodes récemment utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité font partie du domaine de la modélisation numérique. Leur popularité au niveau des utilisations à buts préventifs est toutefois limitée dû au fait qu'elles font souvent intervenir un grand nombre de données et de paramètres dont l'évaluation peut s'avérer difficile (Vrba et Zaporozec, 1994). Aussi, ces méthodes nécessitent le traitement de données à l'aide de logiciels informatiques spécifiques dont le mode de fonctionnement n'est pas toujours clair pour des utilisateurs non initiés à ce genre d'outil. En outre, ces méthodes sont plus souvent utilisées dans les phases avancées de la caractérisation de la contamination étant donné qu'à cette étape plusieurs données ont été compilées et qu'on est à même d'avoir une connaissance plus approfondie des processus régissant la propagation des contaminants dans le milieu aquifère (Vrba et Zaporozec, 1994).

Les modèles mathématiques ont pour objectif principal la simulation de l'écoulement des eaux souterraines à l'aide d'équations représentant les divers processus physiques actifs au sein du système aquifère (Anderson et Woessner, 1992). La résolution de ces équations peut être effectuée analytiquement ou numériquement. En général, on se sert des méthodes analytiques lorsque le contexte hydrogéologique observé peut être décrit de manière relativement simple ou que la simplification de celui-ci n'entraîne pas trop d'aberrations dans les résultats (Anderson et Woessner, 1992).

Un certain nombre de tentatives a été effectué dans le but de développer des équations mathématiques pouvant rendre compte de la vulnérabilité des aquifères à la contamination et pouvant être résolu analytiquement. La vulnérabilité des eaux souterraines étant intimement liée au régime d'écoulement des eaux souterraines, les équations développées comportent nécessairement des éléments similaires aux équations hydrodynamiques standards. Par exemple, une des équations développées pour l'évaluation de la vulnérabilité fut dérivée de la loi de Darcy (Vrba et Zaporozec, 1994) :

$$I_v = \frac{[K(QI/SI)]}{MS} \quad (5.1)$$

Où : I_v représente l'index de vulnérabilité,

K: conductivité hydraulique de la zone non-saturée

QI: taux d'infiltration par unité de surface

SI: épaisseur de la zone non-saturée

MS: humidité du sol

Lorsque le système aquifère présente un trop grand nombre d'hétérogénéités et que la simplification de celui-ci s'avère impossible, les méthodes analytiques ne pourront plus rendre compte adéquatement du système. C'est à ce moment que l'utilisation de la modélisation numérique deviendra nécessaire (Anderson et Woessner, 1992).

Les modèles numériques sont formés de plusieurs éléments de bases, soient : les zones limites (géographiques) du système aquifère, les conditions initiales, une discrétisation du site, la détermination des valeurs des paramètres pertinents au site, la détermination des contraintes hydrogéologiques et une ou plusieurs équations représentant le système étudié (Anderson et Woessner, 1992). C'est à partir de l'analyse de ceux-ci que l'on pourra commencer à élaborer le modèle conceptuel qui supportera la suite des développements logiques menant à la création d'un modèle numérique. Une série d'étapes, telles que la calibration du modèle et la validation des hypothèses de départ, doit être inévitablement réalisée avant d'arriver à la conception finale du modèle.

Comme on peut le constater, la conception d'un modèle implique une connaissance hydrogéologique approfondie du site pour que les hypothèses de base de départ, les équations et les paramètres choisis reflètent adéquatement la réalité. Ceci implique, dans la plupart des cas, l'investissement considérable de temps et de ressources (humaines, informatiques et monétaires), ce qui, comme nous allons le voir plus loin, n'est pas toujours réalisable ou nécessairement approprié pour la détermination de la vulnérabilité.

5.2.4 Limitations des méthodes d'évaluation

5.2.4.1 Méthodes faisant appel aux techniques cartographiques

Les principales limitations des méthodes cartographiques sont reliées à leur faible résolution de la vulnérabilité à grande échelle (e.g. 1:20 000) ainsi qu'à la part importante que joue la subjectivité dans le processus d'évaluation de la vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994). Cette dernière limitation a pour conséquence que des territoires semblables peuvent être évalués différemment tout dépendant de l'interprétation respectivement posée par chacun des évaluateurs sur l'impact qu'on les divers paramètres hydrogéologiques sur la vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994). Pour ces raisons, il peut s'avérer hasardeux de comparer des cartes de vulnérabilité qui ont été produites par différents auteurs dont la méthodologie est différente (Vrba et Zaporozec, 1994). Ceci consiste en un désavantage non négligeable pour les planificateurs chargés de comparer les potentiels d'utilisation de diverses régions.

5.2.4.2 Méthodes utilisant un système de cotation numériques

Ces méthodes, bien qu'elles représentent une sophistication des méthodes cartographiques, possèdent aussi leur lot de contraintes et limitations. En voulant tenir compte de plusieurs paramètres à la fois, certaines de ces méthodes s'embourbent de chiffres dont l'index de vulnérabilité final, obtenu par opérations mathématiques, peut avoir perdu toute signification (Andersen et Gosk, 1994; Rosen, 1994, Vrba et Zaporozec, 1994; Fréchette, 1987). Par exemple, l'importance d'une cote élevée d'un paramètre qui est crucial pour l'évaluation de la vulnérabilité d'un aquifère peut être masquée lors de l'addition avec les autres paramètres qui ont une incidence relative moindre sur la vulnérabilité et ayant obtenus des valeurs faibles de vulnérabilité. Comme mentionné plus avant, cette limitation fut l'un des principaux moteurs pour la création de systèmes à cotes pondérées qui permirent de tenir compte de l'importance relative présentée par chaque paramètre dans la détermination de la vulnérabilité. Cependant, une des conséquences de l'introduction de cette approche est que les valeurs de vulnérabilité générées se retrouvent statistiquement à l'intérieur des valeurs moyennes de vulnérabilité possibles, les valeurs extrêmes étant rarement atteintes (Rosen, 1994; Fréchette, 1987; Aubre, 1992). Ce phénomène,

communément appelé «effet uniformisant de la pondération», peut contribuer à masquer les véritables contrastes de vulnérabilité existant sur le terrain.

La quantité de paramètres utilisés peut aussi amener certains problèmes. Ainsi, plus le nombre de paramètres considérés est élevé et plus les possibilités de contradictions et de chevauchements entre ceux-ci seront grandes (Andersen et Gosk, 1989; Vam Stempvoort, 1992; Isabel et al., 1990; Aubre 1992; Vrba et Zaporozec, 1994).

D'autres contraintes concernent le choix de paramètres pour la détermination de la vulnérabilité. Ce choix, comme pour les méthodes cartographiques, est subjectif et repose grandement sur l'expertise et la compréhension des concepts hydrogéologiques que possèdent les concepteurs ainsi que sur la connaissance du milieu physiographique dans lequel la méthode sera utilisée (Napolitano et Fabri, 1996). Un paramètre considéré important face à la vulnérabilité d'un aquifère dans un contexte donné peut, dans un tout autre contexte, ne jouer qu'un rôle mineur ou même être totalement inapproprié. Étant donné la panoplie des milieux physiographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques rencontrés sur les divers continents, il devient extrêmement ardu de développer une méthode unique d'évaluation de la vulnérabilité pouvant être appliquée dans tous ces contextes. La plupart du temps, il s'avérera nécessaire d'apporter certaines modifications à une méthode pour mieux refléter les conditions hydrogéologiques du milieu étudié.

Notons aussi que l'attribution de valeurs numériques pour chaque paramètre ainsi que la représentation de la vulnérabilité sous forme d'indices numériques cachent à l'utilisateur les informations qualitatives de base qui ont été utilisées pour l'évaluation (Aubre, 1992). L'utilisation de cotes numériques aide certainement à l'évaluation et la compilation des différentes zones de vulnérabilité mais il ne faudrait pas perdre de vue les particularités de chaque site qui ont mené à la détermination des différents indices de vulnérabilité.

5.2.4.3 Méthodes analytiques et de modélisation numérique

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité utilisant les solutions analytiques d'équations mathématiques n'ont bénéficié que d'un intérêt mitigé (Vrba et Zaporozec, 1994). Ceci est probablement dû au fait qu'elles font intervenir des équations mathématiques qui, dans plusieurs cas, simplifient les processus réels observés sur le terrain (Anderson et Woessner, 1992). De plus, l'application des méthodes analytiques à des échelles régionales ou nationales est souvent impraticable, ce qui rend ces méthodes moins populaires pour beaucoup de gestionnaires dont les préoccupations sont la gestion globale de la ressource.

Plusieurs critiques ont été faites à l'endroit des modèles numériques, les plus importantes concernent leur complexité d'utilisation (Vrba et Zaporozec, 1994; Anderson et Woessner, 1992). De plus, l'utilisation de modèles numériques nécessite, en général, une bonne connaissance des paramètres influençant l'écoulement des eaux ainsi que l'acquisition et la manipulation d'une grande quantité de données (Vrba et Zaporozec, 1994). Aussi, pour pouvoir utiliser ces données, il est essentiel qu'elles soient fiables, nombreuses et bien dispersées sur le territoire étudié. Pour ces raisons, l'utilisation de ce type de méthode peut devenir ardue, coûteuse et impliquer la consommation appréciable de temps.

Voici en résumé les principaux facteurs responsables de l'utilisation limitée de la modélisation numérique comme outil d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines (Vrba et Zaporozec, 1994) :

- elle nécessite l'utilisation de logiciels qui sont peu accessibles qui requièrent de bonnes connaissances informatiques.
- la difficulté d'obtenir des données ou les coûts importants encourus pour l'acquisition de celles-ci.
- l'application du modèle est souvent restreinte à quelques hectares de terrains, la résolution étant perdue à grande échelle.
- on se sert généralement de ces méthodes soit pour évaluer l'étendue de la

contamination enregistrée à un site ou encore pour préparer la campagne de restauration de celui-ci. Il est plutôt rare qu'elles soient utilisées comme outil de prévention.

- fréquente inaptitude à représenter fidèlement la réalité (Anderson et Woessner, 1992).

5.2.5 Critères pour la sélection de méthodes d'évaluation

Avant de choisir une méthode d'évaluation de la vulnérabilité, il est nécessaire que l'évaluateur possède une bonne connaissance du contexte hydrogéologique dans lequel se trouve le site ou le territoire étudié. De cette façon il sera à même de mieux évaluer l'applicabilité des diverses méthodes à son territoire d'étude. De plus, la caractérisation de la vulnérabilité nécessite que l'on compile de nombreuses données hydrogéologiques ainsi que l'on procède à un inventaire des sites et sources potentielles de contamination (Vrba et Zaporozec, 1994). La recherche et l'acquisition de telles données peuvent s'avérer laborieuses et de plus, l'expertise interne pour se faire n'est pas forcément disponible. Par conséquent, avant de se lancer dans une telle entreprise, il est essentiel de bien définir les buts de l'évaluation de la vulnérabilité ; veut-on d'un instrument préliminaire permettant de caractériser la vulnérabilité à l'échelle régionale ou d'une méthode de caractérisation plus pointue qui sera utilisée dans le but de résoudre des problématiques locales. De plus, parallèlement à l'identification de ces buts, on devra aussi considérer les facteurs limitatifs d'ordres administratif et technique. Par exemple, du côté administratif, on peut se demander quels sont les effectifs humains et monétaires disponibles et que l'on est prêt à investir pour l'évaluation de la vulnérabilité. On peut aussi s'enquérir si l'expertise pour effectuer cette tâche est présente à même l'institution, la municipalité ou la communauté qui désire entreprendre les travaux d'évaluation (US EPA, 1993). L'accessibilité à des supports informatiques devra aussi être considérée étant donné que certaines méthodes d'évaluation nécessitent l'utilisation de logiciels spécifiques pouvant supporter certain traitement de données. Du point de vue technique, on pourra tenir compte de la grandeur du territoire à cartographier, de l'applicabilité de la méthode au contexte hydrogéologique étudié et de la

disponibilité des données (US EPA, 1993). C'est seulement à partir de ces nombreuses considérations qu'il sera possible de déterminer la meilleure méthode à employer pour atteindre les buts premièrement fixés (Vrba et Zaporozec, 1994). Ces étapes sont cruciales car elles serviront à : 1) déterminer la distribution, le nombre et la qualité des données nécessaires et disponibles pour atteindre les buts fixés ; et 2) déterminer une échelle adéquate pour la cartographie (Vrba et Zaporozec, 1994).

Une corrélation peut être établie entre la densité de données (DD), la quantité d'informations fiables en chaque point (QIF) et l'échelle à laquelle une carte peut-être construite (E) (Vrba et Zaporozec, 1994). En mettant ces trois facteurs en relation à l'intérieur d'un diagramme triangulaire on peut déterminer quelle méthode d'évaluation sera la mieux appropriée pour le projet de caractérisation visé (figure 5.1). Par exemple on peut voir que dans le cas où les informations disponibles sont peu nombreuses et peu fiables, il est approprié de choisir une méthode d'évaluation utilisant les techniques cartographiques avec une échelle de cartographie relativement petite (1:500 000). En revanche, lorsque le choix d'une méthode d'évaluation a déjà été effectué, ce diagramme permettra d'avoir un aperçu de la quantité et de la fiabilité des données nécessaires, ainsi que de l'échelle la plus appropriée de cartographie. À titre d'exemple, les méthodes utilisant la modélisation numérique devront nécessairement avoir une densité de données élevée et devront produire une cartographie de la vulnérabilité à une échelle assez grande. Cette figure représente bien les liens étroits existant entre le choix d'une méthode et le type de données ainsi que l'échelle de la carte appropriée.

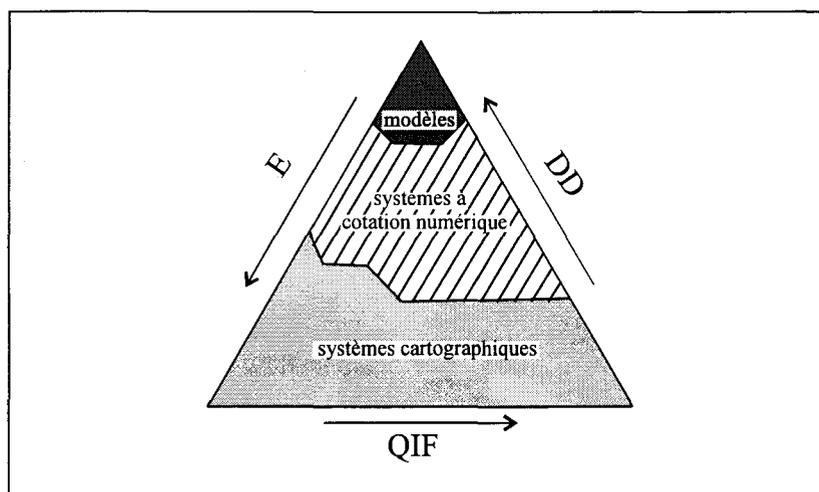


Figure 5.1: Interrelation entre l'échelle de la carte (E), la densité de données (DD), et la quantité d'informations fiables pour chaque point (QIF) dans la sélection d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité (Tiré de Vrba et Zaporozec, 1994).

5.2.6 Principales limitations des cartes de vulnérabilité

Les limitations des cartes de vulnérabilité sont essentiellement posées par les besoins pour lesquelles elles ont été créées et par leur contenu qui contrôle l'échelle à laquelle elles sont compilées (Vrba et Zaporozec, 1994). Ceci est en accord avec ce qui a été dit précédemment au sujet de l'interrelation entre les buts visés de l'évaluation et le choix de données (quantité, qualité) ainsi que l'échelle appropriée pour les représentées. Ainsi, il serait erroné d'utiliser une carte produite à l'aide d'un nombre restreint de données ayant pour but l'illustration des grandes tendances de la vulnérabilité pour l'affectation d'activités spécifiques à des territoires locaux. C'est ainsi que les utilisateurs de cartes de vulnérabilité devront être avertis des utilisations pour lesquelles ces cartes ont été construites afin d'éviter leur éventuel usage abusif (Vrba et Zaporozec, 1994).

Il est important de mentionner que les cartes de vulnérabilité sont une généralisation du milieu qu'elles représentent. Les complexités hydrogéologiques rencontrées dans certains secteurs ne peuvent être adéquatement représentées par ces cartes, surtout si elles ont été compilées à de petites échelles. C'est justement cet effort de généralisation qui est demandé pour la compilation de ces cartes. Celles-ci permettent d'obtenir une image globale de la protection naturelle des aquifères à partir de laquelle pourront être initiés des plans de

protection et gestion de la ressource. L'utilisateur des cartes de vulnérabilité doit donc en tout temps garder à l'esprit le fait que ces cartes offrent une représentation généralisée du milieu.

Une autre catégorie de limitations concerne la disparité des approches utilisées pour l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité ainsi que les différents symboles utilisés pour la représentation cartographique de la vulnérabilité (Andersen et Gosk, 1989; Vrba et Zaporozec, 1994). Cet état de fait entraîne une grande difficulté, et quelque fois l'impossibilité, de procéder à la comparaison de différentes cartes de vulnérabilité étant donné que la plupart d'entre elles ont été créées à partir de méthodes d'évaluation et de cartographie incompatibles. En ce sens, il est suggéré d'utiliser des cartes dérivées de méthodes d'évaluation similaires ou compatibles et ce à des échelles standardisées. De plus, tout dépendant de la méthode choisie et des données disponibles lors de l'évaluation de la vulnérabilité, il faut être conscient du fait que le jugement professionnel du concepteur a pu jouer un rôle important lors de l'évaluation et il est donc important de connaître les hypothèses de départ qui ont été utilisées pour la compilation de ces cartes.

5.2.7 Contenu des cartes

Ces considérations sur les limitations des cartes de vulnérabilité nous amènent au sujet concernant le contenu de ces cartes. Pour qu'elles soient utilisées à bon escient, il est primordial que les cartes de vulnérabilité contiennent une légende exclusivement dédiée à la description des utilisations pour lesquelles elles ont été construites (Vrba et Zaporozec, 1994). Aussi, à cette légende pourraient être greffé un bref compte rendu de la méthode d'évaluation employée ainsi qu'une référence aux types de données exploitées. Un résumé de la géologie rencontrée ainsi que des principaux contextes hydrogéologiques constituent d'autres informations pertinentes à inclure dans cette légende descriptive. Ces aspects sont très importants car un nombre très restreint de données (densité, qualité) est généralement montré sur ces cartes et les utilisateurs ont donc un moyen bien limité de déterminer le degré de fiabilité de la carte sauf par les notices mises sur les cartes.

Outre cette légende faisant figure d'avertissement, d'autres types de légendes telles que celles décrivant les classes de vulnérabilité ainsi que les divers symboles utilisés devront être ajoutés à la carte.

Il est à noter que les cartes de vulnérabilité ne sont pas construites pour des fins de recherche mais bien pour des fins pratiques. Elles doivent donc être aussi claires que possible en minimisant la quantité de données illustrées. Le bon dosage des données présentées est important étant donné qu'une surcharge peut mener à une mauvaise interprétation de la part d'utilisateur non-spécialiste et même à une non-utilisation des cartes qui paraissent trop complexes.

5.2.8 Utilisation des cartes de vulnérabilité

En autant que leurs utilisations ne dépassent pas les champs d'intérêts pour lesquelles elles ont été créées, l'utilité des cartes de vulnérabilité des eaux souterraines semble indéniable (Golder Associates Ltd., 1995; US EPA, 1993, Robins *et al.*, 1994; Vrba et Zaporozec, 1994). Elles permettent la détermination et la représentation des zones de vulnérabilités des eaux souterraines, devenant ainsi des outils de gestion multidisciplinaires essentiels pour divers intervenants oeuvrant au niveau de la gestion du territoire. Les gammes d'activités auxquelles les cartes de vulnérabilité contribuent sont variées ; les champs d'intérêts vont de la caractérisation de la vulnérabilité à petite échelle (>1:250 000) dans le but de développer des stratégies de gestion, à la détermination de problématiques spécifiques à des territoires plus petits (<1:20 000) dont on observe ou s'attend à observer des problèmes de contamination (Vrba et Zaporozec, 1994).

Voici plus en détail l'énumération de quelques autres applications potentielles (Vrba et Zaporozec, 1994; Hiscock *et al.*, 1995; Aller *et al.*, 1987; US EPA, 1993; Fréchette, 1987);

Planification

- La principale utilité des cartes de vulnérabilité est de fournir un outil préliminaire

pour la gestion et la protection des eaux souterraines. En ce sens, elles s'adressent principalement aux gestionnaires du territoire. Elles les assistent dans les processus décisionnels menant à la gestion conséquente de la ressource ainsi que dans la gestion des activités humaines qui posent un impact potentiel de contamination.

- Les cartes de vulnérabilité permettent aussi de prioriser les efforts à entreprendre pour la gestion des eaux souterraines. Ceci permet d'investir de façon optimale les fonds monétaires et humains disponibles dans la résolution de problèmes identifiés à l'aide de ces cartes.

- Les cartes de vulnérabilité aident à la prise de décision dans des cas d'urgence tels que, par exemple, les déversements accidentels de produits pétroliers le long de corridors routiers.

Évaluation du potentiel de contamination

- Les cartes de vulnérabilité sont aussi des outils de dépistage pour trouver des contaminations réelles. Elles peuvent donc servir de guide pour l'implantation de systèmes de surveillance des eaux souterraines dans les régions identifiées plus sensibles à la contamination sur les cartes de vulnérabilité.

Éducation

- Les cartes de vulnérabilité peuvent aussi être utilisées pour familiariser le grand public et les gestionnaires au fait que les aquifères sont une ressource importante d'eau potable occupant parfois de vastes étendues de territoires et que les activités ayant lieu sur ceux-ci peuvent avoir un impact sur la qualité de l'eau souterraine et la quantité disponible. Le principal problème de la reconnaissance des aquifères en tant que ressource relève du fait qu'ils sont invisibles à la population. En effet, les tords causés à l'air, à l'eau de surface ou à la végétation peuvent tous être perçus, alors que la contamination des eaux souterraines peut avoir lieu à quelques centimètres sous le sol sans que cela puisse être détecté.

- Finalement, la popularisation des cartes de vulnérabilité au niveau local et régional contribue à promouvoir des attitudes de préventions de la contamination plutôt que de restauration.

Certes les cartes de la vulnérabilité des eaux souterraines comportent leur part de contraintes et d'imperfections. C'est pour ces raisons que leur utilisation doit être faite avec le plus grand soin pour éviter les prises de décisions erronées dont les conséquences pourraient s'avérer critiques aux niveaux économique, politique et social.

Depuis quelques années il semble que le champ d'étude relié au développement de méthodes de cartographie et d'évaluation des eaux souterraines est en plein essor (Vrba et Zaporozec, 1994). Il faut donc s'attendre à voir apparaître de plus en plus de nouvelles méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines. Par contre, il est opportun de croire que celles-ci seront basées sur des considérations d'applicabilité (à plusieurs contextes hydrogéologiques) et de compatibilité (avec d'autres méthodes populaires courantes).

L'innovation et le raffinement considérable des diverses méthodes créées depuis une vingtaine d'années permettent de croire que la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination continuera d'être un des outils essentiels pour la gestion efficace des eaux souterraines.

5.2.9 Compte rendu sur l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec

Le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec a entrepris, depuis le milieu des années quatre-vingt, de cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines des principales régions habitées du Québec (Isabel *et al.*, 1990). Les premières cartes de vulnérabilité ont été produites à des échelles régionales (~1:100 000) et à l'aide de méthodes cartographiques qui faisaient intervenir un petit nombre de paramètres. Par la suite, un

changement s'opéra pour l'utilisation de méthodes d'évaluation plus systématiques : c'est à ce moment que l'on opta pour la méthode DRASTIC (Isabel *et al.*, 1990). En 1990, huit MRC (municipalité régionale de comtés) avaient déjà été cartographiées à l'aide de cette méthode (McCormack, communication personnelle). Par contre, de ce nombre, seulement une MRC fut, à proprement parlé, cartographiée utilisant intégralement la méthode DRASTIC (Champagne et Chapuis, 1993). Les cartes antérieures appliquaient la méthode DRASTIC d'une manière plutôt large. Par exemple, aucune classification des régions en terme d'unités hydrogéologiques n'était effectuée.

Diverses raisons peuvent motiver la sélection d'une méthode d'évaluation par rapport à une autre. Par exemple, il peut s'agir de l'applicabilité de la méthode au territoire étudié, de l'applicabilité de celle-ci à la problématique visée (e.g., investigation préliminaire vs étude spécifique) ou de la disponibilité des données requises pour l'évaluation de la vulnérabilité. Pour les besoins du Québec en terme d'outil de gestion et de planification de la ressource en eau souterraine il semble que DRASTIC ait été considérée comme l'une des méthodes les plus performantes (Fréchette, 1987; Aubre, 1992).

Une étude effectuée par Fréchette (1987), ayant pour but la détermination d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pesticides qui serait applicable au Québec, mena à la sélection de DRASTIC comme méthode présentant le plus de potentiel. Dans cette étude, treize méthodes empiriques furent comparées sur la base des critères suivants : le niveau d'application des méthodes (méthode pouvant être appliquée dans divers contextes hydrogéologiques pour divers modes de pollution), paramètres mesurables utilisés (idéalement un grand nombre de paramètres diversifiés), niveaux d'intégration (qualité du traitement effectué sur les données recueillies, ainsi que sur la gamme des utilisations rendues possibles) et les impacts spécifiques (si la méthode considère d'autres facteurs pouvant venir modifier le diagnostic de vulnérabilité) (Fréchette, 1987). Les méthodes utilisant les cotations numériques obtinrent les meilleurs résultats et la méthode DRASTIC se classa au premier rang. De plus, dans le but de vérifier la capacité de DRASTIC à bien

différencier les régions vulnérables de celles qui ne le sont pas, Fréchette (1987) appliqua la méthode à deux sites au Québec dont on observait déjà une contamination et à un autre dont le contexte hydrogéologique permettait de prédire des valeurs de vulnérabilité faibles. Dans les trois cas les indices de vulnérabilité obtenus à l'aide de DRASTIC vinrent confirmer ce qui était observé sur le terrain (Fréchette, 1987).

Une autre validation de l'applicabilité de DRASTIC au Québec provient du rapport effectué par Champagne (1990). Lors de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la MRC de Montcalm avec la méthode DRASTIC il ressortit que les deux cas connus de contamination se retrouvaient à l'intérieur des zones de vulnérabilité qui avaient obtenu un indice DRASTIC de 184, un des indices les plus élevés dans la MRC.

Une étude (Aubre, 1992), visant le développement d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité applicable au Québec, classa aussi la méthode DRASTIC au premier rang. Cette étude compara 46 méthodes d'évaluation de la vulnérabilité (13 méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque et 33 méthodes d'évaluation de la vulnérabilité spécifique). Même si DRASTIC constituait la méthode la plus intéressante en vue d'une application au Québec, Aubre (1992) observa qu'elle ne répondait tout de même pas aux exigences requises par les objectifs de l'étude. Les objectifs du projet étaient le développement ou l'identification d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines adaptée aux conditions climatiques et hydrogéologiques ainsi qu'aux informations hydrogéologiques généralement disponibles au Québec.

Aussi, cette méthode devait:

- être simple d'application et facile d'utilisation par du personnel non spécialisé en hydrogéologie.
- utiliser des informations hydrogéologiques habituellement disponibles et accessibles.

- pouvoir s'utiliser même si les informations nécessaires ne sont pas toutes disponibles.
- pouvoir quantifier numériquement la vulnérabilité des eaux souterraines d'un site.
- être discriminante et identifier clairement les sites les plus vulnérables.
- pouvoir s'utiliser autant pour les sites ponctuels que pour de grandes superficies.
- permettre l'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines à partir de la vulnérabilité.

Les principales réserves que souleva Aubre (1992) au sujet de l'applicabilité de DRASTIC au contexte québécois sont les suivantes :

1) Certaines valeurs des cotes attribuées aux paramètres ne reflètent pas adéquatement les conditions hydrogéologiques et climatiques rencontrées au Québec. Par exemple, au paramètre de la recharge est accordée une cote de 9 lorsque celle-ci dépasse les 250 mm/a. Aubre (1992) mentionne que la recharge moyenne au Québec est d'environ 300 mm/a et par conséquent la cote qui est attribuée à ce paramètre sera presque toujours équivalente aux cotes maximales 9 et 10. Il faut se souvenir que les valeurs de vulnérabilité prises séparément n'ont aucune signification (Aller *et al.*, 1987). Celles-ci doivent être mises en contexte avec les autres valeurs trouvées pour les régions avoisinantes et c'est ainsi que l'on peut déterminer qu'une zone est plus vulnérable qu'une autre. En ce sens, l'attribution d'une même valeur d'un paramètre pour toute unité hydrogéologique contribuera à uniformiser les indices de vulnérabilité et il deviendra inutile pour la différenciation des diverses zones de vulnérabilité. La recharge n'est pas l'unique paramètre dont l'échelle des valeurs n'est peut être pas appropriée au contexte québécois. Les échelles de valeurs pour la profondeur à la nappe ainsi que la topographie ont aussi été citées (Aubre, 1992).

2) Le trop grand nombre de paramètres (7) entraîne a) des chevauchements et redondances ; b) des indices de vulnérabilité moins variables ; et c) des difficultés à obtenir toutes les

informations hydrogéologiques pour les sept paramètres (Aubre, 1992).

a) Chevauchements et redondances :

Comme l'ont indiqué les auteurs de la méthode DRASTIC, il existe un certain nombre de chevauchements entre les paramètres (Aller *et al.*, 1987). Cette limitation n'est pas exclusive au Québec et a été citée par de nombreux auteurs qui ont utilisé ou évalué DRASTIC (Rosen, 1994). Dans ce contexte, certains auteurs ont fait remarquer que des résultats équivalents pourraient être obtenus simplement en réduisant le nombre de paramètres considérés dans DRASTIC (Merchant, 1994). En plus de présenter des résultats similaires ceux-ci auraient l'avantage de pouvoir être obtenu à des coûts beaucoup moindres tout en ayant une précision égale sinon supérieure aux résultats précédemment obtenus (Merchant, 1994). La supériorité de la précision des résultats est attribuée au fait que le modèle intègre un nombre moindre d'impondérable. En contraste, une étude portant sur l'application de DRASTIC au territoire suédois indique que le fait d'intégrer un nombre important de paramètres a un effet positif sur l'exactitude des résultats (Rosen, 1994). En effet, la variabilité dans les résultats obtenus par différents évaluateurs tend à diminuer à cause de l'utilisation d'un grand nombre de paramètres. À cause de la corrélation entre ces paramètres, la probabilité qu'un mauvais jugement au sujet d'un paramètre affecte l'indice final de vulnérabilité est très faible. Ainsi, dans le cas où un utilisateur doit évaluer un paramètre à l'aide d'un nombre restreint de données qui sont peu fiables, une inexactitude dans l'évaluation de ce paramètre est à prévoir. Par contre, cette erreur sur l'évaluation du paramètre peut être compensée lors de l'évaluation d'un autre paramètre dit «redondant». De plus, une étude portant sur la sensibilité des paramètres DRASTIC indique que chacun des sept paramètres jouent un rôle important et que l'élimination de l'un d'entre eux mène à des indices de vulnérabilité différents (Napolitano et Fabri, 1996).

b) Indices de vulnérabilité moins variables :

D'un point de vue statistique, les indices de vulnérabilité calculés en pondérant un grand nombre de paramètres auront presque inévitablement toujours tendance à être moins variables (Aubre, 1992; Rosen, 1994).

c) Difficulté à obtenir toutes les informations hydrogéologiques pour les sept paramètres :

Il appert que beaucoup d'informations hydrogéologiques requises par DRASTIC sont difficiles à trouver ou peuvent même être inexistantes, et ce spécialement dans les régions peu habitées du Québec (Aubre, 1992). En règle générale, lorsqu'il n'est pas possible d'obtenir les valeurs d'un paramètre on doit essayer de les estimer. Par contre, pour compenser les erreurs d'interprétation possibles, cette estimation devra se faire à la hausse, i.e. on attribuera des cotes plus élevées pour les paramètres dont on a pu obtenir les informations factuelles (Aubre, 1992). L'attribution de valeurs maximales, en guise de code de sécurité, pour ces paramètres manquants aura tendance à produire des valeurs d'indices plus élevées. Ceci pourrait conduire à considérer les régions éloignées comme plus vulnérables que les régions habitées. Dans un contexte où l'on veut mettre l'emphase sur l'établissement d'ordres de priorités de gestion, cette situation pourrait s'avérer nuisible.

À ces limitations peuvent être ajoutées celles plus générales concernant les méthodes utilisant un système de cotations numériques discutées à la section 5.2.2. L'identification des diverses limitations propres à la méthode DRASTIC est importante car elle permet, dans un premier temps, de mieux comprendre et analyser les indices de vulnérabilité qui sont produits. Aussi, ayant identifié les facteurs limitants, il devient plus facile de modifier la méthode pour l'adapter au besoin du Québec. Ainsi, par exemple, il serait possible de modifier les intervalles de certains paramètres ainsi que leur cote respective. De plus, les pondérations pourraient être ajustées pour tenir compte de l'importance relative de chaque paramètre évalué dans un contexte québécois.

Malgré ces diverses contraintes, il est permis de croire que la méthode DRASTIC reste un outil valide pour la détermination de la vulnérabilité des aquifères à des échelles régionales.

Trois raisons motivent cette affirmation :

1) Validations antérieures de DRASTIC au contexte québécois

Malgré les contraintes présentées plus avant, la méthode DRASTIC, lorsque testée dans des conditions réelles de terrain, semble bien performer (Fréchette, 1987; Champagne, 1990). Donc d'une façon générale et lorsque mise à l'épreuve dans un contexte hydrogéologique courant au Québec on peut dire que DRASTIC est en mesure de bien décrire la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination (Champagne et Chapuis, 1993; Fréchette, 1987; Champagne, 1990).

2) La détermination et la définition d'unités hydrogéologiques

Une partie importante de la méthode DRASTIC consiste en la détermination et la définition des unités et sous-unités hydrogéologiques rencontrées dans la région étudiée. Cette étape comprend la consultation de documents variés tels les cartes du quaternaire, des sols et du socle rocheux ainsi que des différentes banques de données contenant des informations hydrogéologiques. L'utilisation de ces nombreux documents permet d'avoir une meilleure idée des conditions hydrogéologiques caractérisant une région. Ainsi, avant même d'avoir atteint son objectif qui est l'évaluation de la vulnérabilité, l'utilisation de la méthode DRASTIC permet la création de produits hydrogéologiques de base qui sont utilisables en tout temps. D'ailleurs, une étude ayant pour objectif l'identification d'une démarche à suivre pour la cartographie des eaux souterraines en Colombie-Britannique propose l'utilisation de DRASTIC comme méthode de caractérisation préliminaire des ressources en eaux souterraines (Piteau et Turner, 1993).

3) L'utilisation répandue de la méthode en Amérique du nord rend DRASTIC plus attrayante

Une des recommandations proposée par Vrba et Zaporozec (1994) concernant la construction de cartes de vulnérabilité porte sur l'utilisation de méthodes d'évaluation standardisées. L'utilisation de telles méthodes standardisées faciliterait la lecture des cartes de vulnérabilité ainsi que leur comparaison entre elles, qu'il s'agisse de cartes provenant du même secteur ou de régions totalement éloignées. La méthode DRASTIC, dont la création, rappelons-le, est issue du besoin de se munir d'une méthode standardisée pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines aux États-Unis, offre un grand potentiel en ce sens. La méthode fut aussi popularisée en Europe. À titre d'exemple c'est en modifiant DRASTIC que le gouvernement italien produisit une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité plus adaptée au contexte physiographique et hydrogéologique italien (Vrba et Zaporozec, 1994).

Les quelques validations de DRASTIC effectuées sur le territoire québécois en tant que méthode potentielle pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination suggèrent qu'elle représente une méthode d'évaluation jusqu'ici efficace. De plus, l'identification des unités hydrogéologiques constitue un outil important, et ce indépendamment du système de cotation employé. La notoriété et l'utilisation fréquente de DRASTIC en Amérique du Nord la rendent plus versatile : possibilité d'effectuer la comparaison de différentes régions cartographiées à l'aide de DRASTIC, popularité auprès des différents gestionnaires et administrateurs chargés d'utiliser les cartes de vulnérabilité.

5.3 Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraine à la contamination dans la MRC de Portneuf : traitement des données et résultats

Cette section explique les étapes suivies pour la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la MRC avec la méthode DRASTIC. Plus précisément, on décrit les sources des données qui ont été utilisées pour l'identification des unités hydrogéologiques ainsi que pour l'évaluation de chacun des paramètres DRASTIC. On explique aussi les divers traitements des données qui ont dû être effectués pour l'évaluation de chacun des sept paramètres. Les résultats obtenus sont finalement présentés.

5.3.1 Unités hydrogéologiques

Le principal outil utilisé pour la délimitation des unités hydrogéologiques est la carte du Quaternaire complétée récemment par la Commission géologique du Canada (Cloutier *et al.*, 1997). Cette carte a été un atout essentiel pour l'accomplissement de cette tâche étant donné le niveau très détaillé de la cartographie. Un document préliminaire interne rédigé par un des chercheurs de la Commission géologique du Canada (Doiron, 1996) concernant les secteurs hydrogéologiques de la MRC a aussi été consulté. Ce document a servi d'outil préliminaire étant donné qu'il était basé sur une version avancée mais non finale de la carte du Quaternaire. De façon complémentaire à ces documents, on a utilisé les descriptions de forages contenues dans la base de données. Ces données ont permis de classer certains secteurs de la MRC qui démontraient, par la distribution et la nature des unités Quaternaires en surface, une plus grande complexité. Dans ces cas, la carte seule du Quaternaire ne permettait pas de catégoriser ces régions.

La délimitation des unités hydrogéologiques s'est faite initialement de façon manuelle à partir de la carte du Quaternaire. Les contours des unités quaternaires ont été respectés partout où c'était possible. C'est-à-dire que les limites des unités hydrogéologiques correspondent dans la grande majorité des cas aux pourtours des unités quaternaires. Les limites peuvent correspondre soit à une unité quaternaire unique ou bien à un regroupement de plusieurs d'entre elles. En effet, sur les cartes du Quaternaire, certaines unités sont

spécifiquement séparées afin de faire ressortir les aspects génétiques des différents dépôts. Cependant, lorsqu'on aborde les dépôts quaternaires d'un point de vue hydrogéologique, certaines de ces divisions deviennent inutiles. Par exemple, les secteurs où l'on retrouve de petites unités de sables littoraux à l'intérieur de grandes zones de tills peuvent être regroupés ensemble pour former une seule et même unité hydrogéologique. À partir de l'ensemble des unités hydrogéologiques compilées manuellement on a pu effectuer des procédures de requêtes et d'agglomérations de polygones sur le fichier numérique de la carte du Quaternaire contenue sur MapInfo.

Au total, 18 unités hydrogéologiques ont été identifiées. Celles-ci sont présentées à l'Annexe I. Sur la carte, les unités sont identifiées à l'aide d'un code alpha-numérique. Le premier chiffre permet d'identifier la région physiographique à l'intérieur de laquelle se trouve l'unité hydrogéologique. Le chiffre 1 correspond au secteur des Basses-Terres alors que le chiffre 2 fait référence à la région des Laurentides. Les lettres qui suivent le chiffre identifient l'unité hydrogéologique comme telle.

À l'intérieur du guide de la méthode DRASTIC on retrouve une série d'unités hydrogéologiques qu'utilise le concepteur de la carte pour identifier le ou les contextes hydrogéologiques présents dans la région d'étude. Bien que certaines des unités qui sont décrites dans le guide DRASTIC partagent des similarités avec plusieurs des contextes géologiques québécois, dans l'ensemble, elles ne sont pas tout à fait représentatives des séquences qui sont typiquement rencontrées ici. Dans le cadre de ses travaux, Champagne (1990) a modifié certaines de ces unités ou il en a créé de nouvelles afin de mieux représenter le contexte québécois. L'identification des unités hydrogéologiques présentes dans le MRC de Portneuf a donc été faite à partir de la nouvelle série d'unités hydrogéologiques développée par Champagne (1990). La plupart des unités hydrogéologiques qu'il a développées sont présentes dans la MRC de Portneuf. Par contre, la présence d'un certain nombre de dépôts différents dans la MRC de Portneuf a nécessité que l'on développe aussi des nouvelles unités hydrogéologiques. Il est à noter que certaines des descriptions élaborées par

Champagne ont dû aussi, à l'occasion, être quelque peu modifiées afin de représenter le mieux possible les contextes hydrogéologiques observés dans la MRC de Portneuf.

L'Annexe J présente les blocs diagrammes et les descriptions correspondant à chacune des unités hydrogéologiques. Ces blocs aident à définir les successions des matériaux qui se trouvent dans ces unités. Ils facilitent la compréhension des diverses unités hydrogéologiques.

5.3.2 Paramètres DRASTIC

Une grande quantité d'informations peut être nécessaire afin de bien évaluer les sept paramètres DRASTIC. Cependant, si ces informations ne sont pas disponibles, la méthode DRASTIC a prévu des cotes types à donner à chacun des paramètres à l'intérieur de chacune des différentes unités hydrogéologiques. Ainsi, l'évaluation de la vulnérabilité peut se faire de façon très générale en utilisant les cotes types en fonction des unités hydrogéologiques, de même qu'elle peut être faite de façon détaillée et approfondie lorsque les données sont disponibles.

Les données qui ont été compilées dans le cadre de ce projet ont permis de bien caractériser les paramètres suivants : les sols, la pente du terrain, le milieu aquifère et la zone vadose. Cependant, peu de données étaient disponibles pour les paramètres : profondeur à la nappe, recharge et conductivité hydraulique.

Les pages suivantes décrivent de façon détaillée quels ont été les données utilisées, les traitements effectués et les résultats obtenus pour chacun des paramètres.

5.3.2.1 Profondeur à la nappe

La principale raison expliquant la rareté des données de niveaux d'eau dans les aquifères granulaires de surface est que la majorité des puits compilés, c'est-à-dire ceux provenant du SIH du MEF, sont des puits au roc. Les niveaux statiques mesurés dans ces

puits sont rarement représentatifs du niveau réel de la surface libre dans les aquifères de surface et sont par conséquent inutilisables. De plus, les niveaux d'eau sont aussi fonction de la profondeur du puits. En effet, étant donné les faibles valeurs de la conductivité hydraulique dans les milieux fracturés, on constate généralement la présence de forts gradients verticaux. Ceux-ci contribuent à faire que plus les puits sont profonds, plus les niveaux d'eau dans les puits le sont aussi. Plusieurs des puits qui sont compilés ont été forés à des profondeurs significatives. Ainsi, même pour les aquifères en milieu fracturé, les données de niveaux d'eau peuvent ne pas bien représenter le niveau réel de la surface libre. Ces données ont donc aussi été rejetées pour l'évaluation de la profondeur à la nappe dans les aquifères au roc.

Les données sur les niveaux d'eau récoltées lors des travaux de terrain constituent donc la principale source d'information utilisée pour évaluer le paramètre profondeur à la nappe. L'ensemble de ces données de terrain a été complété par quelques données qui étaient disponibles dans la banque de données (données provenant de rapports hydrogéologiques, du MEF, d'Hydro-Québec ainsi que du ministère des Transports) et qui répondaient aux critères suivants : puits terminé dans le sable et dont la description stratigraphique n'indique pas la présence de zones imperméables. La compilation de la carte s'est faite en superposant toutes les données de niveaux d'eau sur la carte des unités hydrogéologiques et en délimitant le contour des zones en fonction des intervalles de valeurs définis par DRASTIC (cf.: *5.2.2.3.2 Paramètres DRASTIC*). Cette procédure a été effectuée directement sur MapInfo.

La carte des résultats est représentée à l'Annexe K. On peut voir que la majeure partie de la région est caractérisée par des valeurs de profondeur à la nappe qui varient de 0 à 4.5 m. Ces valeurs sont typiques des profondeurs à la nappe que l'on retrouve partout au Québec. Certains secteurs montrent par contre de plus grandes profondeurs à la nappe. Ces secteurs correspondent exactement aux régions où l'on retrouve les plus fortes épaisseurs de sables et graviers sur la carte d'épaisseur de sables, c'est-à-dire les secteurs de Sainte-Christine, de Saint-Raymond et de Pont-Rouge. En effet, une corrélation est généralement observée entre

épaisseur des formations et profondeur à la nappe. Plus les formations granulaires perméables sont épaisses et plus les profondeurs à la nappe dans ces formations sont importantes. Ainsi ce sont les secteurs à plus fort potentiel aquifère qui représentent les contextes les moins vulnérables à la contamination du point de vue du paramètre de la profondeur à la nappe.

5.3.2.2 Milieu aquifère

Les principaux documents qui ont été utilisés pour l'identification des aquifères dans la région d'étude sont la carte du Quaternaire et la carte du socle rocheux. Tous les secteurs où l'on retrouve les unités quaternaires suivantes ont été identifiés comme aquifère : sables littoraux, sables et graviers deltaïques, alluvions des terrasses et alluvions récentes, sables fluvioglaciaires, moraine de Saint-Narcisse. Bien que certaines de ces unités, telles les alluvions récentes, constituent en réalité de pauvres formations aquifères, l'approvisionnement domestique à partir de ces matériaux géologiques est possible et ces formations constituent donc une source d'eau potable qu'il importe de protéger et dont la vulnérabilité doit être évaluée. La carte du socle rocheux a été utilisée pour l'identification des aquifères dans tous les secteurs où l'on trouve des dépôts de tills. Dans ces cas, l'aquifère qui est évalué est celui qui est au roc, les tills étant considérés non productifs. Dans le sud de la région d'étude ces aquifères sont composés de schistes argileux et de calcaires, alors qu'au nord on retrouve les roches ignées et métamorphiques.

La cote standard de 8 suggérée par DRASTIC pour la catégorie de sables et graviers a été attribuée pour toutes les unités de sables et graviers (littoraux et deltaïques) à l'exception des formations glaciaires auxquelles on a donné une cote de 9. Les matériaux fluvioglaciaires comportent souvent une plus grande proportion de matériel grossier, ce qui les rend plus perméable. Les sables des hautes terrasses ont eu une cote plus faible, soit de 7, étant donné la présence plus marquée de particules fines. Les alluvions récentes qui ont une proportion plus élevée de matière organique ont eu une cote de 5. La moraine de Saint-Narcisse s'est vue attribuée une cote de 6 étant donné la présence de nombreuses séquences de matériaux

grossiers et bien triés. La cote a été attribuée en utilisant la cote supérieure suggérée par DRASTIC pour les tills. On a donné aux formations de schistes argileux la cote de 3 qui correspond aussi à la cote maximale suggérée par DRASTIC pour les shales massifs. Cette cote a été jugée adéquate étant donné que les schistes argileux dans la région d'étude ne sont pas massifs, mais bien schisteux. Les calcaires se sont vus accordés la cote standard de 6 et les roches ignées et métamorphiques la cote standard de 3. Le système karstique de Saint-Casimir a eu la cote de 10.

Le découpage des aquifères s'est effectué directement sur MapInfo à partir de la carte des unités hydrogéologiques. Étant donné que les unités hydrogéologiques ont été définies à partir de la carte du Quaternaire, tous les aquifères granulaires identifiés sur la carte du Quaternaire ont pu facilement être repérés. Les secteurs sud ont par contre dû être redécoupés en tenant compte des limites du socle rocheux identifiées sur la carte géologique. Le résultat final est montré à l'Annexe L et illustre le type et la distribution des principaux aquifères, avec leur degré de vulnérabilité évalué en fonction du paramètre milieu aquifère.

5.3.2.3 Sols

Le rapport pédologique pour le comté de Portneuf et les cartes de sols qui l'accompagnent ont été utilisés pour l'évaluation des sols. La série, seule ou en groupe, forme l'unité cartographique de base qui est représentée sur les cartes pédologiques. Les polygones que l'on retrouve sur les cartes peuvent donc être composés soit d'une seule série ou d'un regroupement de plusieurs d'entre elles. L'association de séries à l'intérieur d'une même unité cartographique devient essentielle afin d'éviter une trop grande complexité sur la carte. Ces assemblages réunissent ensemble des sols qui partagent des caractéristiques physiques et génétiques similaires.

Par exemple, dans le secteur de Sainte-Christine on retrouve une unité cartographique contenant l'assemblage des séries suivantes: Saint-Louis (Lu) + Deleny (De) + Morin (Mo). La série Saint-Louis est essentiellement un sol constitué de sable, la série Deleny est décrite

comme étant un loam sableux, et la série de Morin comme un sable. L'ordre dans lequel est décrit l'assemblage de sols est important étant donné qu'il représente la proportion relative de chacune des séries dans l'assemblage. Ainsi la série Saint-Louis occupe au moins 50% de l'unité cartographique, la série Deleny 30 % et la série Morin 20 %. Étant donné la possibilité de rencontrer plusieurs séries de sols différents à l'intérieur d'une même unité cartographique, une procédure a dû être développée afin de pouvoir coter ces unités en tenant compte des différentes caractéristiques de chacune des séries qui y sont présentes. La procédure qui a été utilisée en est une d'addition de cote pondérée. Chacune des séries de sols présentes à l'intérieur de chaque polygone a été cotée à partir des cotes DRASTIC préétablies (cf. section 5.3.2.3.2 *Paramètres DRASTIC*). Ces cotes ont ensuite été pondérées en fonction de l'importance de la série dans l'assemblage. Par exemple, dans le cas de l'unité cartographique citée plus haut, la série Saint-Louis s'est vu attribuée une cote de 9 (sable) qui a ensuite été multipliée par un facteur de 0.5, la série Deleny a obtenu une cote de 6 (loam sableux) et a été multipliée par un facteur de 0.3 et finalement la série Morin a eu une cote de 8 (sable) qui a ensuite été pondérée avec un facteur de 0.2. L'addition des cotes pondérées donne la cote finale suivante: $9(0.5) + 6(0.3) + 8(0.2) = 7.9$. Étant donné que les cotes DRASTIC sont des nombres entiers, les valeurs non entières obtenues ont dû être arrondies. La cote de 7.9 obtenue pour cette unité cartographique a donc été arrondie à 8, qui représente la cote finale pour l'assemblage. Cette procédure a été utilisée pour l'évaluation de toutes les unités cartographiques présentes sur les cartes de sols. Cette démarche a été facilitée en procédant à des routines de requêtes à l'intérieur des fichiers de sols contenus sous MapInfo.

Quelques problèmes de nature cartographique ont été rencontrés au cours de la délimitation des zones. En effet, il a été constaté que les limites de certains polygones de sols identifiés sur les cartes pédologiques ne correspondent pas nécessairement aux limites indiquées sur la carte du Quaternaire. Par exemple, certaines unités quaternaires identifiant la présence du socle rocheux étaient aussi présentes sur les cartes de sols mais leur superposition n'étaient pas toujours parfaite. Ce fait est attribuable à plusieurs facteurs, les plus importants étant la

technologie utilisée au moment de la compilation des cartes et l'échelle de la cartographie. Deux cartes effectuées à des échelles et avec des techniques de cartographie différentes ne peuvent pas avoir le même degré de précision et donc certaines incohérences sont à prévoir. La résolution des ces conflits s'est effectuée en modifiant certains contours de la carte des sols afin qu'ils correspondent aux contours retrouvés sur la carte du Quaternaire. La décision d'adapter la carte des sols à la carte du Quaternaire est basée sur le fait que cette dernière est plus récente et plus détaillée.

Le résultat final est représenté à l'Annexe M. On peut constater que les contextes les plus vulnérables lorsque l'on considère les sols, c'est à dire les unités qui ont obtenues les cotes de 10, se retrouvent principalement dans les secteurs des Laurentides. Ceci est dû au fait que les sols, dans ces régions, sont peu ou pas développés. Les terrains Farmington qui sont situés dans les secteurs de Grondines et de Saint-Marc-des-Carières sont décrits comme étant des sols constitués de till mince reposant sur du calcaire. Ces terrains ont aussi été considérés comme des sols minces sur roc et se sont vus attribués des cotes de 10. Les secteurs qui ont les cotes les plus faibles et qui reflètent donc des contextes moins vulnérables sont les sols qui se sont développés au-dessus des secteurs des bassins argileux de Portneuf et de Saint-Thuribe et Saint-Alban.

5.3.2.4 Recharge

La quantité d'eau qui s'infiltré à chaque année pour recharger les formations aquifères est probablement un des paramètres hydrogéologiques les plus difficiles à évaluer. En l'absence de données mesurées directement sur le terrain, la recharge doit être évaluée en utilisant des méthodes empiriques ou bien de modélisation numérique. En général, les méthodes de modélisation numérique nécessitent une grande quantité d'informations fiables alors que les méthodes empiriques requièrent généralement une quantité moindre de données. Dans ce cas-ci, la méthode qui a été choisie pour évaluer la recharge est issue d'une méthode empirique qui a été développée par le Service de Conservation des Sols (SCS) du ministère de l'Agriculture des États-Unis. Cette méthode a été développée dans le but d'évaluer les

quantités d'eau ruissellées pour chaque événement pluvieux. Cette méthode a été reprise et modifiée pour les conditions climatiques et physiques du Québec par Monfet (1979) du ministère des Ressources naturelles du Québec et c'est cette méthode modifiée qui a été utilisée pour évaluer les valeurs de la recharge dans la région d'étude (figure 5.2). De même que la méthode originelle, la méthode SCS modifiée permet d'évaluer le volume d'eau ruisselé suivant un événement pluvieux. Cependant, dans le cadre de cette étude, les données climatologiques mensuelles ont été utilisées afin de prédire les valeurs moyennes du ruissellement.

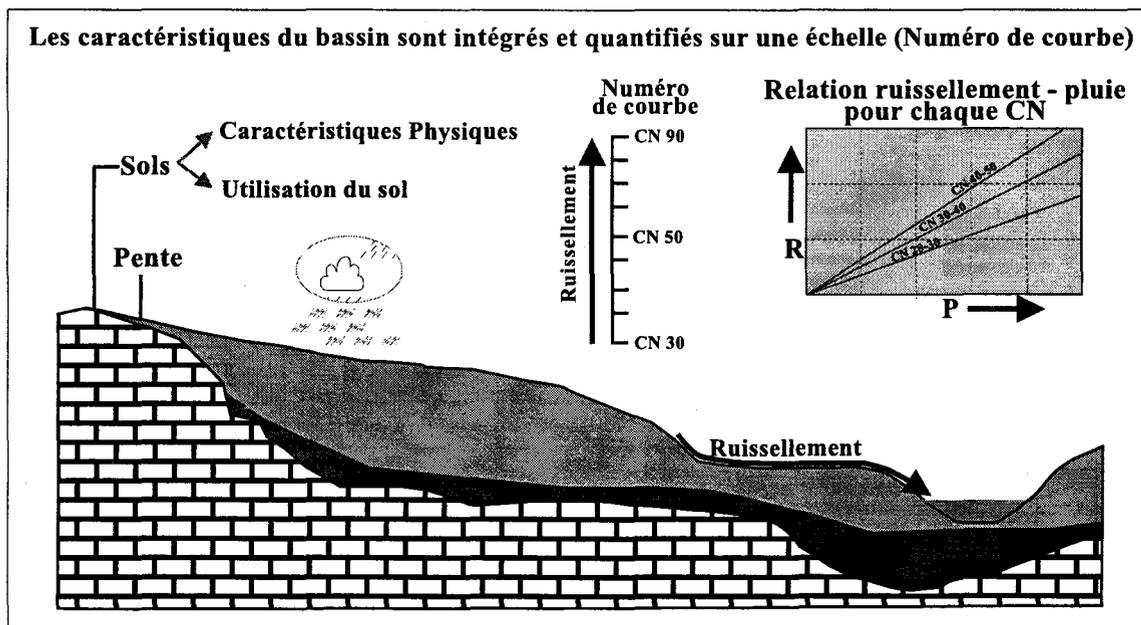


Figure 5.2 : Illustration de comment se fait l'évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée (Monfet, 1979).

Le calcul du ruissellement se fait tout d'abord en intégrant les caractéristiques physiques des sols et l'utilisation qu'on en fait, la pente des terrains et les conditions d'humidité précédant chaque événement pluvieux, à l'intérieur de coefficients de ruissellement. La connaissance de ces coefficients, ainsi que des valeurs de précipitations mensuelles, permettent ensuite de calculer la lame d'eau qui est ruissellée.

En connaissant le ruissellement mensuel moyen et en utilisant l'équation du bilan hydrologique il est alors possible de dériver les valeurs de la recharge mensuelle à l'aide des autres données climatiques.

Suivant la méthode, les différents secteurs de la région d'étude ont été classés à l'intérieur des trois classes d'utilisation du sol, des trois classes de pente de terrain ainsi que des quatre classes de sols. Les classes pour chacun de ces paramètres sont détaillées au tableau 5.16. Étant donné qu'on utilise les données mensuelles pour le calcul de la recharge, il n'est pas nécessaire d'évaluer les conditions hydrologiques prévalant avant chaque événement pluvieux. Les valeurs moyennes des conditions hydrologiques ont donc été utilisées. À chaque différente combinaison des trois paramètres correspond un coefficient de ruissellement. Des coefficients élevés indiquent des contextes où le ruissellement est favorisé alors que des coefficients faibles reflètent des conditions où l'infiltration est privilégiée. Par exemple, la combinaison d'un sol argileux, avec des pentes élevées et où on pratique l'agriculture, donne des coefficients variant entre 89 et 91 alors que des secteurs qui sont caractérisés par des sols grossiers, dans des régions boisées et où les terrains sont plats possèdent des coefficients variant entre 22 et 25.

La carte de l'utilisation du sol obtenue à la MRC a été utilisée pour la classification des diverses régions à l'intérieur des quatre classes d'utilisation du sol. Tous les secteurs agricoles ont été classés dans la catégorie de culture intensive alors que toutes les autres régions, à l'exception des zones urbaines, ont été classées dans la catégorie de boisé et friches à broussailles. En ce qui concerne l'attribution des coefficients de ruissellement pour les régions urbaines, les valeurs moyennes des coefficients entre dense et peu dense ont été utilisées. La classification de la région en fonction des classes d'utilisation du sol est présentée à l'Annexe N. Pour le classement des sols, le résultat de l'évaluation du paramètre type de sols (cf. **5.3.2.3 Sols**) a été utilisé. La reclassification des sols en fonction des quatre classes s'est faite de la façon suivante : toutes les unités ayant des cotes de 10, c'est-à-dire celles où les sols sont peu ou pas développés, ainsi que les sols ayant des cotes de 1, c'est-à-

Tableau 5.16: Coefficients de ruissellement pour différentes combinaisons de sols, d'utilisation du sol, de la pente du terrain et des conditions hydrologiques prévalant avant un événement pluvieux. (Tiré et adapté de Monfet, 1979).

Utilisation du sol	Pente	Condition hydrologique	Classes de sol			
			A	B	C	D
Culture intensive (maïs, céréales, horticulture)	3 %	pauvre	63	74	80	82
		bonne	60	70	78	81
	3-8 %	pauvre	65	76	84	88
		bonne	63	75	83	87
	8 %	pauvre	72	81	88	91
		bonne	67	78	85	89
Culture extensive (Foin, pâturages, friches herbacées)	3 %	pauvre	39	61	74	80
		bonne	25	40	70	78
	3-8 %	pauvre	49	69	79	84
		bonne	39	61	74	80
	8 %	pauvre	68	79	86	89
		bonne	49	69	79	84
Boisé et friches à broussailles	3 %	pauvre	25	55	70	77
		bonne	22	53	65	74
	3-8 %	pauvre	41	63	75	81
		bonne	25	55	70	77
	8 %	pauvre	47	68	80	84
		bonne	41	63	75	81
Résidentielle, commerciale, dense peu dense			73	83	88	90
			59	74	82	86

A: Graviers et sables grossiers

B: Sables moyens et fins

C: Sables fins mal drainés, sols limoneux et argiles perméables

D: Argiles lourdes et sols minces

dire les sols argileux, ont été classées dans la catégorie D. Une exception a été faite pour les sols grossiers qui se sont développés sur les tills (cote de 10). Ceux-ci ont été classés dans la catégorie A. Tous les sols auxquels on a attribué des cotes entre 7 et 9 se sont vus reclassés dans la catégorie B. Finalement, les sols dont les cotes varient de 2 à 6 ont été reclassés à l'intérieur de la classe C. La carte des sols classifiés en fonction des quatre classes SCS est présentée à l'Annexe O. La classification des pentes a été effectuée en utilisant la carte de la dérivée du MNT. La délimitation des diverses zones s'est faite directement sur MapInfo

en tenant compte des limites des unités hydrogéologiques. La carte des pentes reclassifiées en fonction des intervalles SCS est présentée à l'Annexe P. La carte finale est le résultat de l'intersection des polygones et montre la distribution des coefficients de ruissellement sur le territoire à l'étude. Cette carte est présentée à l'Annexe Q.

Les données de recharge ont été compilées uniquement pour la période allant du mois d'avril au mois de novembre. Nous avons ainsi assumé qu'il n'y a aucune recharge des aquifères durant la période hivernale, c'est-à-dire durant les mois où le sol est gelé. La carte présentée à l'Annexe R montre le résultat de la reclassification des zones de recharge en fonction des intervalles de valeurs DRASTIC (cf. section 5.2.2.3.2 *Paramètres DRASTIC*). Étant donné que les intervalles de valeurs sont assez larges, une seule classe domine dans la région. Celle-ci est caractérisée par des valeurs de recharge qui varient de 10 à 16 cm/année. Ces valeurs sont trois fois moindres que celles qui ont été obtenues par modélisation dans une étude antérieure pour le bassin de la rivière Portneuf (Paradis, 1997).

5.3.2.5 Pente du terrain

La carte des pentes a été obtenue en faisant la dérivée du modèle numérique de terrain à l'aide du module Grid d'Arc/Info. La reclassification des pentes selon une charte de couleurs en fonction des 6 classes DRASTIC a permis de bien faire ressortir les intervalles à cartographier. Comme la taille des pixels du MNT est de 900 m² (30m x 30m), le niveau de détail qui est présent sur la carte de la dérivé de la topographie est assez important et il a été nécessaire de simplifier la carte. Cette simplification s'est faite en regroupant à l'intérieur de plus grandes régions les petits secteurs qui n'étaient pas cartographiables. Les polygones identifiant chacune des classes ont été tracés directement sur MapInfo.

La carte des résultats est présentée à l'Annexe S et fait bien ressortir les deux principales régions physiographiques. Les Laurentides sont en effet marquées par des valeurs généralement plus élevées de pentes alors que les Basses-Terres ressortent avec des valeurs de la pente oscillant entre 0 et 2%. Ces faibles pentes favorisent l'infiltration et ces secteurs

sont donc plus vulnérables à la contamination du point de vue de ce paramètre.

5.3.2.6 Zones vadose

Le principal outil qui a été utilisé pour l'évaluation de la zone vadose est la carte du Quaternaire. Les données de forages ainsi que la carte du socle rocheux ont été utilisées comme documents complémentaires. La zone vadose est la partie située entre la surface du sol et la nappe phréatique, et pour cette raison, les dépôts quaternaires jouent un rôle important dans l'évaluation de ce paramètre. En effet, outre les contextes où le roc est affleurant, la zone vadose des aquifères au roc ou dans les dépôts meubles est généralement constituée des dépôts quaternaires.

La cote la plus élevée pour toutes les unités a été attribuée aux sables et graviers fluvioglaciaires (9). De part leur granulométrie grossière, ces dépôts sont très perméables. La cote de 8 a été attribuée aux formations de sables et graviers deltaïques et littoraux. On a attribué aux secteurs où la moraine de Saint-Narcisse affleure une cote de 7 alors que les régions où elle est recouverte par des dépôts argileux et silteux ont eu des cotes variant de 2 à 3. Des cotes de 8 ont été attribuées aux endroits où la moraine est directement surmontée par les sables et graviers deltaïques. Les dépôts de till en couverture continue ont eu la cote standard de 6. Les secteurs sud où l'on retrouve des séquences de tills, de sables et d'argiles surmontant les roches du Paléozoïque ont eu des cotes variant de 3 à 4, dépendant de l'importance des dépôts fins : les secteurs à prédominance d'argiles et de tills ont eu les cotes plus faibles (3) alors que les secteurs contenant une portion plus importante de sables ont eu des cotes plus élevées (4).

La délimitation des zones a été faite directement sur MapInfo. Le résultat final est présenté à l'Annexe T. La carte finale de l'évaluation de la zone vadose présente certaines similarités avec la carte du paramètre Aquifère (cf. Annexe L). Ceci est dû au fait que, comme mentionné plus-haut, le matériel de la zone vadose pour la plupart des aquifères de surface est le même que le matériel aquifère. Les aquifères qui ne présentent pas cette caractéristique

sont les aquifères semi-confinés du Paléozoïque. En effet, lorsque ces roches ne sont pas affleurantes, elles sont généralement couvertes par une couche continue à semi-discontinue d'un mélange de till, de sable et de matériaux fins. Ces matériaux de faible conductivité hydraulique contribuent à restreindre l'écoulement de l'eau souterraine, et des contaminants, dans ces formations.

5.3.2.7 Conductivité hydraulique

Tel que mentionné en introduction, seul un nombre restreint de données sur les valeurs de conductivité hydraulique sont disponibles dans la base de données. La source principale de ces données est représentée par l'ensemble des rapports hydrogéologiques qui ont été compilés dans le cadre de ce projet (cf. 4.3.1. Compilation des données disponibles - C - Informations sur les propriétés hydrauliques). Ces rapports contiennent les résultats d'essais de pompage, d'essais en bout de tubage et d'analyses granulométriques qui nous permettent de dériver les valeurs de la conductivité hydraulique. À l'ensemble de ces données disponibles peuvent être aussi ajoutés les résultats d'analyses granulométriques effectuées par la CGC dans le cadre de la cartographie des dépôts superficiels de la région de Portneuf ainsi que nos propres résultats d'analyses granulométriques provenant de nos relevés de terrain.

Un projet de fin d'étude dont le principal but était de déterminer les conductivités hydrauliques moyennes des dépôts de surface dans la MRC de Portneuf a permis d'évaluer la validité des données de conductivités hydrauliques contenues dans les rapports hydrogéologiques (Belland-Pelletier, 1996). Les données valides ont pu ensuite être intégrées aux données de conductivité hydrauliques provenant des analyses granulométriques (relation empirique de Hazen). L'ensemble de ces données a permis de relativement bien caractériser la conductivité hydraulique moyenne des formations de sables et graviers deltaïques. La conductivité hydraulique moyenne dans ces formations est de 16 m/j, ce qui correspond à l'intervalle DRASTIC de 4. Les quelques données disponibles pour la moraine de Saint-Narcisse indiquent des valeurs moyennes semblables et on lui a donc aussi attribué la cote

de 4. Pour l'évaluation de toutes les autres formations, étant donné l'absence de données, on a utilisé la table contenant les valeurs typiques de conductivité hydraulique pour les divers matériaux géologiques que l'on retrouve dans Freeze et Cherry (1979), (cf. 2.1.3.1 *La porosité et la perméabilité*). Les valeurs moyennes pour les formations fracturées sont toutes inférieures à l'intervalle de valeur correspondant à la cote minimale DRASTIC. Ces formations ont donc eu la cote de 1. Les alluvions des terrasses fluviales ont été classées à l'intérieur de la cote 2 et les alluvions récentes sous la cote de 1. Le secteur à Saint-Casimir où se trouve le système karstique s'est vu attribué la cote de 10.

La délimitation des zones s'est faite directement sur MapInfo. Le résultat final est présenté à l'Annexe U. La carte fait ressortir les deux principales classes de vulnérabilité, soit celle reliée aux formations très perméables de sables et graviers et celle correspondant aux formations fracturées.

5.3.3 Intégration des données et résultats

Comme décrit dans la section suivante, chacune des cartes des résultats de l'évaluation des sept paramètres DRASTIC a été construite dans MapInfo. L'intégration des sept couches pour l'obtention des indices finaux de vulnérabilité n'a malheureusement pas pu se faire à l'aide de MapInfo. Le logiciel utilisé pour ce faire a été IDRISI. Ce logiciel permet de convertir des données polygonales (vectorielles) sous forme de données matricielles ('*raster*'). La forme matricielle est préférée, voir essentielle, lorsque l'on désire procéder à des opérations mathématiques ou logiques sur des éléments d'expressions géographiques. Les fichiers MapInfo ont donc été transférés sur IDRISI à partir duquel on a pu additionner les sept couches pondérées (figure 5.3).

Le résultat de l'opération est présenté à l'Annexe V. Ce résultat représente la vulnérabilité à la contamination des aquifères libres et semi-captifs dans la MRC. Les zones hachurées identifient les secteurs où les silts et argiles sont affleurants, et, conséquemment, les endroits où l'on retrouve les aquifères confinés au roc. La vulnérabilité à la contamination de ces

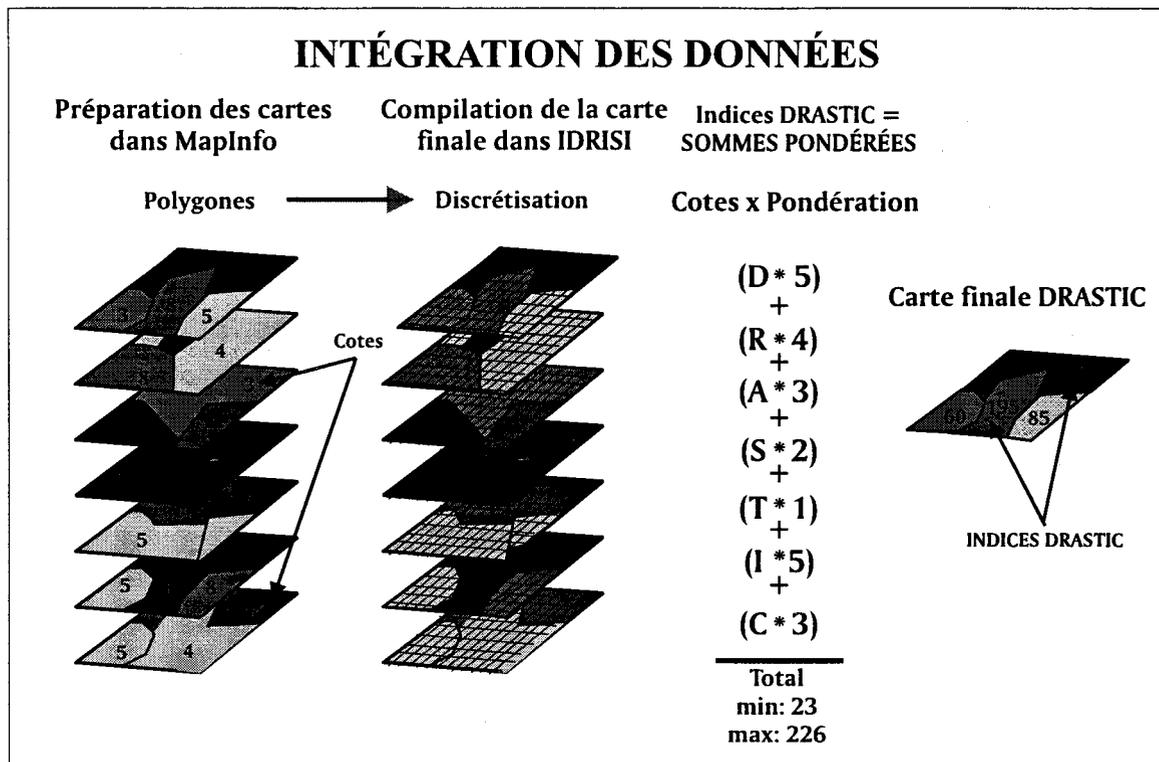


Figure 5.3 : Intégration des données : étapes menant à la carte finale DRASTIC.

aquifères n'a pas été évaluée.

Les classes de vulnérabilité suggérées par DRASTIC ont ensuite été utilisées pour représenter de façon plus globale le degré variable de protection des aquifères (cf 5.2.2.3.4 *Représentation de la vulnérabilité*). Ce résultat est présenté à l'Annexe W. Ce mode de représentation fait ressortir les grandes unités hydrogéologiques présentes sur le territoire. Les unités hydrogéologiques 1B (sables et graviers deltaïques), 2I (sables et graviers fluvioglaciers) et 2M (sables et graviers littoraux) ressortent remarquablement avec les valeurs les plus élevées de vulnérabilité. Les secteurs les moins vulnérables sont ceux où l'on retrouve les unités hydrogéologiques associées aux aquifères situés dans les roches du Précambrien (2A) et du Paléozoïque (1Aa, 1Ab, 1Ac). Les valeurs minimums des indices de vulnérabilité vont de 101 pour les aquifères situés dans les schistes argileux (unité hydrogéologique -1Ac-, Rampes Rocheuse) à 193 pour les aquifères situés dans les sables

et graviers fluvioglaciaires (unité hydrogéologique -2I-, Sables et Graviers Fluvioglaciaires). Les indices de vulnérabilité occupent 5 des 8 classes d'intervalle de vulnérabilité. Cet étalement des valeurs des indices semble adéquat, le but de l'évaluation de la vulnérabilité étant de faire ressortir le degré variable de protection des aquifères. L'inclusion des aquifères captifs dans l'évaluation aurait fort probablement permis d'atteindre 7 des 8 classes.

La carte synthèse de la vulnérabilité est présentée à la pochette 2. Cette carte contient plusieurs éléments, soient, en trame de fond, la carte de l'utilisation du sol sur laquelle on a superposé les indices DRASTIC de vulnérabilité, les données ponctuelles identifiant les sources potentielles de contamination ainsi que les prises d'eau municipales et privées accompagnées des réseaux d'aqueducs qu'elles alimentent. L'identification de ces différents secteurs d'activités et leur mise en contexte avec des indices de vulnérabilité est importante car elle permet de vérifier la présence possible de conflits d'usage.

Cette carte constitue la synthèse des informations touchant les aspects de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination. Elle vise à rendre accessible les informations spécialisées en les présentant dans un format avec lequel les aménagistes et les gestionnaires du territoire sont habitués de travailler. Cette carte constitue donc un outil précieux pour la gestion de la ressource.

CHAPITRE 6

DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Disponibilité de la ressource

6.1.1 Formations aquifères de la MRC de Portneuf

Les aquifères les plus intensément exploités et les plus productifs de la MRC de Portneuf se trouvent dans les formations de sables et graviers deltaïques situées le long des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier. Ces formations forment de vastes dépôts qui s'étendent des contreforts des Laurentides jusqu'à la hauteur de Pont-Rouge (rivière Jacques-Cartier) et du village de Saint-Alban (rivière Sainte-Anne). L'épaisseur des unités deltaïques varie de quelques mètres lorsqu'elles sont aux abords des unités de till, d'argile et de crêtes rocheuses, à plus de 50 mètres en certains endroits de la MRC. Les secteurs où se trouvent les plus fortes épaisseurs de sables et graviers sont situés à Saint-Alban/Sainte-Christine, Saint-Raymond et Pont-Rouge. Les valeurs d'épaisseur dans ces secteurs varient de 15 à 60 mètres. Les informations sur les épaisseurs de ces formations jointes à celles des profondeurs à la nappe indiquent des valeurs moyennes d'épaisseurs saturées de l'ordre de 10 à 15 mètres, avec des valeurs maximales d'environ 45 mètres. La conductivité hydraulique des matériaux deltaïques oscille entre 2.0×10^{-5} m/s et 2.8×10^{-3} m/s, avec des valeurs moyennes de 1.4×10^{-3} m/s. Ces valeurs sont révélatrices d'un très bon potentiel aquifère, ce qui permet l'exploitation actuelle de la ressource ainsi qu'une recharge adéquate de ces aquifères. Sachant que le potentiel aquifère est directement proportionnel à l'épaisseur saturée et à la conductivité hydraulique des formations géologiques, on peut conclure que ces secteurs constituent les zones les plus propices au captage d'eaux souterraines, et ce, d'autant plus que la qualité naturelle de l'eau de ces aquifères est, en règle générale, excellente. En effet, si l'on exclue les problèmes locaux de contamination par les nitrates, les seuls problèmes de qualité d'eau qui ont été relevés sont reliés à la présence de pH légèrement acide (~ 6.5) (ce qui peut causer la corrosion de la tuyauterie).

Les ressources en eaux de deux des trois secteurs identifiés, soit celui de Saint-Raymond et de Saint-Alban/Sainte-Christine, sont actuellement exploitées par des prises d'eau municipales. Celles-ci appartiennent respectivement aux municipalités de Saint-Raymond, de Deschambault et de Saint-Marc-des-Carières. Les systèmes de captages sont constitués de trois puits crépinés pour Saint-Raymond, de deux puits crépinés pour Deschambault et de quatre sources captées pour Saint-Marc-des-Carières. Les débits moyens extraits à ces prises d'eau sont, respectivement, de 1772 m³/j, 1800 m³/j et 1679 m³/j. Ces taux de pompage comptent parmi les plus élevés de la région. De façon générale, la disponibilité de la ressource dans ces aquifères est adéquate. En effet, aucune mention à l'effet de pénurie d'eau ou d'abaissement des niveaux d'eau dans les puits n'a été faite. Cependant, la présence de deux prises d'eau (Sources de Saint-Marc et prise de Deschambault) qui sont très près l'une de l'autre et qui puisent les eaux d'un même aquifère peut entraîner des conflits d'usage. Une augmentation des débits d'eau extraits dans ces secteurs pourrait possiblement causer des problèmes d'interférence entre ces deux prises d'eau.

6.1.2 Secteurs avec un plus faible potentiel aquifère

Les secteurs à plus faible potentiel aquifère sont situés dans les régions sud et sud-ouest de la MRC ainsi que dans les secteurs des Laurentides. Les régions sud et sud-ouest sont caractérisées par des dépôts de tills et d'argiles qui couvrent des roches sédimentaires ainsi que par endroits des roches ignées et métamorphiques. Quelques dépôts de sables sont présents dans ces secteurs mais leurs faibles épaisseurs ou leurs étendues plutôt restreintes ne permettent généralement pas qu'on les exploite à des fins d'approvisionnement municipal. Les municipalités qui se trouvent dans ces secteurs doivent donc principalement s'approvisionner à partir des formations fracturées ou à partir d'eau de surface. La disponibilité de l'eau dans ces aquifères est souvent modérée et la qualité est fréquemment mauvaise. À titre d'exemple, la municipalité de Cap Santé qui s'approvisionne à partir de deux puits aménagés dans les schistes argileux doit traiter l'eau afin d'éliminer les excès de fer et de manganèse. La municipalité de Portneuf possède aussi un puits installé dans ces formations. Ce puits est cependant utilisé uniquement pour palier au manque d'eau durant

les périodes de forte demande. Les faibles débits disponibles ainsi que la piètre qualité de l'eau ne permettent pas la pleine exploitation de cet aquifère. La municipalité de Rivière-à-Pierre est la seule municipalité qui s'approvisionne en eau à partir des formations du Précambrien. La qualité de l'eau est généralement bonne, par contre, les pénuries d'eau sont fréquentes durant la période estivale.

6.1.3 Formations aquifères potentielles

Les formations géologiques qui possèdent un potentiel aquifère encore non prouvé ou qui possèdent un potentiel aquifère certain mais qui sont peu exploitées sont, respectivement, la moraine de Saint-Narcisse et les unités de sables et graviers fluvioglaciaires.

De par leur granulométrie, leur épaisseur importante et leur étendue parfois significative, les sables et graviers fluvioglaciaires constituent des formations à fort potentiel aquifère. Dans la MRC, ces formations sont principalement localisées dans les secteurs nord de la région d'étude, i.e., en bordure et à l'intérieur des Laurentides. Ces aquifères sont peu exploités dans la région. Leur sous-utilisation actuelle est attribuable à la faible densité de la population dans ces secteurs de la MRC. Une seule municipalité, soit Saint-Ubalde, capte les eaux provenant de ce type d'aquifère.

On peut voir la moraine de Saint-Narcisse affleurer sur la presque totalité de son parcours à travers la MRC, i.e. du sud-ouest (Saint-Casimir) jusqu'au nord-est (Saint-Raymond). La moraine de Saint-Narcisse est formée d'un mélange de dépôts de tills, de silts et argiles marines mais aussi d'unités de sables et graviers. C'est la présence de ces zones de sables et graviers qui contribue au potentiel aquifère de la moraine. L'épaisseur de la moraine varie de quelques mètres à plus de 20 mètres et son étendue latérale en profondeur est encore mal connue. Une seule municipalité, soit Saint-Léonard-de-Portneuf, exploite les eaux souterraines provenant de la moraine de Saint-Narcisse. Les débits qui sont actuellement pompés sont assez faibles, de l'ordre de 43 m³/j. Cependant, les résultats d'essais de

pompage à ce puits ont permis d'évaluer des débits maximums exploitables au moins 10 fois supérieurs (Tek Eau, 1980). L'existence de cette prise d'eau confirme donc le potentiel aquifère local de la moraine de Saint-Narcisse. Par contre, l'étendue régionale de ce potentiel aquifère n'est pas encore confirmée. L'investigation du potentiel aquifère régional de ce dépôt est présentement en cours dans la MRC de Portneuf au CGQ (Centre Géoscientifique de Québec). Cette étude a pour but d'améliorer la compréhension des différents faciès de sédimentation présents à l'intérieur de la moraine. Cette meilleure compréhension permettra ensuite de préciser le potentiel aquifère régional de la moraine. Advenant la démonstration d'un potentiel régional réel, la moraine pourrait constituer une source intéressante d'approvisionnement pour plusieurs municipalités et résidents. Plus précisément, les municipalités de Saint-Thuribe et de Saint-Casimir pourraient grandement profiter de cette autre source d'approvisionnement en eau potable. En effet, celles-ci s'approvisionnent actuellement à partir de lacs. Bien que la qualité de l'eau y soit bonne, ce mode d'approvisionnement pose souvent des problèmes de contamination bactériologique.

Les travaux de cartographie hydrogéologique ont permis de mieux caractériser la ressource quant à sa distribution, sa disponibilité et son utilisation actuelle et potentielle. L'évaluation de la vulnérabilité de ces aquifères à la contamination constitue l'étape suivante de la cartographie hydrogéologique. En effet, on doit non seulement caractériser la ressource du point de vue quantitatif et qualitatif mais il importe aussi de bien connaître sa vulnérabilité à la contamination. Cette donnée permettra que l'on gère cette ressource de façon conséquente.

6.2 Vulnérabilité

Les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination avec la méthode DRASTIC indiquent que les formations aquifères situées dans les sables et graviers sont celles qui sont les plus vulnérables à la contamination. Ces formations se trouvent principalement concentrées le long des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier (unités hydrogéologiques -1B-, sables et graviers deltaïques), mais on les

retrouve aussi en bordure et le long des vallées des Laurentides (unités -2I-, sables fluvioglaciaires) ainsi que dans certaines parties sud de la MRC (unités -2M-, sables littoraux). La grande vulnérabilité de ces aquifères granulaires de surface est attribuable à la présence de sols généralement sableux, au matériel aquifère et de la zone vadose qui est très perméable, aux faibles pentes ainsi qu'aux valeurs de la conductivité hydraulique relativement élevées dans ces matériaux.

Parmi ces aquifères, ce sont les sables et graviers deltaïques qui occupent la plus grande superficie. Celle-ci est de 65% comparativement à 23 % pour les formations littorales et 12% pour les sables et graviers fluvioglaciaires.

Ainsi, les formations deltaïques qui sont les aquifères les plus exploités dans la MRC sont celles qui occupent le plus grand territoire. De plus, la présence au-dessus de ces aquifères d'activités humaines de toutes sortes telles que l'agriculture, l'exploitation de matériaux granulaires, ainsi que les activités typiquement rencontrées dans les zones urbaines (sites d'enfouissement, réservoirs souterrains, réseau routier etc.) rendent ces formations aquifères encore plus à risque à la contamination. D'ailleurs, des cas de contamination de puits par les nitrates ont déjà été signalés dans ces formations aquifères. Il apparaît donc urgent de veiller à la protection de la qualité de l'eau de ces aquifères. Les priorités de gestion et de protection devraient donc aller vers ces zones aquifères où les risques de conflits d'usage et de contamination sont les plus élevés.

Bien qu'elles soient vulnérables à la contamination, les formations fluvioglaciaires, étant donné leur localisation géographique, ne sont pas réellement menacées par la contamination. En effet, outre la présence de quelques terres en culture ainsi que de sites d'extraction de granulats, un nombre relativement restreint de sources de contamination est actuellement présent dans ces secteurs. Cependant, cette situation ne devrait pas mener à un faux sentiment de sécurité.

La vulnérabilité à la contamination de la moraine de Saint-Narcisse passe de modérément élevée dans les secteurs où elle affleure à plutôt faible dans les régions où elle est surmontée par des dépôts marins fins. Il est important de noter que la majeure partie des segments affleurants de la moraine est boisée. Ce fait contribue à réduire le risque réel de contamination étant donné qu'aucune activité n'y a lieu. Ceci est d'autant plus important que ces régions affleurantes constituent les principales zones de recharge de la moraine.

Les autres secteurs de la MRC sont caractérisés par des indices de vulnérabilité modérés à faibles. Les aquifères au roc dans les secteurs sud et sud-ouest sont protégés par la présence de couches de till, de sable et d'argile. Par contre, l'étendue de ces couches sur le territoire n'est pas partout uniforme et des affleurements rocheux peuvent être rencontrés ici et là. Les affleurements rocheux représentent les régions où se fait la recharge de ces aquifères et les impacts d'une éventuelle contamination dans ces zones sont donc plus importants. Pour leur part, les formations aquifères rocheuses situées dans les secteurs des Laurentides sont favorisées par la présence de pentes importantes, de faibles valeurs de conductivités hydrauliques ainsi que de faibles valeurs de recharge.

L'identification de la vulnérabilité à la contamination des aquifères devrait contribuer à l'adoption de modes de gestion préventive. Ainsi, les formations très vulnérables et à grand potentiel aquifère pourraient être mises sous surveillance dans les secteurs présentant des risques élevés de contamination. Ceci dans le but de préserver la qualité de l'eau et de prévenir les coûts élevés reliés à la décontamination.

6.3 Intégration et synthèse des informations hydrogéologiques

Les cartes hydrogéologiques produites dans le cadre de ce projet seront intégrées et synthétisées à l'intérieur de deux planches cartographiques. Ces planches seront publiées ultérieurement par la Commission géologique du Canada et ne sont pas annexées au présent mémoire.

La première planche regroupe les aspects quantitatifs de la ressource (hydrostratigraphie et piézométrie des aquifères granulaires de surface) tandis que la synthèse des données reliées à sa gestion est contenue sur la planche vulnérabilité à la contamination et périmètres de protection. Cette synthèse des informations hydrogéologiques à l'intérieur de deux planches cartographiques contribuera à optimiser leur utilisation. En effet, en regroupant les cartes hydrogéologiques et en les présentant dans un ordre logique et ordonné, les planches cartographiques deviennent un outil de connaissance de base et de gestion de la ressource. Les planches représentent la synthèse des travaux de la cartographie hydrogéologique et en ce sens, elles constituent des documents autonomes, pouvant servir à la gestion et la protection des ressources en eaux souterraines. La disposition prévue des cartes à l'intérieur de chacune des planches est présentée aux figures 6.1 et 6.2.

La planche hydrostratigraphie et piézométrie des aquifères granulaires de surface s'adresse à des utilisateurs spécialisés dans le domaine de l'hydrogéologie. La compréhension des cartes qui sont présentées sur cette planche nécessite un certain degré d'interprétation qu'en règle générale seuls les gens œuvrant dans le domaine sont habilités à faire. La planche de la vulnérabilité à la contamination et périmètres de protection présente les informations concernant la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination. Elle vise des utilisateurs variés, tels que les gestionnaires du territoire, les aménagistes ou les groupes environnementaux qui ont une connaissance généralement limitée de l'hydrogéologie. Cette planche fournit les informations hydrogéologiques spécialisées dans un format qui leur est familier.

La carte centrale qui est présentée sur la hydrostratigraphie et piézométrie des aquifères granulaires de surface est la carte piézométrique et elle est présentée à l'échelle 1:100 000. Cette carte montre les contours d'altitude de la surface de la nappe phréatique et la direction de l'écoulement de l'eau souterraine dans les principaux aquifères de sables et graviers de surface. Les informations concernant les prises d'eau municipales et les réseaux d'aqueducs y sont aussi présentées.

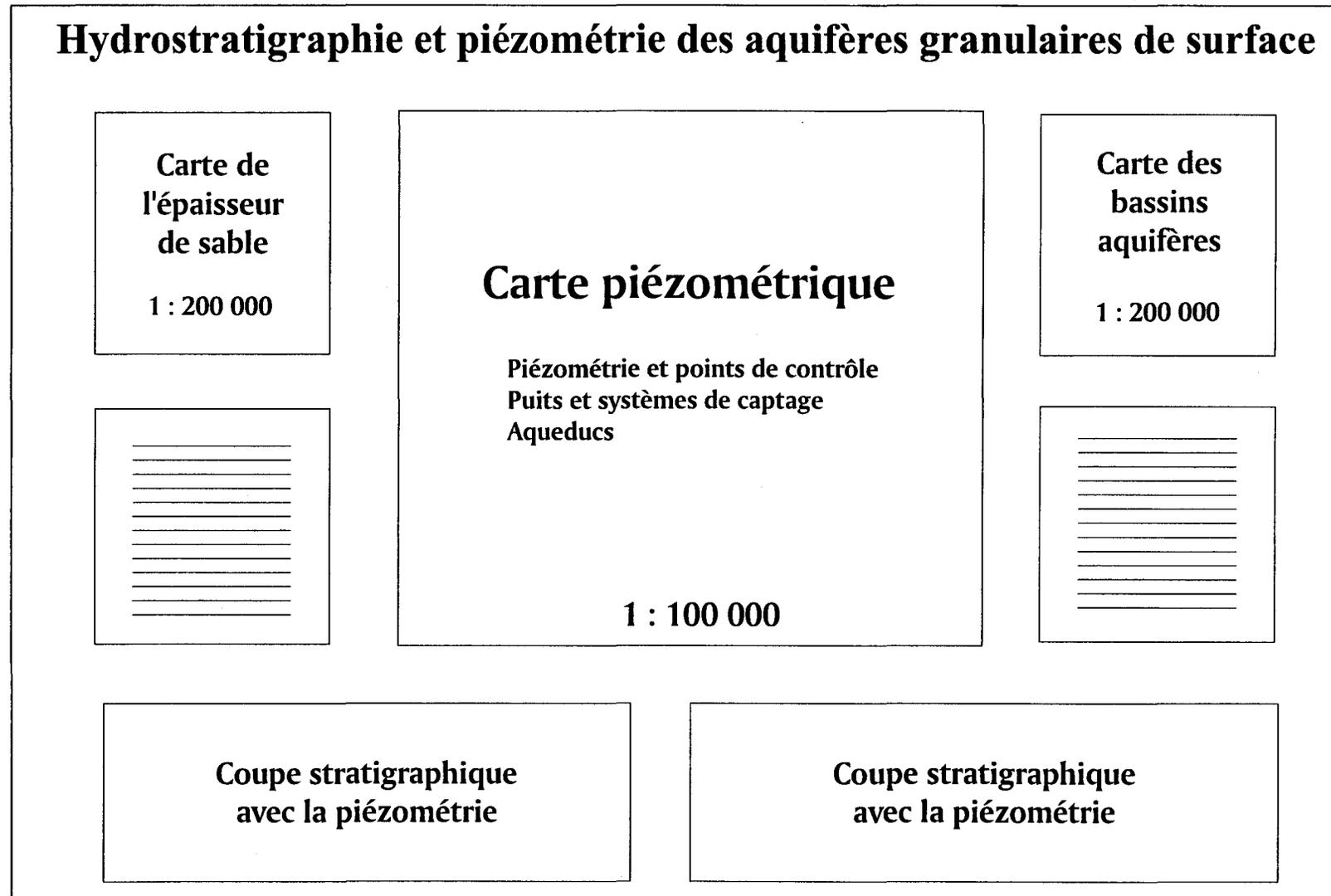


Figure 6.1: Disposition des cartes hydrogéologiques sur la planche hydrostratigraphie et piézométrie des aquifères granulaires de surface.

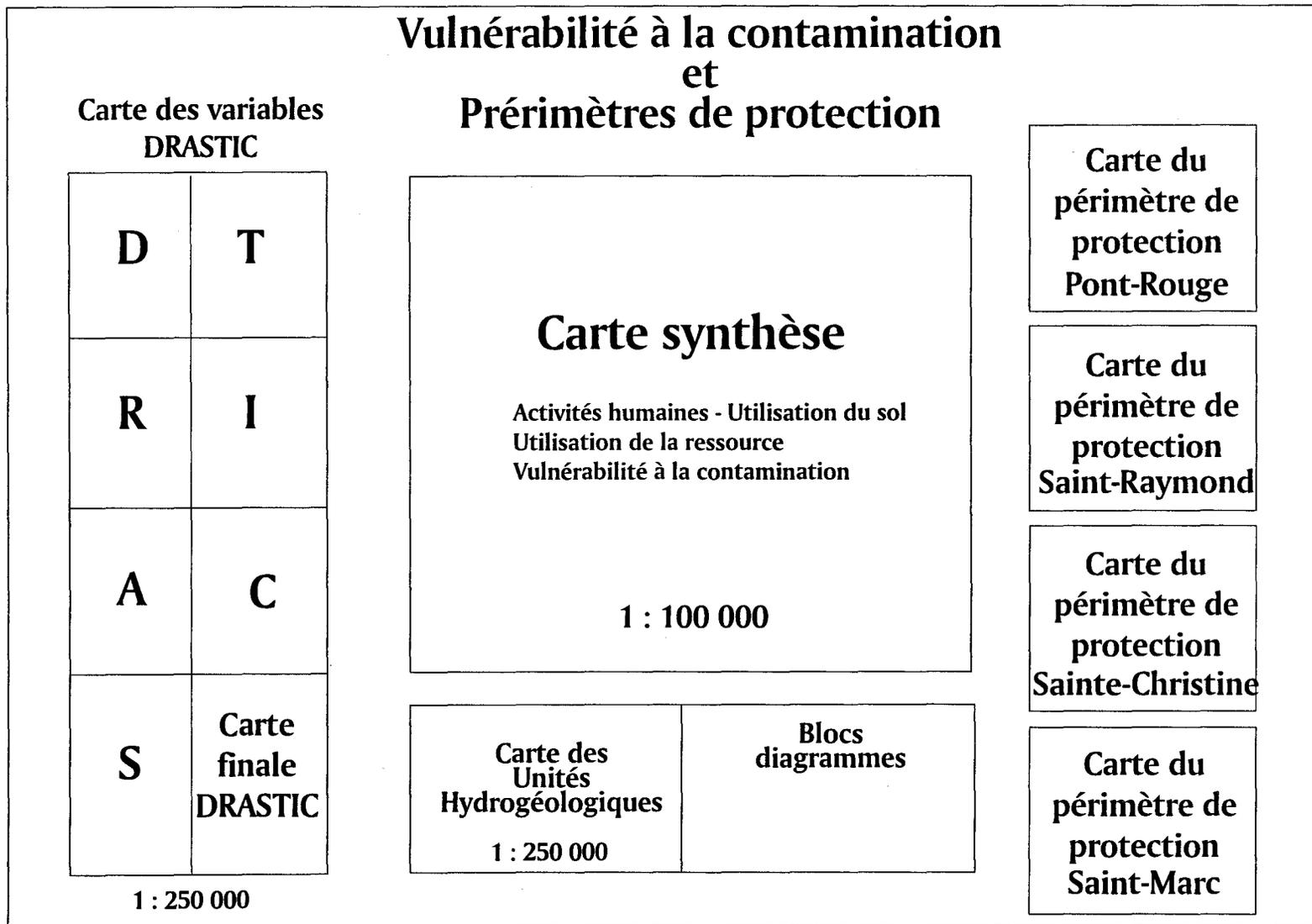


Figure 6.2: Disposition des cartes hydrogéologiques sur la planche vulnérabilité à la contamination et périmètres de protection.

Cette carte occupe la place centrale étant donné que c'est à partir d'elle qu'on peut connaître la direction de l'écoulement des eaux souterraines ainsi que les limites des bassins hydrogéologiques. Ces données permettent par exemple d'évaluer l'impact possible d'une activité potentiellement polluante (i.e., sites d'enfouissement, industries polluantes, etc.) sur une prise d'eau potable. La localisation de ces activités en fonction des prises d'eau potable peut donc être optimisée par les informations contenues sur la carte piézométrique. Ces données sont importantes et nécessaires pour la gestion du territoire en fonction de la ressource. De façon générale, la carte piézométrique permet de comprendre la dynamique de l'écoulement régional dans les formations aquifères granulaires de surface. Les cartes satellites qui accompagnent la carte piézométrique montrent l'épaisseur de sables et graviers de surface, les bassins aquifères ainsi que des coupes hydrostratigraphiques. Les coupes hydrostratigraphiques remettent les aquifères dans leur contexte géologique en montrant la troisième dimension. La carte d'épaisseur de sables et graviers de surface donne une appréciation du potentiel aquifère dans les unités de sables et graviers de surface alors que la carte des bassins aquifères permet de connaître la limite de chacun des 14 aquifères identifiés dans la région d'étude. La connaissance des limites aquifères permet de connaître l'impact d'une éventuelle contamination.

Les données présentées sur la planche vulnérabilité à la contamination et périmètres de protection constituent la synthèse des travaux portant sur l'évaluation de la vulnérabilité et la détermination des périmètres de protection (la détermination des périmètres de protection fait présentement l'objet d'un autre projet du CGQ). Les éléments que l'on retrouve sur cette planche sont la carte synthèse de la vulnérabilité, les résultats de l'évaluation des sept paramètres DRASTIC (au 1:250 000) ainsi que la carte finale de vulnérabilité, les cartes de périmètres de protection et la carte des unités hydrogéologiques accompagnée des blocs diagrammes. La carte synthèse est présentée comme carte centrale à l'échelle 1:100 000. Cette carte contient les contours des indices DRASTIC de vulnérabilité qui ont été reportés sur la carte de l'utilisation du sol. Les sources ponctuelles de contamination potentielle ont aussi été ajoutées. La carte synthèse permettra aux gestionnaires d'identifier les régions qui

sont les plus vulnérables à la contamination et à l'intérieur desquelles les activités potentiellement polluantes devraient être réglementées ou surveillées. Les cartes des 7 paramètres DRASTIC complètent la carte synthèse en présentant les informations qui ont permis d'obtenir la carte finale de la vulnérabilité. Ces données, prises individuellement, viennent compléter l'information contenue sur la carte synthèse. En effet, un utilisateur désirant connaître le ou les paramètres qui ont contribué le plus significativement à un indice DRASTIC, pourra le faire en se référant aux cartes individuelles des paramètres. La carte des unités hydrogéologiques est présentée au 1:200 000, elle permet d'obtenir une image rapide du contexte hydrogéologique dans lequel se trouve la région d'étude. Les blocs diagrammes qui l'accompagnent montrent la succession des matériaux géologiques à l'intérieur de chacune des unités hydrogéologiques. Ces blocs facilitent la compréhension globale des diverses unités hydrogéologiques.

Deux autres planches cartographiques ont été développées dans le cadre du projet Portneuf. Puisque ces cartes ne font pas partie du présent mémoire, on en mentionnera uniquement les principales composantes. Ces deux autres planches sont, la planche de la géologie (géologie et stratigraphie des formations superficielles) et la planche de la qualité de l'eau (hydrogéochimie des eaux souterraines). Les cartes contenues sur ces planches complètent la représentation de la géologie et de l'hydrogéologie de la MRC de Portneuf. La planche de la géologie et stratigraphie des formations superficielles présente au centre la carte des formations quaternaires au 1:100 000. Les cartes satellites sont : la carte des bassins hydrologiques superposés au MNT, la carte de l'épaisseur totale de sédiments et des coupes stratigraphiques. La carte des dépôts quaternaires est un document clef pour la compréhension de l'hydrogéologie régional de la région. C'est par exemple à partir de celle-ci que les travaux de terrains ont été planifiés, que l'on a délimité les secteurs hydrogéologiques et que la plupart des cartes paramétriques (épaisseur de sable, épaisseur totale) et thématiques (paramètres DRASTIC) ont été dérivées. Elle représente le principal document de base utilisé dans ce projet. La planche hydrogéochimie des eaux souterraines contient des diagrammes radiaux qui illustrent la distribution et les concentrations en divers

éléments des eaux souterraines sur le territoire à l'étude. La connaissance de la qualité de l'eau des aquifères est essentielle. En effet, la seule présence de la ressource n'est pas suffisante pour son exploitation, il faut aussi en connaître la qualité.

Les planches qui ont été développées dans le cadre de ce projet permettent de mieux connaître la ressource en eaux souterraines en ce qui a trait à sa localisation, son utilisation, son potentiel, ainsi que sa vulnérabilité à la contamination. Elles constituent donc des outils essentiels pour la gestion et la protection de la ressource.

6.4 Utilité des cartes hydrogéologiques pour la gestion de la ressource et du territoire

Un comité formé de spécialistes en hydrogéologie a produit un rapport pour le Conseil Canadien des Géosciences intitulé: 'Les problèmes et la recherche sur les eaux souterraines au Canada (Morgan, 1994)'. Ce document résume l'état d'avancement des travaux de recherches sur les eaux souterraines au Canada et les problèmes actuels qui menacent cette ressource naturelle. Comme dans beaucoup d'autres rapports produits à cet effet ces dernières années, la principale préoccupation soulevée est le manque de connaissance de la ressource (Gouvernement du Canada, 1995; Environnement Canada, 1991). À la lumière de ce constat, on mentionne qu'il est illusoire d'espérer gérer cette ressource si les connaissances de base sont insuffisantes ou même inexistantes. Suivant ce constat, l'une des six principales recommandations proposées par le comité porte sur la nécessité, pour le Canada, de procéder à des travaux d'inventaire de la ressource.

La mise en lumière de l'urgent besoin d'acquérir les connaissances de base sur la ressource, mais surtout sa mise en tête de liste en tant que priorité par un regroupement national et un gouvernement provincial (Projet de Politique sur les eaux souterraines du MEF, cf. 1.1 Problématique) illustrent bien l'urgence du problème. Les études mettent en perspective l'aspect non seulement régional mais aussi national de la problématique de la gestion des eaux souterraines.

Dans ce contexte, les travaux de cartographie hydrogéologique sont donc tout à fait opportuns. Les cartes hydrogéologiques développées et produites dans le cadre du projet pilote Portneuf répondent directement à une problématique du Québec mais aussi à un besoin d'ordre national. Les cartes font le point sur la ressource, son utilisation, son potentiel d'utilisation et sa vulnérabilité. Il est intéressant de mentionner que la production de ces deux types de cartes, i.e. paramétriques et thématiques, répond à une critique qui est souvent faite aux cartes de vulnérabilité. Cette critique est résumée par Anderson et Gosk (1989) qui mentionnent que les cartes paramétriques telles que les cartes piézométriques, de l'épaisseur des dépôts et de leur perméabilité sont beaucoup plus valables pour l'évaluation de la vulnérabilité que les cartes de vulnérabilité proprement dites. Ils mentionnent aussi que les spécialistes chargés d'investiguer un site ou un territoire donné vont avoir tendance à se baser sur ces cartes paramétriques plutôt que sur les cartes de la vulnérabilité qui sont beaucoup moins précises et dont les paramètres de base sont généralement cachés aux utilisateurs. Le projet Portneuf, en réunissant à la fois les cartes paramétriques et les cartes de la vulnérabilité permet à tous les utilisateurs, spécialistes, gestionnaires ou aménagistes, d'y trouver leur compte.

6.5 Pertinence des outils informatiques dans l'accomplissement des travaux de cartographie hydrogéologique

L'utilisation de techniques informatiques faite dans le cadre de ce projet de cartographie hydrogéologique régionale constitue une première au Québec. Depuis les dernières cartes hydrogéologiques produites dans les années 80, aucune autre carte d'ordre régionale n'avait été publiée. Les outils informatiques s'étant développés depuis ce temps, leur utilisation dans le cadre de ce projet pilote s'avérait nécessaire, voir inévitable. L'utilisation de ces outils informatiques a permis d'en vérifier la pertinence et l'applicabilité dans le cadre de travaux de cartographie hydrogéologique régionale ainsi que d'en évaluer la contribution à l'optimisation de ces travaux (qualité, temps, argent).

Les points saillants reliés à l'utilisation des outils informatiques pour la cartographie hydrogéologique régionale sont les suivants. Les outils informatiques ont permis de mieux gérer les données hydrogéologiques et en ont facilité l'accès et le traitement. Les outils informatisés de traitement de données ont permis d'extraire le maximum de chacune des données et d'expérimenter, en peu de temps, plusieurs solutions, routines ou traitements. Les options de 'graphisme' ou de 'dessin' qui sont offertes par ces diverses applications ont grandement amélioré la présentation des résultats sous forme de cartes, et, de ce fait, ont augmenté leur intelligibilité et la quantité d'informations que l'on peut y présenter. Ce fait est important étant donné que l'utilisation des cartes est souvent fonction de leur apparence et de leur clarté. L'actualisation des cartes au fur et à mesure que de nouvelles données sont disponibles est aussi un facteur important que l'on doit considérer. En effet, les outils informatiques permettent la mise à jour des cartes de façon assez rapide et aisée. Finalement, ces outils peuvent contribuer à augmenter la productivité de la cartographie hydrogéologique. Par contre, ceci est plus particulièrement vrai lorsque les ressources humaines sont disponibles. En effet, l'apprentissage des nombreux outils informatiques peut s'avérer long et le temps gagné en productivité durant la cartographie peut être perdu lors de la période d'apprentissage. Les coûts de certains logiciels peuvent aussi limiter leur utilisation généralisée. Tous les logiciels utilisés, à l'exception d'Arc/Info, sont accessibles sur des plateformes PC, ce qui les rend plus abordables.

6.5.1 Considérations concernant l'utilisation des MNT dans les études hydrogéologiques

Les modèles numériques de terrain (MNT) sont d'une grande utilité pour la compréhension des processus et la dérivation des paramètres hydrogéologiques qui sont contrôlés par la topographie. La piézométrie, la topographie du socle ou les pentes de terrain sont des exemples de paramètres d'intérêt en hydrogéologie dont la détermination nécessite des données d'altitude de terrain. Les MNT représentent une source de données attrayante pour l'obtention de ces paramètres. Cependant, il est important de souligner les limitations de cette source de données.

Les MNT sont produits en interpolant les courbes de niveaux et les points cotés numérisés à partir des cartes topographiques sur papier. Les modèles d'interpolation utilisés varient d'un MNT à l'autre mais produisent tous inévitablement certains artefacts de calcul. La présence de ces artefacts engendre des valeurs erronées d'altitude de terrain. De plus, la précision latérale (x,y) et verticale (z) des MNT varie en fonction de la qualité de la numérisation des courbes topographiques. L'imprécision liée à la qualité de la numérisation est toutefois difficile à quantifier. Notons que la précision verticale des MNT dépend aussi de l'équidistance des courbes de niveaux. Ainsi, l'intervalle des contours topographiques étant de 10 mètres sur des cartes topographiques à l'échelle du 1 :50 000, la précision théorique est alors de ± 10 m. L'incertitude sur l'altitude sera minimale pour les terrains à forts reliefs, où les courbes de niveaux sont rapprochées, alors qu'elle sera maximale pour les régions à faible relief où les points de contrôle sont plus espacés. Quand ils sont utilisés dans le cadre d'études régionales ou pour des secteurs montagneux, l'imprécision des MNT est généralement négligeable. Cependant, leur imprécision aura des conséquences beaucoup plus graves dans le cas d'études locales ou lorsqu'ils sont appliqués à des terrains à faibles reliefs.

Les paramètres hydrogéologiques énumérés précédemment sont généralement dérivés à partir de données de forages ou d'observations ponctuelles. Par exemple, pour obtenir le niveau piézométrique dans un forage ou l'altitude de la base d'une unité aquifère, on soustraira la profondeur à la nappe ou de l'unité rencontrée lors du forage, de la valeur de l'altitude du terrain au lieu exact du forage. Ce sont ces données ponctuelles de forage qui seront ensuite interpolées pour obtenir les paramètres hydrogéologiques en continu dans un secteur donné. Les valeurs d'altitude à la localisation de chacun des forages peuvent être très précises lorsque déterminées par nivellement. Les altitudes sont par contre approximatives quand elles sont déterminées à l'aide d'une carte topographique. Dans certains cas où l'altitude n'est pas connue, il est alors possible d'utiliser les MNT pour obtenir cette valeur. Ces forages pourront alors être utilisés pour générer les paramètres hydrogéologiques recherchés. L'attribution des valeurs d'altitude du sol pour des forages est sans conteste un aspect très

pratique des MNT mais elle implique malheureusement certains désavantages. Puisque les cartes produites à l'aide de forages dont l'altitude est dérivée des MNT comportent nécessairement le même degré d'erreur que les MNT, la validité des cartes peut alors être compromise aux endroits où les MNT sont moins précis.

Les conséquences de l'imprécision du MNT de Portneuf ont été constatées lorsqu'on a voulu générer les cartes de l'épaisseur saturée ainsi que la profondeur à la nappe des formations de sables et graviers de surface. Les problématiques spécifiques à chacun des deux cas sont illustrées à la figure 6.3. Ces exemples ne sont pas tirés de cas spécifiques mais sont toutefois représentatifs des problèmes rencontrés.

La figure présente une coupe géologique interprétée à partir de données de forages. Le contexte géologique présenté est typique de celui rencontré dans le secteur de Pont-Rouge. Le seul paramètre qui est connu précisément est le niveau de la nappe parce que l'altitude des puits d'observation du niveau d'eau a été déterminée par nivellement. Par contre, aucun des forages stratigraphiques ne possède de valeurs d'altitude du sol et il est donc nécessaire d'utiliser les valeurs du MNT pour les déterminer. La surface du terrain est représentative du relief topographique rencontrée, c'est-à-dire une série de terrasses fluviales. La courbe de la surface du terrain du MNT est présentée en pointillé. Nous constatons que l'écart entre l'altitude réelle du terrain et celle reproduite par le MNT varie latéralement. Ainsi, en bordure des terrasses, l'écart est très faible et le MNT semble bien représenter la réalité. Cependant, l'écart est à son maximum à mi-chemin entre les bordures des terrasses. Cet écart est le résultat de l'interpolation des données d'altitude tirées des courbes de niveau. Ainsi, aux bordures des terrasses, où les courbes de niveaux passent, le degré de contrôle de l'altitude des MNT est précis alors qu'entre celles-ci, malgré la présence de quelques points cotés, il est faible. Entre ces courbes, l'interpolation des altitudes est approximativement linéaire. À moins d'avoir des points de contrôles d'altitude additionnels (plus de points cotés), l'interpolation sera toujours incapable de reproduire un phénomène géomorphologique tel que celui des terrasses fluviales.

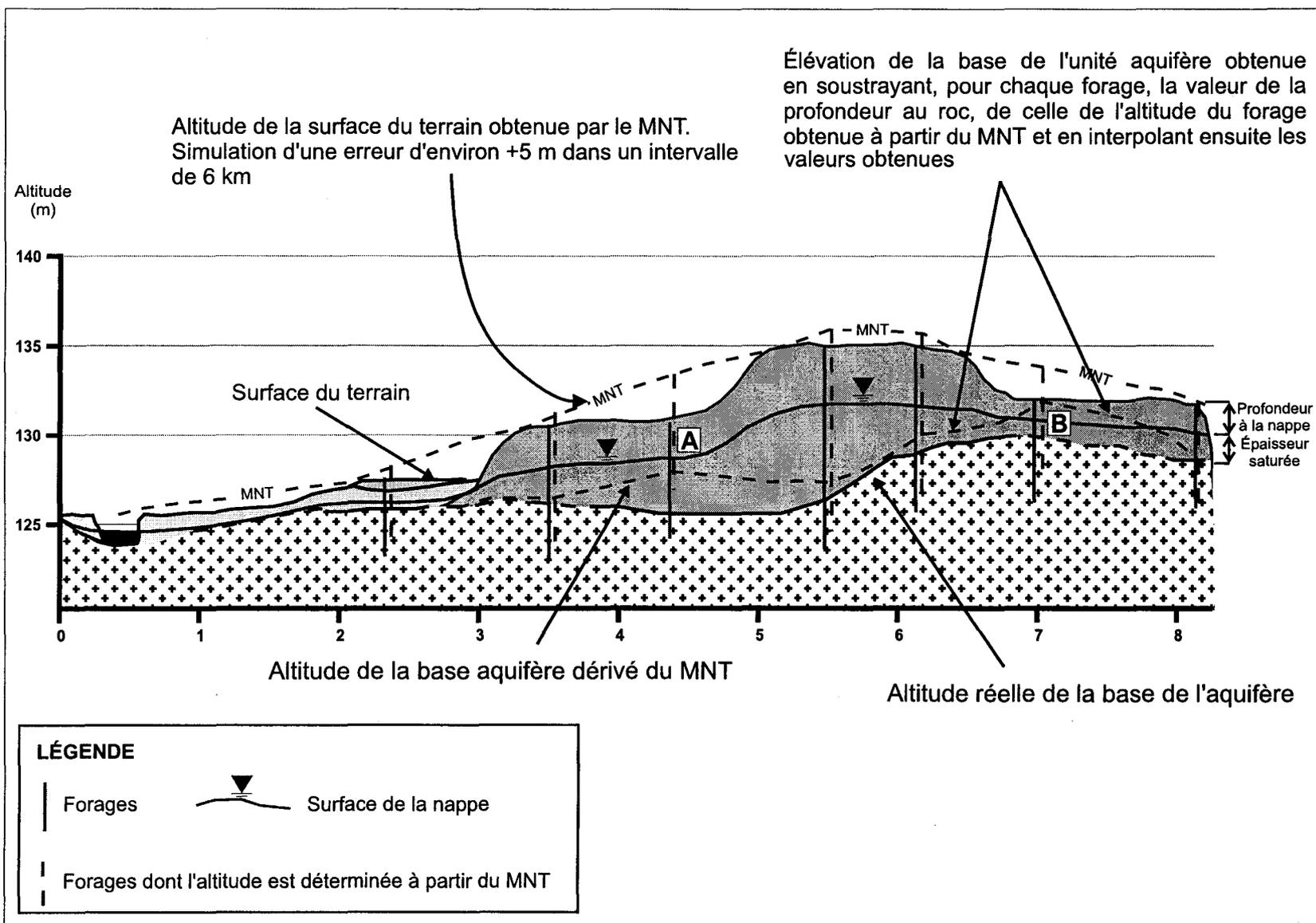


Figure 6.3 : Exemple de l'imprécision des MNT et de son impact sur les paramètres hydrogéologiques dérivés.

L'effet de ces erreurs sur les résultats des paramètres qui nous intéressent peut être dramatique. Pour le calcul de l'épaisseur saturée, on peut voir qu'au point A il y aura sous-estimation de celle-ci. Cette sous-estimation sera d'au moins 75 % de la valeur réelle. Ce phénomène est poussé à son extrême au point B. À cet endroit l'altitude calculée de la base de l'aquifère est supérieure à l'altitude réelle de l'eau. Des problèmes similaires sont observés pour le paramètre profondeur à la nappe. Au point A la profondeur réelle est de 5 mètres alors que la valeur calculée avec le MNT est de 10 mètres.

Il est à noter que l'imprécision acceptable des MNT est fonction de la dimension des systèmes aquifères. Par exemple, dans le cas de systèmes aquifères de grandes épaisseurs (i.e. aquifère > 100 m), la précision de ± 10 mètres du MNT n'affectera pas de façon marquée la validité des paramètres hydrogéologiques obtenus. Cependant, les paramètres hydrogéologiques dérivés à partir d'un MNT pour un système aquifère de faible épaisseur (< 10 m) seront beaucoup plus sujets à l'effet de l'imprécision de ± 10 mètres. En effet, dans ces cas particuliers, l'erreur compte alors pour plus de 100 % de l'épaisseur de l'aquifère.

6.6 Recommandations

Cartographie hydrogéologique

1) Dans le cadre des travaux de terrain réalisé pour ce mémoire, seulement 26 échantillons provenant principalement des formations de sables et graviers deltaïques ont été prélevés. Afin de déterminer des valeurs moyennes de la conductivité hydraulique de ces matériaux il serait souhaitable d'avoir un plus grand nombre d'échantillon. De plus, les complexes deltaïques sont des séquences granoclassées et présentent donc des caractéristiques hydrauliques différentes selon que l'on se trouve à la base ou au sommet des séquences. La caractérisation des variations de la conductivité hydraulique à l'intérieur des matériaux deltaïques devrait être effectuée. Celle-ci permettrait de situer plus justement la limite inférieure des aquifères, et par le fait même de mieux évaluer l'épaisseur ainsi que la capacité

de ces aquifères à transmettre l'eau souterraine. Pour ce faire, les travaux de terrain devraient inclure un échantillonnage en surface et en profondeur, autant que possible. Les nombreuses coupes naturelles sont des sites privilégiés, impliquant peu de frais, pour l'échantillonnage. Enfin, l'échantillonnage ne devrait pas être restreint à la zone aquifère cartographiée mais devrait aussi inclure les autres matériaux qui font partie du système aquifère (aquifère – aquitard).

2) Dans le cadre de ce mémoire, seules les prises d'eau municipales et privées ont été inventoriées. Cependant, tous les travaux de cartographie hydrogéologique régionale devraient aussi inclure la compilation des sources d'approvisionnement en eaux souterraines des industries. Les besoins en eau de certaines industries sont grands et les débits d'eau extraits des aquifères qu'elles exploitent constituent des renseignements supplémentaires utiles concernant les caractéristiques hydrauliques des aquifères.

3) Plusieurs résidents, coopératives d'aqueduc, municipalités et industries obtiennent leur eau potable à partir de systèmes de captage de sources. En effet, le contexte géomorphologique des systèmes deltaïques conduit à la formation de nombreuses sources le long des brisures topographiques créées par l'érosion fluviale ainsi qu'au contact géologique entre les sables deltaïques et la séquence de sédiments fins de la Mer de Champlain. La cartographie de ces sources ainsi que leur jaugeage constitueraient des informations supplémentaires très utiles à ajouter aux cartes hydrogéologiques.

Vulnérabilité à la contamination

4) La méthode DRASTIC qui a été utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité comporte plusieurs paramètres dont la détermination est approximative (conductivité hydraulique, recharge, profondeur à la nappe dans les milieux fracturés). Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité qui tiendrait uniquement compte des données normalement disponibles serait peut-être mieux appropriée pour les études régionales.

Traitement des données

5) Comme mentionné à la section 6.5.1, la présence de valeurs d'altitude erronées dans les MNT peut mener à la dérivation de paramètres hydrogéologiques inexacts, ce qui peut entraîner de mauvaises interprétations hydrogéologiques. Il serait donc important de bien connaître la précision des MNT préalablement à leur utilisation dans les études hydrogéologiques.

6) Les systèmes d'information géographique permettent de valider rapidement les bases de données. Une bonne partie de la validation du SIH est aujourd'hui effectuée par le ministère de l'Environnement et de la Faune. Toutefois, certaines vérifications ne sont pas effectuées et quelques puits erronés échappent alors à la validation. Pour contrer ces omissions, deux procédures supplémentaires peuvent être effectuées :

- Valider les données de forages à l'aide de la carte géologique des dépôts superficiels (ex : forage dont la stratigraphie comprend une séquence complète de sable mais qui est situé dans un bassin argileux devrait être enlevé).
- Comparer l'altitude des forages avec celle du MNT. S'il y a une différence correspondant à un facteur de trois, l'erreur est probablement dû au système d'unité (1 mètre \cong 3 pieds). Dans ce cas il faudra convertir la valeur de l'altitude ainsi que toutes les données d'épaisseur en mètres. Si tel n'est pas le cas, on peut alors soupçonner une erreur de localisation.

Présentation des résultats

7) Il serait intéressant de présenter sous forme de tableau synthèse les caractéristiques moyennes des aquifères qui ont été mesurées aux divers endroits de forages effectués dans le cadre des travaux hydrogéologiques (épaisseur saturée, conductivité hydraulique,

stratigraphie, profondeur à la nappe, etc.). Ces données fourniraient un complément à la vue régionalisée qu'offrent les cartes hydrogéologiques en présentant un aperçu des variations ou des similarités des caractéristiques hydrauliques à l'intérieur d'un même aquifère.

8) Un volet important de tout projet de cartographie hydrogéologique comprend la diffusion des résultats. Les cartes hydrogéologiques s'adressent aux utilisateurs et aux gestionnaires de la ressource et ce sont donc vers ceux-ci que les efforts de diffusion doivent être faits. Il faudrait donc un programme de communication comprenant :

- Des rencontres avec les directions régionales du MEF et les MRC afin de présenter les travaux effectués et les résultats obtenus.

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS

7.1 Synthèse des travaux

Les travaux de cartographie hydrogéologique dans la MRC de Portneuf ont permis de mieux caractériser la ressource en eau souterraine. Les formations granulaires de surface localisées le long des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier sont les aquifères les plus productifs, les plus intensivement exploités et ils sont aussi très vulnérables à la contamination. La qualité de l'eau de ces aquifères, si l'on exclut les problèmes de contamination par les nitrates, est généralement excellente. Certains secteurs à plus fort potentiel aquifère, à l'intérieur de ces grandes unités de sables et graviers, ont été identifiés. Quelques-uns de ces secteurs sont déjà exploités mais d'autres restent encore inexploités. Les nombreuses activités humaines se déroulant au-dessus de ces aquifères les rendent encore plus vulnérables à la contamination.

Les aquifères situés dans les formations sédimentaires du Paléozoïque ou du Précambrien sont généralement moins productifs et faiblement exploités. Leur vulnérabilité à la contamination varie de modérée à faible. La qualité de l'eau de ces aquifères est très variable. Les principaux problèmes sont reliés à des paramètres physicochimiques qui dépassent les normes d'ordre esthétique.

Dans les secteurs nord de Saint-Raymond, aux abords des Laurentides, ainsi qu'à l'intérieur des vallées des Laurentides se trouvent des formations granulaires à fort potentiel aquifère mais qui sont encore peu exploitées. Ces formations sont très vulnérables à la contamination, cependant le risque réel de contamination est plutôt faible étant donné le nombre restreint d'activités potentiellement polluantes.

La Moraine de Saint-Narcisse présente localement un bon potentiel aquifère. Mais, l'étendue régionale de ce potentiel reste à être démontrée. La vulnérabilité à la contamination de la Moraine est assez élevée dans les secteurs où elle affleure et généralement faible dans les zones où elle est recouverte par des sédiments fins.

Les diverses techniques informatiques utilisées pour compiler, récolter, colliger et présenter les informations hydrogéologiques ont grandement optimisé les travaux de cartographie. Ces outils ont permis de mieux traiter les données et ce, de façon rapide et aisée. La représentation des données et des résultats sous forme de carte a aussi été optimisée par l'utilisation de ces outils. En effet, le développement de formats de carte a nécessité la modification constante des cartes ce qui n'aurait pas été possible avec les méthodes de mise en carte traditionnelles. Enfin, la mise à jour des cartes est facilitée par le fait qu'elles sont contenues sous format numérique.

L'intégration des cartes à l'intérieur de deux planches cartographiques permettra de synthétiser l'information hydrogéologique dans un format cohérent et intégré. Chaque planche vise différents utilisateurs. La planche la hydrostratigraphie et piézométrie des aquifères granulaires de surface vise des spécialistes dans le domaine de l'hydrogéologie alors que la planche vulnérabilité à la contamination et périmètres de protection vise les gestionnaires du territoire. Ces planches permettent de mieux apprécier la ressource, i.e, sa localisation, son étendue, son utilisation actuelle et potentielle ainsi que sa vulnérabilité à la contamination. Ces données devraient permettre une meilleure gestion de la ressource.

Les travaux entrepris dans le cadre de ce mémoire fournissent un exemple d'application de la cartographie hydrogéologique régionale d'aquifères granulaires de surface. Les divers travaux ont permis 1) d'exploiter et de valider un grand nombre d'informations hydrogéologiques disponibles au Québec pour la cartographie hydrogéologique, 2) d'utiliser et de valider les outils informatiques, 3) de développer des nouvelles techniques de cartographie ainsi que de développer de nouveaux formats de cartes. Cet exemple démontre la faisabilité et la pertinence de la cartographie hydrogéologique appliquée à de grands territoires en vue de la gestion et la protection de la ressource en eau souterraine.

CHAPITRE 8

BIBLIOGRAPHIE

- Albinet M., et Margat, J., (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bulletin du B.R.G.M. (Deuxième série) Section III, no.4 p.13-22.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G., (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. EPA/600/2-87-035, 455p.
- Andersen, P. et Woessner, W.W., (1992). Applied groundwater modelling. Simulation of flow and advecting transport. Academic Press, Inc. 381p.
- Anderson, L. J, et Gosk., (1989). Applicability of Vulnerability Maps. Environmental Geology Water Science, Vol. 13, No. 1, p.39-43.
- Aubre, François, (1992). Développement d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. Mémoire de maîtrise (M.Sc.), École des gradués, Université Laval, 248p.
- Banton, O., Lafrance, P. et Villeneuve, J.P., (1989). Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides. Une application du Logiciel VULPEST dans la région de Portneuf. Water pollution research, Journal of Canada, v24(1), p163-177.
- Beak Consultants Ltd., (1986). Groundwater Contamination in Canada: Selected Cases, Potential Sources and Protection Strategy. Report submitted to Environment Canada, Ottawa, July.
- Béland-Pelletier, C., (1996). Caractérisation du potentiel des dépôts de surface du piémont Laurentien dans la MRC de Portneuf. Rapport de projet de fin d'étude. Université Laval, Département de géologie et de génie géologique.
- Berg, R.C. et Abert, C.C., (1994). Large-scale aquifer sensitivity model. Environmental Geology, v. 24, no. 1, p. 34-42.
- Bockemuhl, S., (1992). Le livre de l'utilisateur - AUTOCAD 11. Éditions micro application. 510p.
- Boisvert, E., (1998). Gestion des données de forage à l'aide d'une approche topologique : application au projet de cartographie hydrogéologique du piémont laurentien, Québec. Dans recherches en cours 1998-E; Commission géologique du Canada, p. 177-124.

- Bourque, E., Laflèche M.R., Lefebvre, R. et Michaud, Y., (1996). Résultats initiaux de la caractérisation géochimique des aquifères du piémont laurentien dans la municipalité régionale de comtés de Portneuf (Québec). Recherche en cours, 1996-E.
- Bourque, É., Lefebvre, R. et Michaud, Y., (1998). Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf : hydrogéochimie des eaux souterraines. Commission géologique du Canada, Dossier public # 3664-c.
- Champagne, L., (1990). Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, MRC de Montcalm. Mémoire de maîtrise (M.sc.A), Université de Montréal, département de génie minéral, école polytechnique, 280p.
- Champagne, L. et Chapuis, R., (1993). Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC. Sciences et techniques de l'eau. V26, no.3 p.169-173.
- Clark, T.H., et Globensky, Y., (1973). Rapport Géologique - 148. Portneuf et parties de Saint-Raymond et de Lyster. Service de l'exploration géologique. Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale des Mines. 109p.
- Clark, T.H., et Globensky, Y., (1975). Rapport Géologique - 154. Région de Grondines. Service de l'exploration géologique. Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale des Mines. 157p.
- Cloutier, M., Parent, M. et Bolduc., A., (1997). Géologie des formations superficielles, région de Saint-Marc-des-Carières, Québec. Commission géologique du Canada. Dossier public 3544, échelle 1:100 000.
- Crow A.S. et Milburn P.M., (1995). The Contamination of Groundwater in Canada from Pesticides. Special Issue of the Water Quality Research Journal of Canada, Volume 30, Number 3, 201 pp.
- Cusson, J.C., (1996). Intégration dans un système d'information géographique de données géologiques et géochimiques pour la région de Portneuf et de Grondines. Projet de fin d'étude pour l'obtention du Baccalauréat en géographie. Département de Géographie, Université Laval.
- Doiron, A., (1996). Les unités hydrostratigraphiques du piémont laurentien de la région de Portneuf. Une contribution au projet de cartographie des aquifères du piémont laurentien. Centre géoscientifique de Québec, Commission géologique du Canada. Rapport interne.

- Driscoll, F.G., (1986). Groundwater and Wells. Johnson Screens, St-Paul Minnesota 55112. 1089p.
- Eastman, J.R., (1997). IDRISI for Windows, version 2.0. Clark University, Graduate School of Geography.
- Environnement Canada, (1991). Detailed Green Plan Deliverables, Green print Supplement No2.
- ESRI, (1995). Understanding GIS - The ARC/INFO Method. Version 7 for Unix[®] and OpenVMS[™]. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Evans, B.M. et Myers, W.L., (1990). A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC. Journal of Soil and Water Conservation, 45, 242-245.
- Fetter, C.W., (1994). Applied Hydrogeology. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ. 691p.
- Fetter, C.W., (1993). Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, NY, 458p.
- Foster, S.S.D., (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In Vulnerability of soil and groundwater to pollutants (Wvan Duijvenbooden and H.G. van Waegeningh, eds.), TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information No. 38, p.69-86.
- Fréchette, Réjean, (1987). Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, face au risque de contamination engendré par l'usage des pesticides. - Caractérisation d'aquifères situés au Québec-. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Eau, 112p.
- Freeze R.A. et Cherry J.A., (1979). Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey, 605p.
- Freeze R.A. et Witherspoon P.A., (1966). Theoretical analysis of regional groundwater flow:1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. Water Resources Research 2, no. 4:641-956.
- Freeze R.A. et Witherspoon P.A., (1967). Theoretical analysis of regional groundwater flow:2. Effect on water-table configuration and subsurface permeability variation. Water Resources Research 3, no. 2:623-34.

- Freeze R.A. et Witherspoon P.A., (1968). Theoretical analysis of regional groundwater flow:3. Quantitative Interpretations. Water Resources Research 4, pp. 581-590.
- Giroux, I., (1993). Contamination de l'eau souterraine par l'aldicarbe dans les régions de culture intensive de pommes de terre -1984 à 1991-. Ministère de l'environnement, direction du milieu agricole et du contrôle des pesticides, 61p.
- Golden Software, Inc., (1994). Surfer for Windows / Contouring and 3D Surface Mapping. User's Guide. V.6.0.
- Golder Associates Ltd., (1995). Groundwater Quality Protection Practices. Rapport soumis à Environnement Canada. 52p.
- Gouvernement du Canada, (1995). La prévention de la pollution, une stratégie fédérale de mise en oeuvre. Ministre des Approvisionnements et Services Canada. 12p.
- Grenier, C., (1973). Hydrogéologie région du lac Maskinongé, comtés de Berthier, Maskinongé et Joliette. Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses Naturelles, Direction Générale des Eaux. H.G-5.
- Grenier, C. et McCormack, R., (1985). Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, région de Granby. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement, Direction des eaux souterraines et de consommation.
- Hiscok, K.M., Lovett, A.A., Brainard, J.S. et Psrfitt, J.P., (1995). Groundwater vulnerability assessment: two case studies using GIS methodology. Quaterly Journal of Engineering Geology, 28, 179-194.
- Hubert, M.K., (1940). The theory of groundwater motion. Journal of Geology 48, no.8:785-944.
- Isabel, D., Gélinas, P. et Aubre, F., (1990). Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. Recherche Appliquée, sciences et techniques de l'eau, août 1990, p255-258.
- Keefer, D.A., (1995). Potential for Agricultural Chemical Contamination of Aquifers in Illinois: 1995 Revision. Environmental Geology, 148.
- Keith, H., Norton, C., Graham, W.S., et Scott, Q.C., (1981). Susceptibility of Ground Water to Contamination, St-Thomas Sheet (West Half). Ministry of the Environment, Water Resources Branch. Map S101, scale 1:50 000.

- Landry B. et Mercier M., (1986). Notions de géologie. Deuxième édition. Modulo éditeur, 437 p.
- Lavalin, (1992). Étude de l'état zéro de l'environnement, Projet d'implantation de l'aluminerie Lauralco, rapport soumis à Lauralco.
- Lefebvre, R., (1996). Écoulement en milieu poreux. Notes de cours. INRS-Géoressources.
- LeGrand, H.E., (1983). A standardised system for evaluating waste-disposal sites. National Water Well Association, Dublin, OH, 49p.
- Lepage, N., (1996). Analyse de la base de données hydrostratigraphiques du projet Portneuf. 11p. Rapport interne, CGC-Québec.
- MapInfo Corporation, (1995). MapInfo Professional - User Guide, V.4.1. MapInfo Corporation. 543p.
- McCormack, R., (1979). Étude Hydrogéologique, bassin versant de la Saint-François. Programme de Connaissances intégrées. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources Naturelles, Direction générale des Eaux. Rapport E.A.-16
- McCormack, R., (1985). Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, bassin de la rivière Yamaska. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement, Direction des eaux souterraines et de consommation.
- Michigan Department of Natural resources, (1983). Site assessment system (SAS) for the Michigan priority ranking system under the Michigan Environmental Response Act. Michigan Department of Natural Resources, 91p.
- Microsoft Corporation, (1992). Guide de l'utilisateur de Microsoft Excel, version 4.0. Microsoft Corporation.
- Microsoft Corporation, (1994). Guide de l'utilisateur. Microsoft ACCESS - Système de gestion de bases de données relationnelles pour Windows, Version 2.0. Microsoft Corporation. 957p.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune, (1985). Atlas environnemental du Québec. Ministère de l'environnement, Québec.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune, (1989). L'eau potable au Québec, un premier bilan de sa qualité. 67 p.

- Ministère de l'environnement et de la Faune, (1996). Projet de politique de protection et de conservation des eaux souterraines. 36p.
- Merchant, J.W., (1994) GIS-based groundwater pollution hazard assessment: A critical review of the DRASTIC model. Photogramm. Engng & Remote Sensing 60(9), 1117-1127.
- Monfet, J., (1979). Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée, rapport HP-51. Ministère des Richesses naturelles, Québec.
- Morgan A.V., (1994). Les problèmes et la recherche sur les eaux souterraines au Canada. Rapport préparé pour le Conseil Canadien des Géosciences par le « task Force on Groundwater Ressources Research ».
- Napolitano, P et Fabri A.G., (1996). Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. In HydroGIS 96: Application of Geographic Information System in Hydrology and Water resources Management. Proceeding of the Vienna Conference. P.559-566.
- Northwood Geoscience Ltd., (1995). Vertical Mapper - Contour modelling and display software, Version 1.0. Northwood Geoscience Ltd. 159p.
- Northwood Geoscience Ltd., (1997). BoreHole Mapper - Subsurface Display Analysis. For MapInfo, Desktop Mapping Software, Version 1.5. Northwood Geoscience Ltd. 59p.
- Paquette, J., (1996). Digital Elevation Models for hydrological applications in Oak Ridges Moraine, southern Ontario: the necessity for structured drainage networks; in Current Research 1996-E; Geological Survey of Canada, p.209-213
- Paradis, D., Bernier, P.J. et Levallois, P., (1991). Qualité de l'eau souterraine dans la MRC de Portneuf. Ministère de l'Environnement du Québec - Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation - de santé communautaire du Centre Hospitalier de l'Université Laval. 15p.
- Paradis, D., (1997). Qualité de l'eau souterraine en zone de culture intensive de la pomme de terre dans la MRC de Portneuf. Ministère de l'Environnement et de la Faune – Direction régionale de Québec, 14p.
- Paradis, D., Lefebvre, R. et Michaud Y., (1997). Analyse hydrologique pour l'évaluation de la recharge en eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Portneuf sur le piémont laurentien, Québec; dans Recherches en cours 1997-E; Commission géologique du Canada, p.83-88.

- Parent, M., Occhietti, S. et Kamothe, M., (1998). The late pleistocene record of eastern Canada - a history of shifting glacial outflow centres, surging ice streams and extensive marine incursions. Abstract Volume, Joint meeting GAC, MAC, APGGQ, IAH, CGU, May 18-20, 1998, Québec City, p. A-141-142. (Oral presentation)
- Parent, M., Michaud, Y., Boisvert, É., Fagnan, N., Cloutier, M., Bolduc, A. M. et Doiron, A., (1997). Stratigraphie et architecture des formations superficielles dans le piémont laurentien (MRC de Portneuf). Séminaire d'information sur la recherche géologique, MRNQ, 26-27 novembre, 1997, Québec. (Affiche).
- Piteau Associates Engineering Ltd. et Turner Groundwater Consultants, (1993). Groundwater Mapping and Assessment in British Columbia. Volume I, Review and Recommendations. Prepared for the Resources Inventory Committee Earth Science Task Force, 52p.
- Piteau Associates Engineering Ltd. et Turner Groundwater Consultants, (1993). Groundwater Mapping and Assessment in British Columbia. Volume II, Criteria and Guidelines. Prepared for the Resources Inventory Committee Earth Science Task Force, 71p.
- Prévoit, J.M., (1973). Inventaire des eaux souterraines, comtés de Saint-Hyacinthe et de Rouville. Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses naturelles, rapport H.G.-4.
- Raymond, R., Laflamme, G. et Godbout, G., (1976). Pédologie du comté de Portneuf. Agriculture Québec - Direction générale de la Recherche et de l'Enseignement. 164p.
- Répertoire des municipalités, (1994). Répertoire des municipalités.
- Robins, N., Adams, B., Foster, S. et Palmer, R., (1994). Groundwater Vulnerability Mapping: the British Perspective. HYDROGÉOLOGIE, N. 3, p. 35-42.
- Rosen, L., (1994). A study of the DRASTIC Methodology with Emphasis on Swedish Conditions. GROUND WATER, Vol., 32, No. 2, p.278-285.
- Russel H.A.J., Logan C., Brennand T.A., Hinton M.J. et Sharpe D.R., (1996). Regional geoscience database for the Oak Ridges Moraine project (southern Ontario). In Current Research, p.191-200.
- Santé Canada, (1996). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, 6^e édition, 102.p

- Seller L.E., Et Canter, L.W., (1980). Summary of selected ground water quality impact assessment methods. National Center for Groundwater Research, report no. NCGWR 80-3, Norman, Oklahoma, 142p.
- Sharpe D.R., Dyke L.D., Hinton M.J., Pullan S.E., Russel H.A.J., Brennand T.A., Barnett P.J. et Pugin A., (1996). Groundwater prospects in the Oak Ridges Moraine area, southern Ontario: application of regional geological models. In Current Research, p.181-189.
- Simard, G., (1977). Isotopes naturels et systèmes d'écoulement de la rivière Eaton. Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses Naturelles - Direction Générale des eaux. 87p.
- Simard, G., (1978). Hydrogéologie de la région de Mirabel. Gouvernement du Québec, Ministère des Rivhesses Naturelles - Direction Générale des Eaux. 69p.
- Skinner B.J., et Porter, S.C., (1989). The Dynamic Earth, an introduction to physical geology. John Willey & Sons, 514p.
- Struckmeier W.F., et Margat J., (1995). Hydrogeological Maps, A guide and a Standard Legend. International Association of Hydrogeologists, v17, 177p.
- Tek Eau, (1980). Recherche en eau pour la Municipalité de Saint-Léonard. Projet 29-80.
- Thériault, M., Miller, M. et Prévil. C., (1996). Utilisation du Sol des municipalités de la région de Portneuf. Écorecherche-CRAD, Université Laval, 1996
- Tóth, J.A., (1962). A theory of ground-water motion in small drainage basins in central Alberta, Canada. Journal of Geophysical Research 67, no. 11:4375-87.
- Tóth, J.A., (1963). A theoretical analysis of ground-water flow in small drainage basins. Journal of Geophysical Research 68, no. 16:4795-4811.
- U.S. Environmental Protection Agency, (1991). A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination. U.S. EPA, Office of Ground-Water Protection, Washington, preliminary document.
- U.S. Environmental Protection Agency, (1993). A review of methods for assessing aquifer sensitivity and groundwater vulnerability to pesticide contamination. U.S. EPA, Office of Water (4602), 813-R-93-002, 147p.
- Van Stempvoort, D., Ewert, L. et Wassenaar L., (1992). AVI: A method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada. PPWB pilot project, Final report, 18p.

- Vrba, J. et Zaporozec, A., (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists, v16, 131p.
- Walker, R.G. et James N.P., (1992). Facies Models Response - to Sea Level Change. L'Association Géologique du Canada, 409 p.
- Wei, M., (1996). Groundwater resources of British Columbia. British Columbia Ministry of environment, Lands & Parks. Chapter 2.



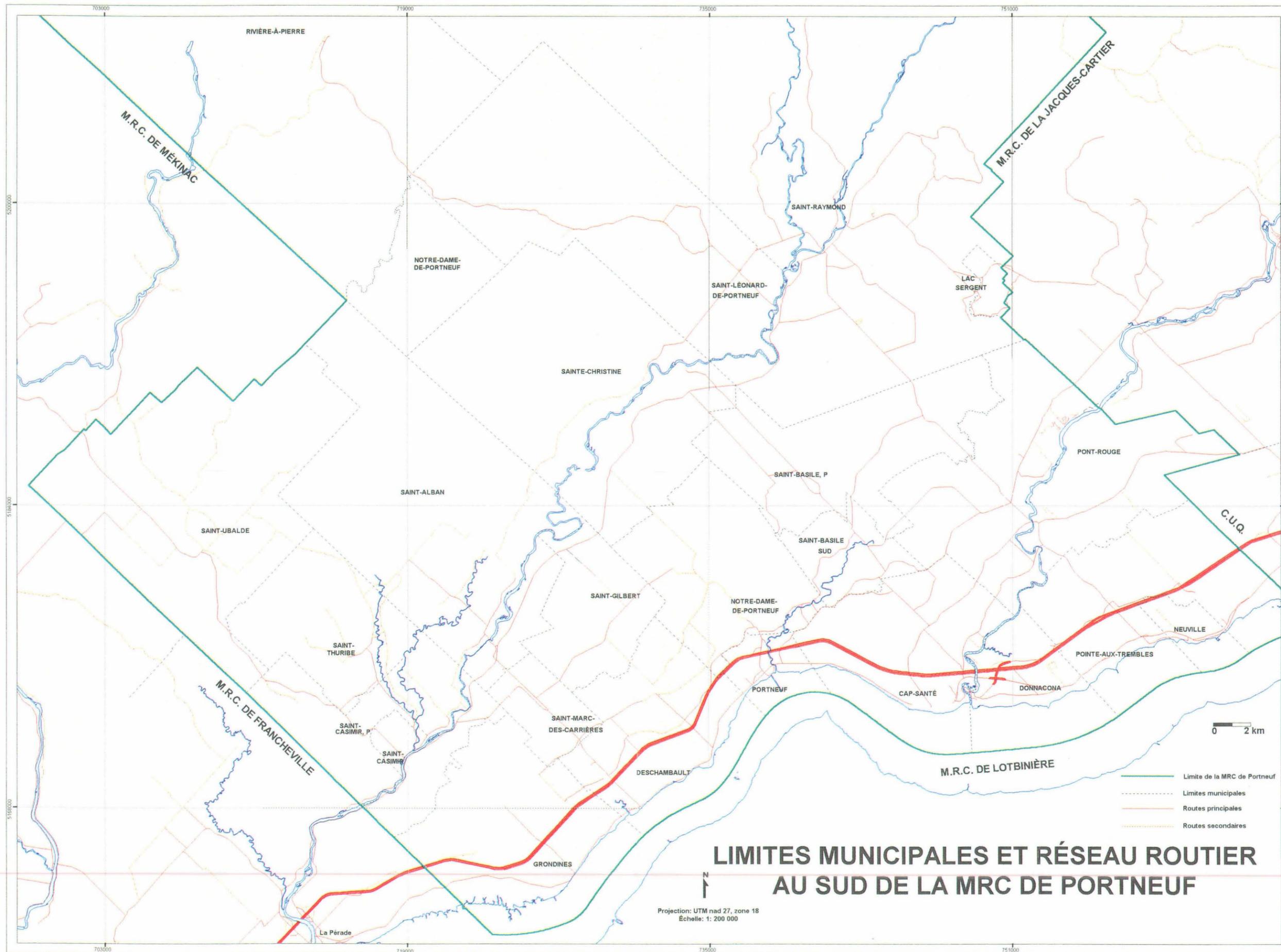
ANNEXE A

LIMITES MUNICIPALES ET RÉSEAU ROUTIER **AU SUD DE LA MRC DE PORTNEUF**

Sources des données :

Limites municipales : MRC de Portneuf

Réseaux routier et hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des
Sciences de la Terre)



LIMITES MUNICIPALES ET RÉSEAU ROUTIER AU SUD DE LA MRC DE PORTNEUF

Projection: UTM nad 27, zone 18
Echelle: 1: 200 000

- Limite de la MRC de Portneuf
- - - - - Limites municipales
- Routes principales
- Routes secondaires

ANNEXE B

RÉGIONS PHYSIOGRAPHIQUES ET PRINCIPAUX BASSINS HYDROLOGIQUES

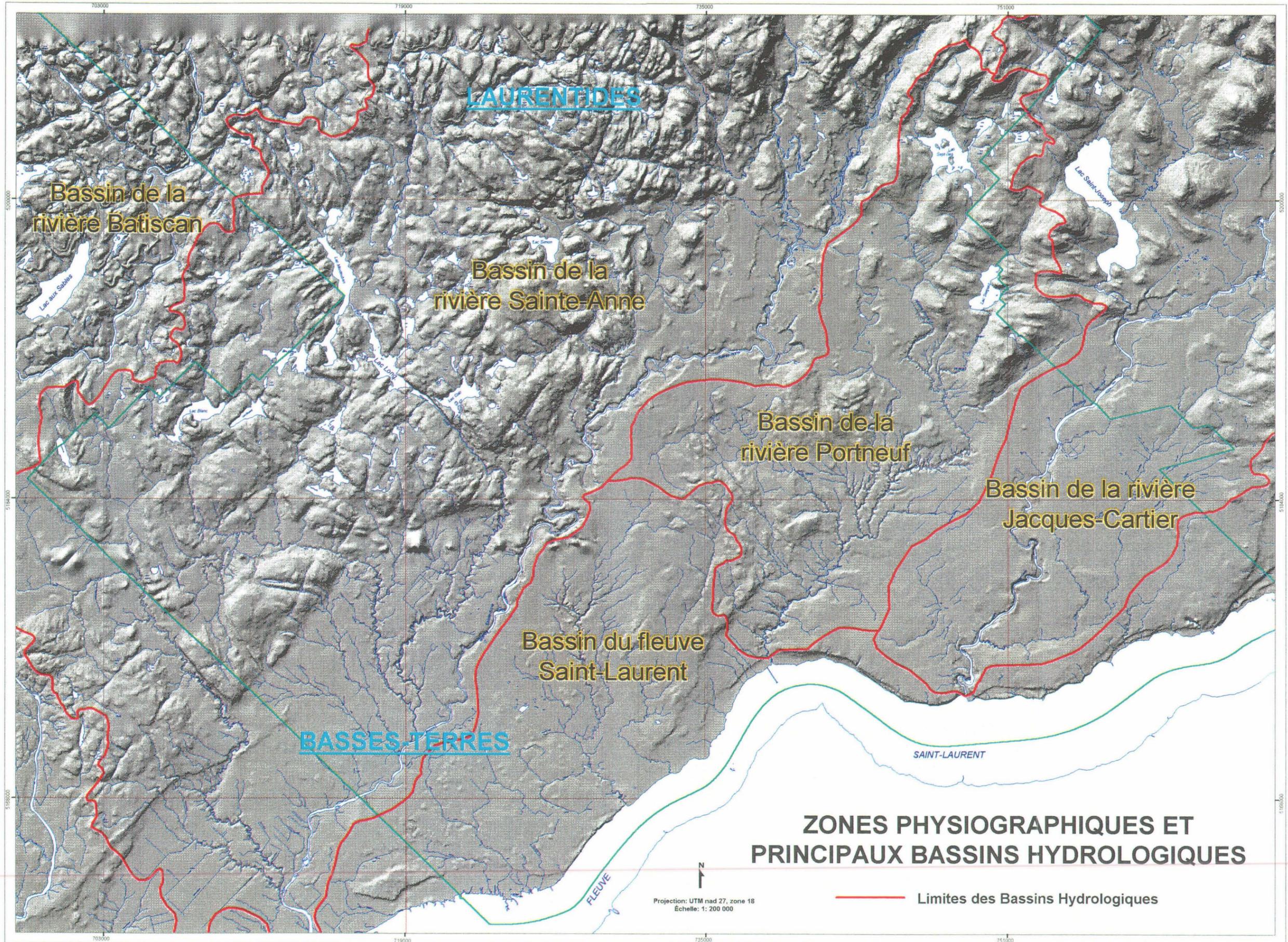
Sources des données :

Limites municipales : MRC de Portneuf

Réseaux routier et hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des
Sciences de la Terre)

Modèle numérique de terrain (MNT) : Commission géologique du
Canada

Bassins hydrologiques : MEF, direction du milieu aquatique



ZONES PHYSIOGRAPHIQUES ET PRINCIPAUX BASSINS HYDROLOGIQUES

— Limites des Bassins Hydrologiques

ANNEXE C

GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX

Sources des données :

Rapports géologiques du MRN : Clark et Globensky (1973, 1975)

Limites municipales : MRC de Portneuf

Réseaux routier et hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des
Sciences de la Terre)

Infographie :

Cusson (1996)

LÉGENDE

CONTACTS ET FAILLES

- Contact géologique observé
- - - Contact géologique présumé
- Faille normale observé
- - - Faille normale présumé

TRACES DE PLIS

- - - Anticlinal présumé
- - - Synclinal présumé

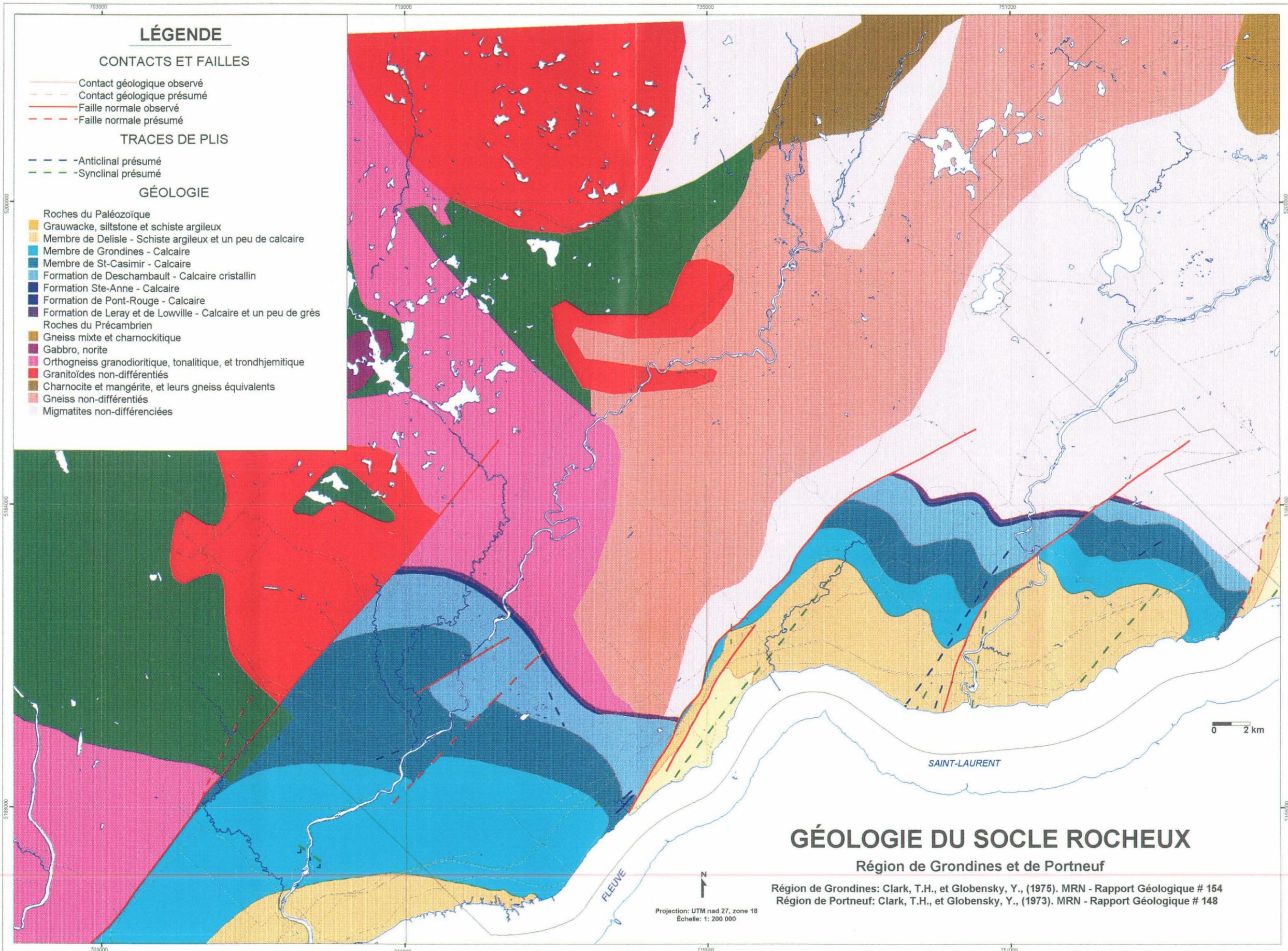
GÉOLOGIE

Roches du Paléozoïque

- Grauwacke, siltstone et schiste argileux
- Membre de Delisle - Schiste argileux et un peu de calcaire
- Membre de Grondines - Calcaire
- Membre de St-Casimir - Calcaire
- Formation de Deschambault - Calcaire cristallin
- Formation Ste-Anne - Calcaire
- Formation de Pont-Rouge - Calcaire
- Formation de Leray et de Lowville - Calcaire et un peu de grès

Roches du Précambrien

- Gneiss mixte et charnockitique
- Gabbro, norite
- Orthogneiss granodioritique, tonalitique, et trondhjemitique
- Granitoïdes non-différentiés
- Charnocite et mangérite, et leurs gneiss équivalents
- Gneiss non-différentiés
- Migmatites non-différenciées



ANNEXE D

GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Sources des données :

Géologie des formations superficielles : Cloutier *et al.*, (1997)

Limites municipales : MRC de Portneuf

Réseaux routier et hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des
Sciences de la Terre)

Infographie :

Ruth Boivin

LÉGENDE

QUATERNAIRE

ENVIRONNEMENTS CONTINENTAUX

SÉDIMENTS ORGANIQUES

 O Dépôts organiques

SÉDIMENTS ALLUVIAUX

 Ap Alluvions actuelles

 At Alluvions des terrasses fluviales

SÉDIMENTS DU LAC LAMPSILIS

 Ld Sédiments deltaïques

 Lb Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation

ENVIRONNEMENTS MARINS ET ESTUARIENS

SÉDIMENTS MARINS

 Md Sédiments deltaïques

 Mb Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation

 Mg Sédiments marins fins remaniés

 Ma Sédiments fins d'eau profonde

ENVIRONNEMENTS GLACIAIRE ET PROGLACIAIRE

SÉDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES

 Go Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien

 Gs Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique

 Gx Sédiments juxtaglacières

SÉDIMENTS GLACIAIRES

 GxT Sédiments de la moraine frontale de Saint-Narcisse

 Tr / TvR Till remanié

 T Till en couverture généralement continue

 Tv Till en couverture discontinue

WISCONSINIEN MOYEN ET INFÉRIEUR; Sangamonien; Illinoien

 Q Formations quaternaires non-différenciées

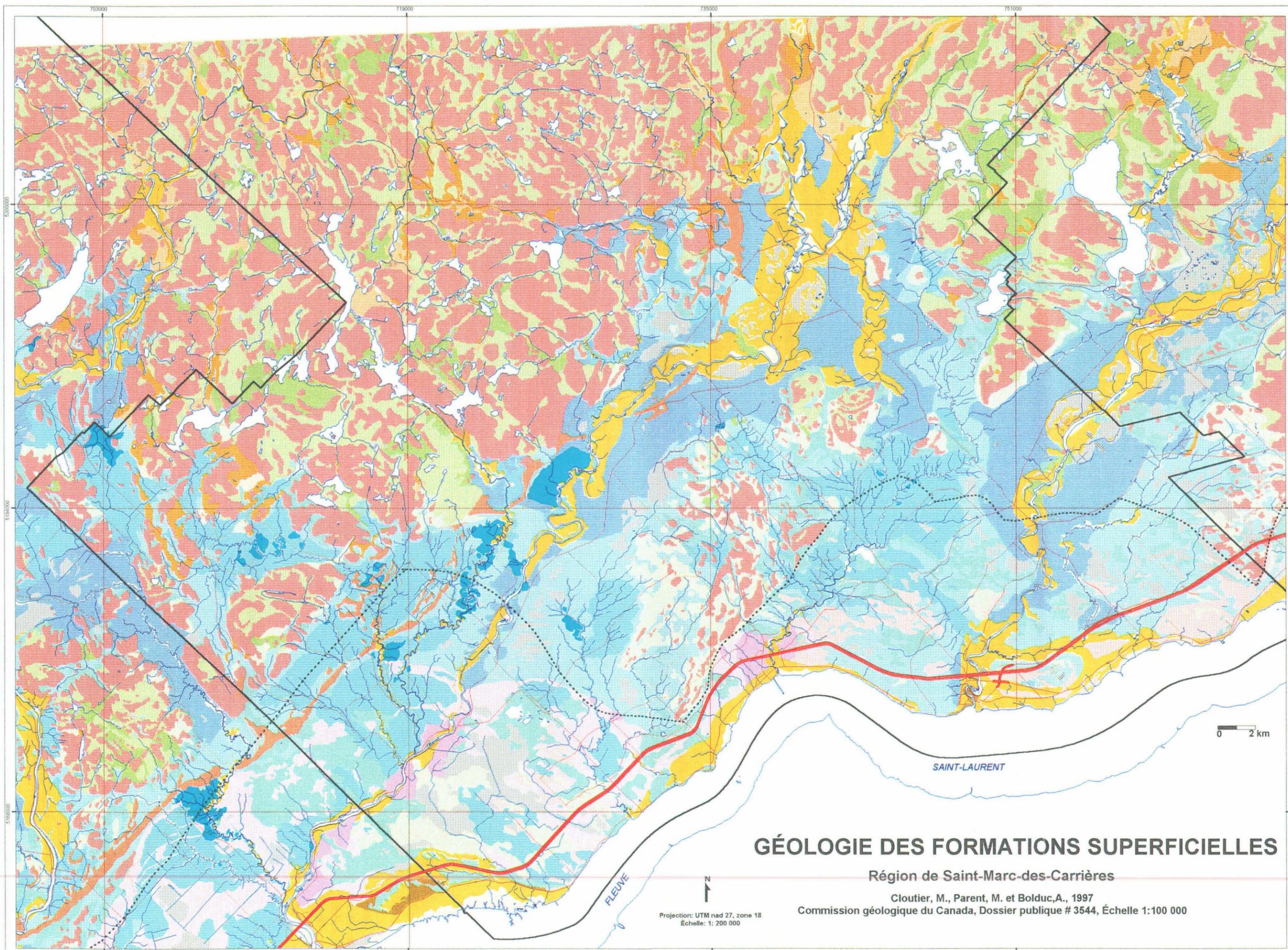
PRÉ-QUATERNAIRE

Substratum Rocheux

 R
Roches sédimentaires paléozoïques
Roches ignées et métamorphiques précambriennes

 La limite entre ces deux grandes unités géologiques est marquée sur la carte à l'aide d'un trait pointillé

.....



GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Région de Saint-Marc-des-Carières

Cloutier, M., Parent, M. et Bolduc, A., 1997

Commission géologique du Canada, Dossier public # 3544, Échelle 1:100 000

Projection: UTM nad 27, zone 18
Echelle: 1: 200 000

ANNEXE E

DONNÉES DE FORAGES DISPONIBLES DANS LA RÉGION D'ÉTUDE

Sources des bases de données :

- MEF : Système d'informations hydrogéologiques (SIH), études spécifiques
- Ministère des Ressources Naturelles
- Ministère des Transports du Québec
- Hydro-Québec

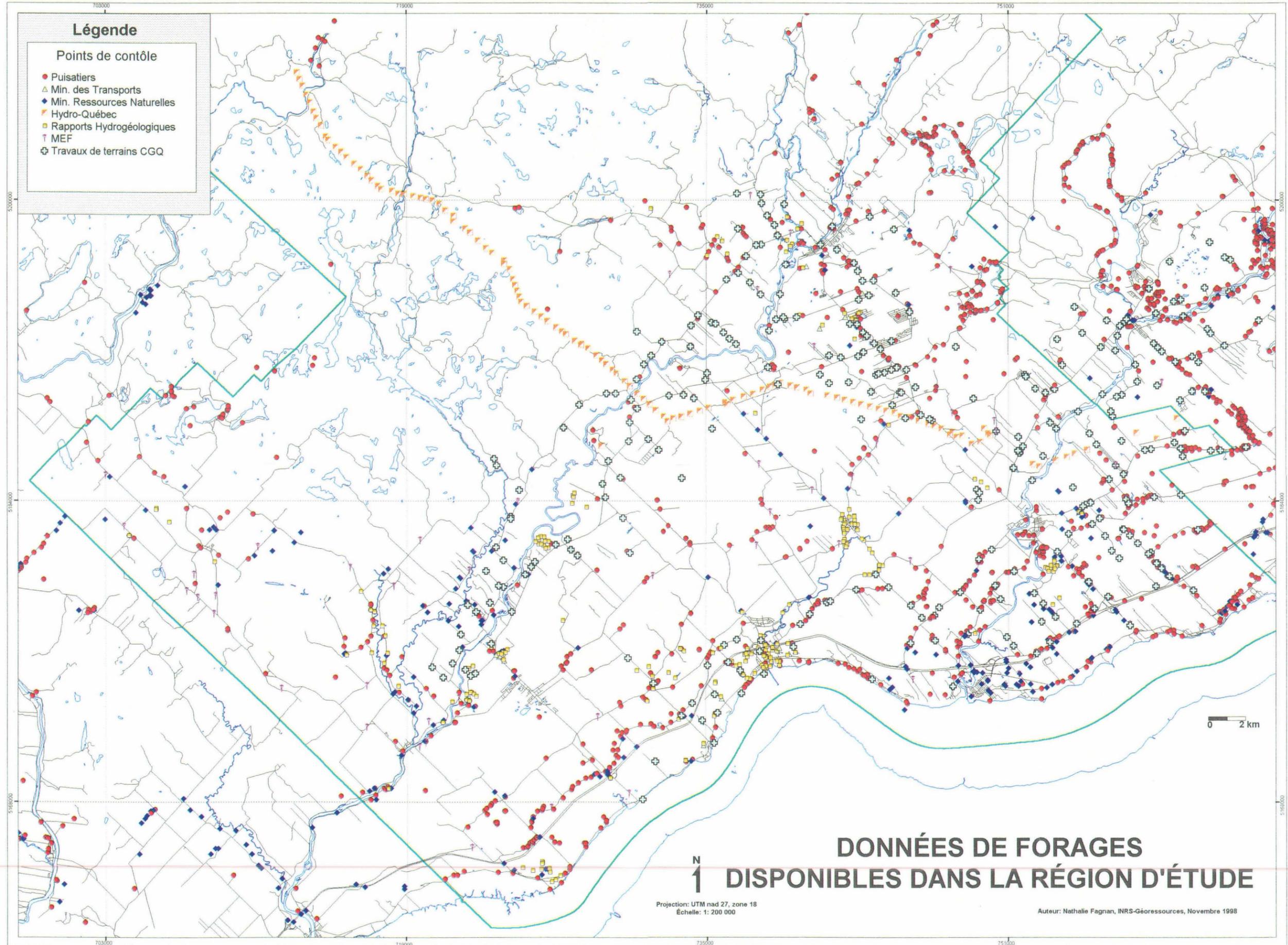
Sources des données :

Limites municipales : MRC de Portneuf

Réseaux routier et hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de la Terre)

Sources des travaux de terrain :

- Commission géologique du Canada



Projection: UTM nad 27, zone 18
Echelle: 1: 200 000

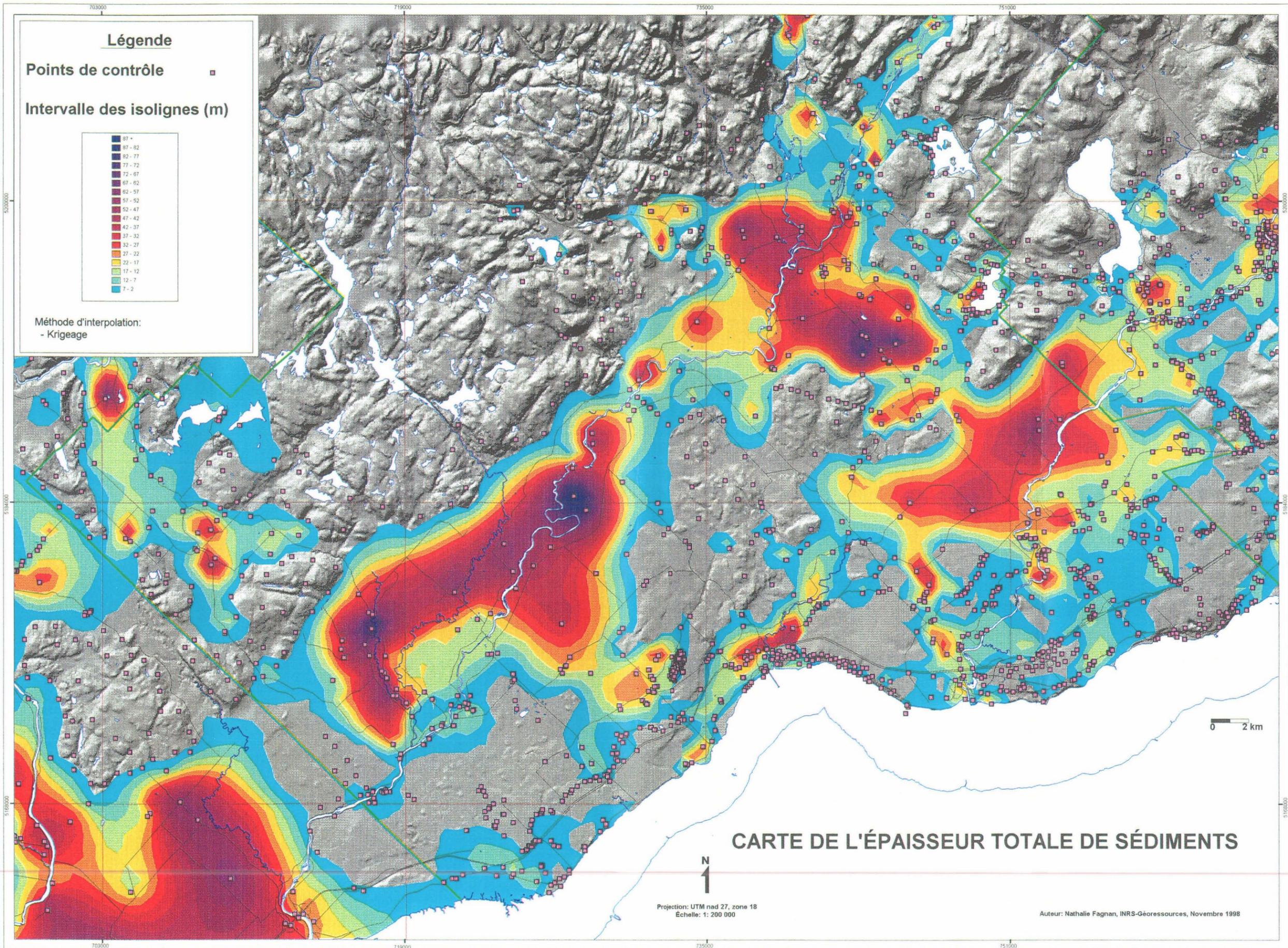
Auteur: Nathalie Fagnan, INRS-Géoresources, Novembre 1998

ANNEXE F

CARTE DE L'ÉPAISSEUR TOTALE DE SÉDIMENTS

Sources des données :

Réseaux routier et hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des
Sciences de la Terre)



ANNEXE G

CARTE DE L'ÉPAISSEUR DE SABLES ET GRAVIERS DE SURFACE

Sources des données :

Réseaux routier et hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des
Sciences de la Terre)

Légende

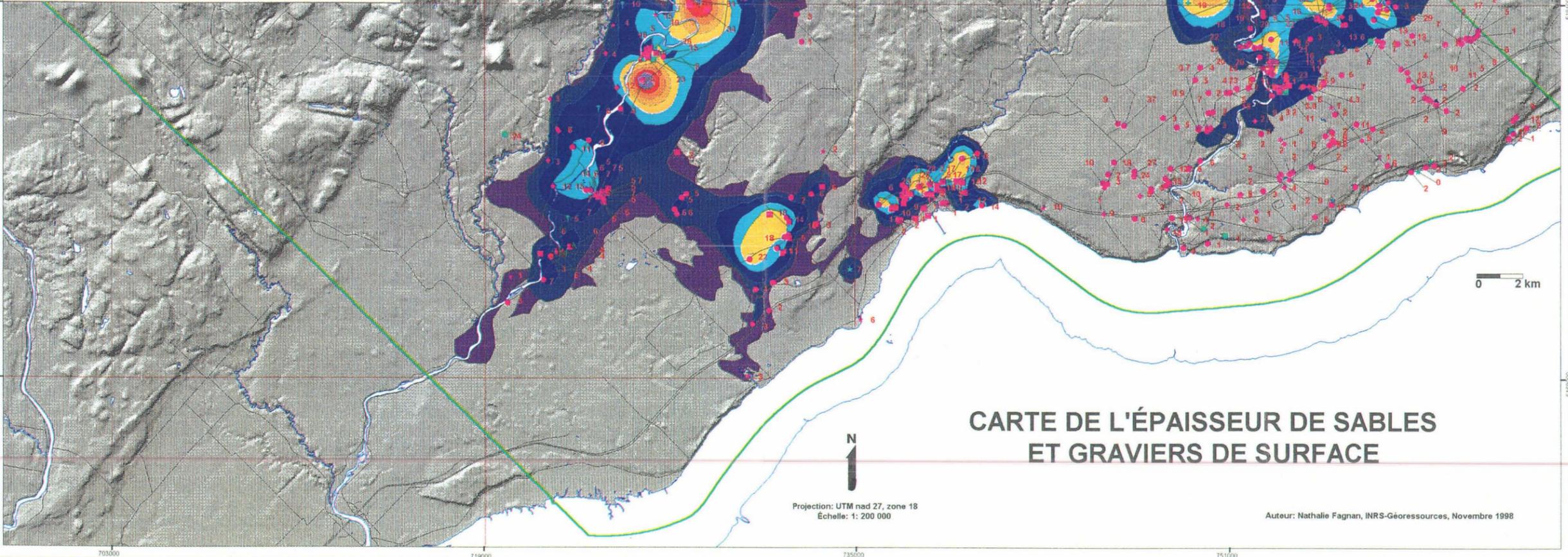
Données ponctuelles

	Épaisseur de sable minimale	Épaisseur de sable maximale
Puisatiers	●	●
Min. Ressources Naturelles	▲	▲
Min. des Transports	◆	◆
Info cartes Quaternaires	★	★
Hydro-Québec	◻	◻
Rapports Hydrogéologiques	■	■
MEF	†	†
Observations sur le terrain	+	+

Intervalle des isolignes (m)

60 +
55 - 60
50 - 55
45 - 50
40 - 45
35 - 40
30 - 35
25 - 30
20 - 25
15 - 20
10 - 15
5 - 10
2.5 - 5
0 - 2.5

Méthode d'interpolation:
- Krigeage



CARTE DE L'ÉPAISSEUR DE SABLES ET GRAVIERS DE SURFACE

Projection: UTM nad 27, zone 18
Échelle: 1: 200 000

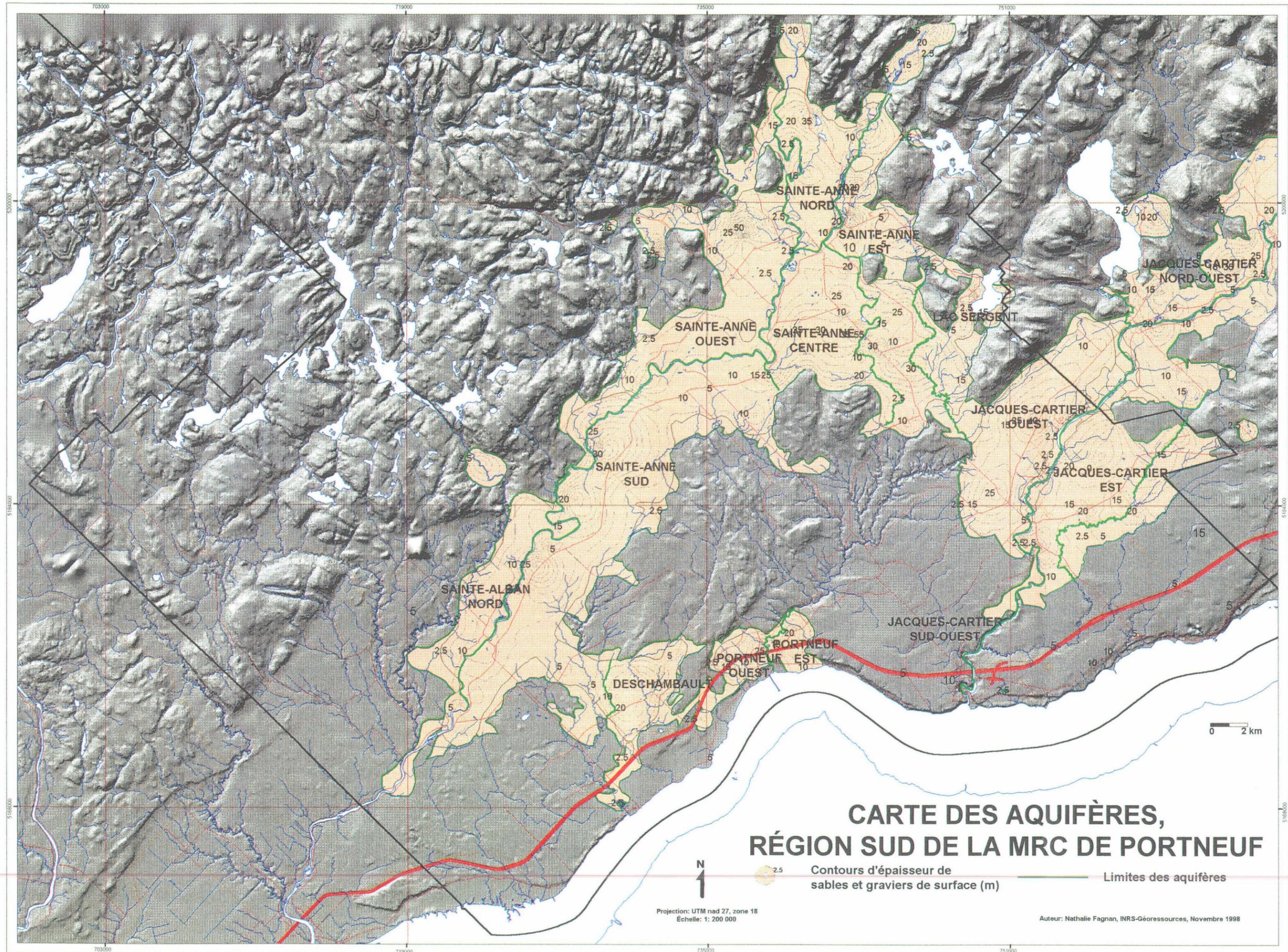
Auteur: Nathalie Fagnan, INRS-Géoresources, Novembre 1998

ANNEXE H

CARTE DES AQUIFÈRES, RÉGION SUD DE LA MRC DE PORTNEUF

Sources des données :

Réseaux routier et hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des
Sciences de la Terre)



CARTE DES AQUIFÈRES, RÉGION SUD DE LA MRC DE PORTNEUF

2.5 Contours d'épaisseur de sables et graviers de surface (m)
 Limites des aquifères

Projection: UTM nad 27, zone 18
 Echelle: 1: 200 000

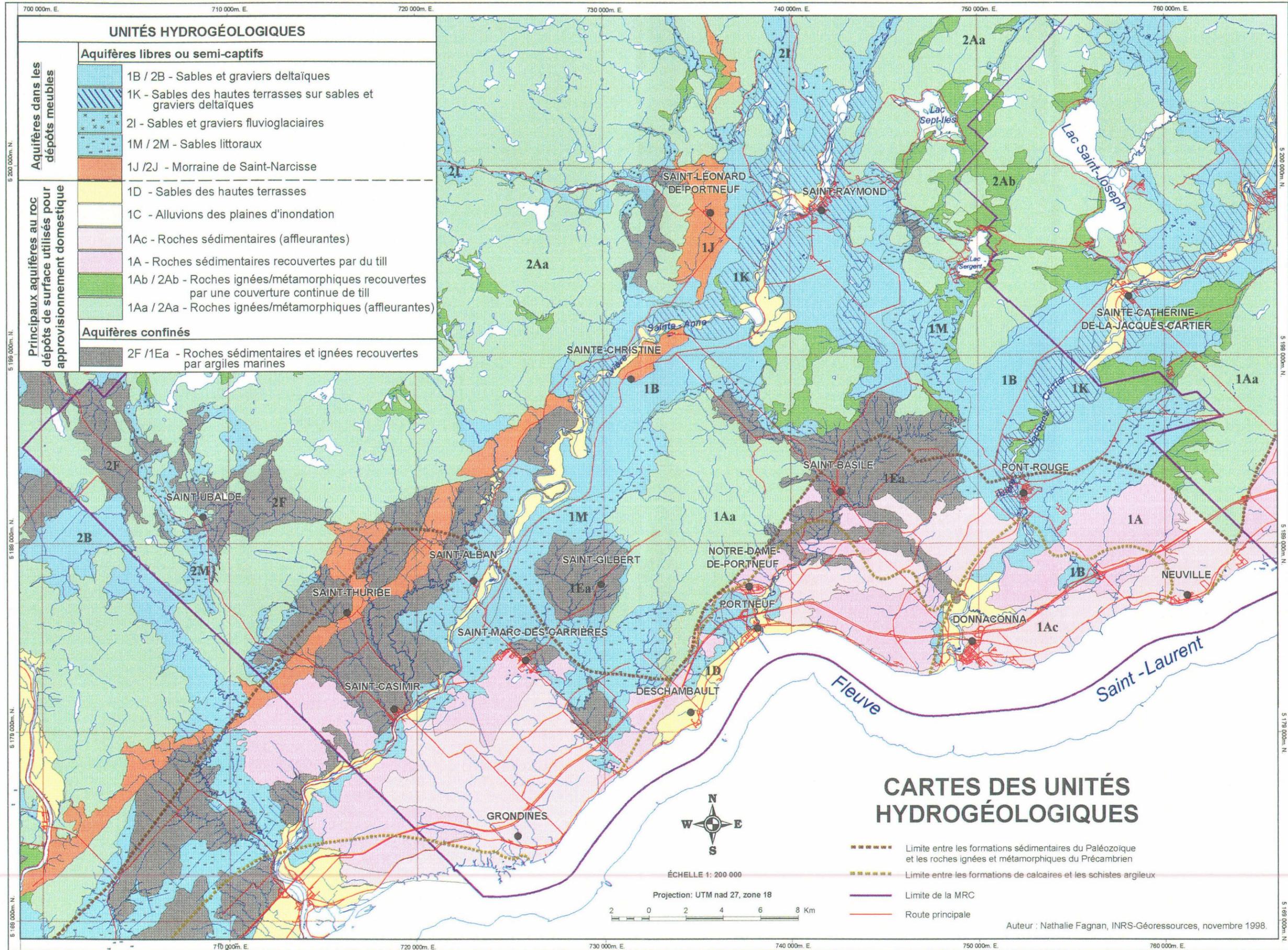
Auteur: Nathalie Fagnan, INRS-Géoressources, Novembre 1998

ANNEXE I

UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES

Sources des données :

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de la Terre)



UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES

Aquifères dans les dépôts meubles	
	1B / 2B - Sables et graviers deltaïques
	1K - Sables des hautes terrasses sur sables et graviers deltaïques
	2I - Sables et graviers fluvioglaciers
	1M / 2M - Sables littoraux
	1J / 2J - Moraine de Saint-Narcisse

Principaux aquifères au roc de surface utilisés pour approvisionnement domestique	
	1D - Sables des hautes terrasses
	1C - Alluvions des plaines d'inondation
	1Ac - Roches sédimentaires (affleurantes)
	1A - Roches sédimentaires recouvertes par du till
	1Ab / 2Ab - Roches ignées/métamorphiques recouvertes par une couverture continue de till
	1Aa / 2Aa - Roches ignées/métamorphiques (affleurantes)

Aquifères confinés	
	2F / 1Ea - Roches sédimentaires et ignées recouvertes par argiles marines

CARTES DES UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES

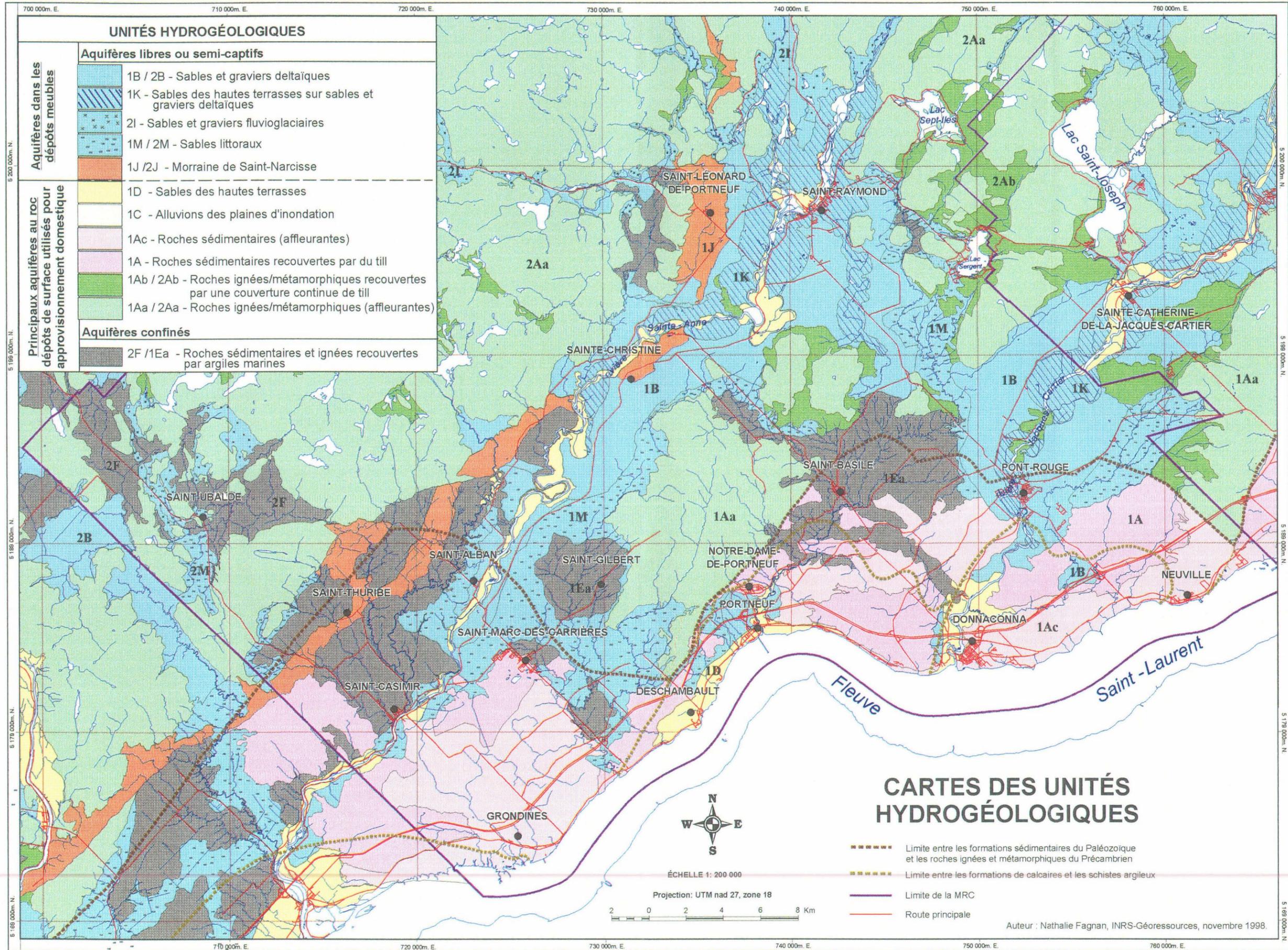
- Limite entre les formations sédimentaires du Paléozoïque et les roches ignées et métamorphiques du Précambrien
- Limite entre les formations de calcaires et les schistes argileux
- Limite de la MRC
- Route principale

Auteur : Nathalie Fagnan, INRS-Géoressources, novembre 1998.



ÉCHELLE 1: 200 000

Projection: UTM nad 27, zone 18



ANNEXE J

BLOCS DIAGRAMMES

LÉGENDE



matériaux organiques



**Sables et silts
(alluvions)**



**Sables et graviers
(Alluvions des hautes-terrasses)**



Sables et graviers



**Silts et argiles de la
Mer de Champlain**



**Mélange de sables, graviers,
blocs, silts et argiles (Moraine)**



Till



Roches sédimentaires

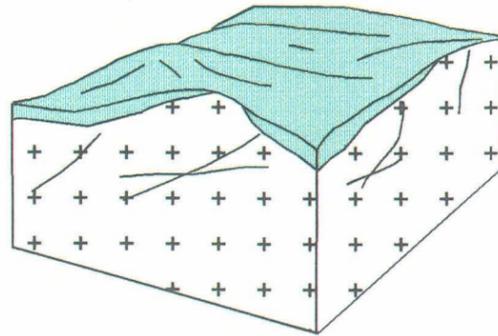


Roches ignées et métamorphiques

Aquifères libres ou semi-captifs

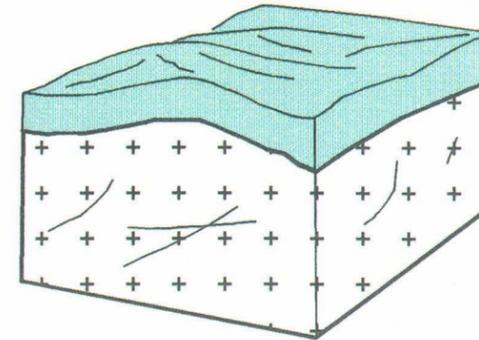
Région des Basses-Terres

Till sur roches ignées/métamorphiques 1Aa



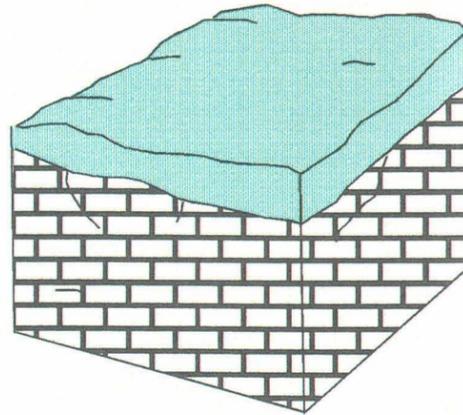
Cette unité hydrogéologique est caractérisée par la présence d'une couche de till recouvrant de façon discontinue les roches ignées et métamorphiques. Le relief est variable allant d'ondulé à fortement ondulé avec en quelques endroits une topographie montueuse. Le till fait à peine un mètre d'épaisseur et laisse apparaître le roc en plusieurs endroits. Il contient de nombreux blocs et cailloux incorporés à une matrice composée d'un mélange variable de graviers, sables, silts et argiles. L'eau souterraine circule dans le roc et le till, mais l'aquifère principal est représenté par le roc. Les débits disponibles sont souvent limités et dépendent essentiellement du degré de fracturation de la roche. Les dépôts de till, là où l'épaisseur est suffisante, peuvent servir à emmagasiner les eaux de précipitations et ainsi contribuer à la recharge du massif rocheux. Cependant, le rocher, souvent affleurant et peu perméable (peu fracturé) et le relief qui en certains endroits est accentué favorisent le ruissellement. La profondeur de l'eau varie considérablement et est liée, entre autres, à l'épaisseur de la couche de till. L'eau souterraine peut faire résurgence au creux des vallées ou dans les dépressions du terrain. Les nombreux affleurements rocheux rendent la formation aquifère vulnérable à la contamination. (Tiré de Champagne, 1990).

Till en couverture continue sur roches ignées/métamorphiques 1Ab



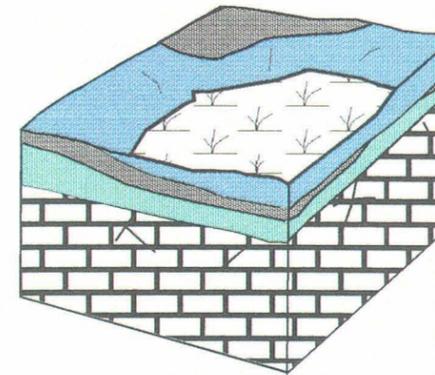
Cette unité hydrogéologique est caractérisée par la présence d'une couche de till pouvant faire plusieurs mètres d'épaisseur couvrant les roches ignées et métamorphiques. Le relief est plat à ondulé. Les dépôts de till se retrouvent principalement dans les creux des vallées ou à la base des crêtes rocheuses rencontrées ici et là à l'intérieur des Basses-Terres. Les dépôts de till contiennent de nombreux blocs incorporés à une matrice sablo-graveleuse. L'épaisseur de till, généralement importante, peut toutefois varier et à certains endroits le roc peut être exposé. L'eau circule dans le roc et le till, mais l'aquifère principalement utilisé est le socle rocheux. Les débits disponibles sont souvent limités et dépendent essentiellement du degré de fracturation de la roche. Les dépôts de till, lorsque l'épaisseur est suffisante, peuvent servir à approvisionner des puits domestiques ainsi qu'à emmagasiner les précipitations ce qui peut grandement contribuer à la recharge du massif rocheux. La profondeur de l'eau varie tout dépendant de l'épaisseur de till et de sa perméabilité, mais elle se situe généralement à moins de 5 mètres de profondeur de la surface. L'eau souterraine peut faire résurgence au creux des vallées ou dans les dépressions du terrain. (Modifié de Champagne, 1990).

Till sur roches sédimentaires 1A



Cette unité hydrogéologique est caractérisée par la présence d'une couverture de sables, d'argiles mais surtout de till reposant directement sur le roc. Les dépôts de till forment souvent des basses collines qui brisent la monotonie de la plaine. Le roc est composé de roches sédimentaires (calcaires et schistes argileux) à pendage sub-horizontale. Le till est d'épaisseur très variable (0-15 mètres) mais il atteint généralement au plus 3 à 5 mètres. Il est composé de nombreux blocs et cailloux noyés dans une matrice plutôt silto-argileuse. La roche en place constitue l'aquifère principal; l'eau y circule à travers un réseau, plus ou moins bien développé, de fractures, de fissures et de cavités...L'unité sableuse, lorsque présente, peut être exploitée pour alimenter des puits domestiques. Cependant, sa faible épaisseur et son étendue généralement restreinte la rendent inapte à fournir les débits importants que requièrent les systèmes de captages municipaux. Les affleurements de till emmagasinent les eaux de précipitation et contribuent à la recharge de l'aquifère rocheux sous-jacent bien que le sol, loameux ou argileux, limite l'infiltration. La profondeur de l'eau est très variable et dépend, entre autres, de l'épaisseur du till, mais elle se situe généralement entre 0,5 et 2,5 m sous la surface. (Modifié de Champagne, 1990).

Rampes Rocheuses 1Ac

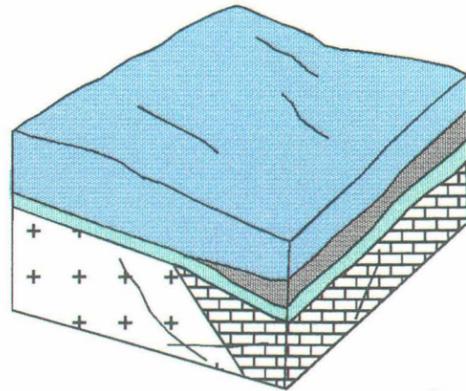


Les rampes rocheuses sont caractérisées par une faible épaisseur (<3 m) de sédiments quaternaires d'origines variés reposant sur les roches sédimentaires. Les dépôts quaternaires que l'on retrouve sont principalement des tills mais peuvent aussi être des alluvions, des sables littoraux, des silts et argiles marins, des dépôts de matières organiques ainsi que des sédiments pré-glaciaires. La roche sous-jacente affleure en de nombreux endroits, parfois sur de très grandes superficies, et témoigne de la faible épaisseur de l'ensemble des dépôts qui la couvrent. Les calcaires et les schistes argileux constituent les principales formations aquifères exploitées. Malgré que la majeure partie des dépôts quaternaires qui couvrent les roches sédimentaires sont pour la plupart de nature imperméable, leur faible épaisseur et leur caractère discontinu font que la condition de la nappe dans les roches sédimentaires n'est pas captive. Les secteurs où l'on retrouve les sables littoraux et alluvionnaires sont plus propices à l'emmagasinement des eaux de précipitations et par le fait même contribuent à augmenter le potentiel de recharge du socle rocheux. Par contre, dans les secteurs où ces dépôts sableux sont absents, le ruissellement est favorisé. Les profondeurs de la nappe sont généralement faibles et ce surtout dans les secteurs mal drainés (dépôts organiques et argile) ou aux endroits où le roc affleure. La proximité de la nappe, les sols faiblement développés et les nombreux affleurements rocheux rendent l'aquifère rocheux vulnérable à la contamination.

Aquifères libres ou semi-captifs

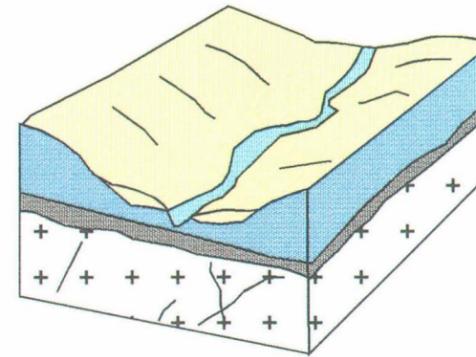
Région des Basses-Terres

Sables et graviers deltaïques 1B



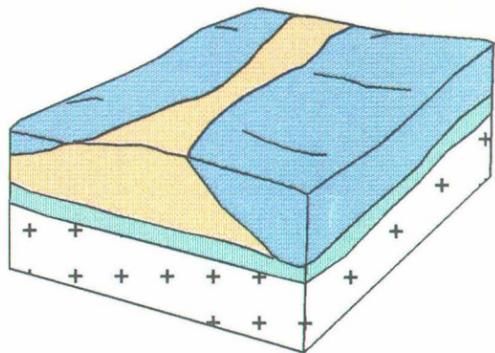
Cette unité hydrogéologique est caractérisée par des dépôts de sables et graviers stratifiés reposant sur l'argile marine, le till ou le socle rocheux qui est composé soit des roches ignées et métamorphiques ou des roches sédimentaires. Le relief est peu accentué, plat ou ondulé. Les sables et graviers deltaïques forment des formations très perméables pouvant faire plusieurs mètres d'épaisseur (1-40 m) s'étalant sur de grandes superficies et par conséquent constituent des formations aquifères très productives pouvant servir à l'alimentation de réseaux d'aqueducs municipaux. Par contre, localement, et ce surtout en bordure et en aval de ces unités, l'épaisseur des sables et graviers peut être que de quelques mètres (2-3 m). Le lecteur est donc invité à consulter la carte d'épaisseur de sable qui est fournie avec les autres documents pour mieux apprécier les variations dans l'amplitude de cette unité. Les sables deltaïques se situent principalement sur des hauts topographiques et constituent donc les principales zones de recharge. La nature sablonneuse des sols ainsi que le faible relief permettent une bonne réalimentation. Les matériaux perméables du sol et de l'aquifère offrent cependant peu de protection contre l'infiltration des contaminants et par conséquent la vulnérabilité à la contamination est très élevée dans ces matériaux. Les sables et graviers emmagasinent les eaux des précipitations et contribuent donc aussi à la recharge des formations aquifères sous-jacentes. Cependant, la présence de l'argile marine en profondeur peut grandement limiter les taux d'infiltration au roc. Le niveau de la nappe phréatique dans les sables et graviers est très variable pouvant aller de quelques mètres à plus de 15 mètres de profondeur. Les régions où la nappe est près de la surface sont caractérisées par de faibles épaisseurs de sables et graviers et par la remontée d'un substratum imperméable (till ou roc). En contraste, les secteurs où la nappe se situe à de très grandes profondeurs (>10 m) sont généralement indicateurs de la présence d'une couche épaisse de sables et graviers. (Modifié de Champagne, 1990).

Sables des hautes terrasses sur sables et graviers deltaïques 1J



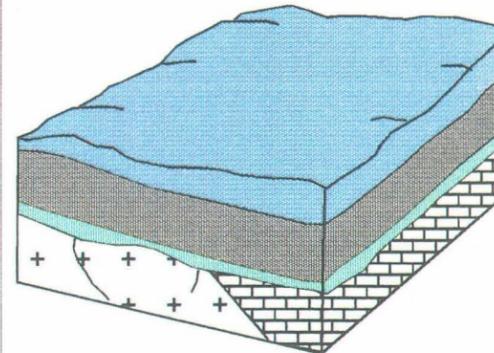
Cette unité hydrogéologique est caractérisée par la présence de dépôts alluviaux recouvrant les dépôts deltaïques. Elle se retrouve exclusivement à l'intérieur des vallées des Basses-Terres et par conséquent elle occupe les zones où une composante importante de l'écoulement des eaux souterraines se fait vers la surface (résurgence). Cette unité hydrogéologique est marquée par des séries de terrasses et de chenaux abandonnés le long desquels il est fréquent de trouver de nombreuses sources. L'eau de ces sources provient de l'unité hydrogéologique "Sables deltaïques (1B)" qui la borde de part et d'autre. L'épaisseur de la couverture alluvionnaire ne dépasse généralement pas 2 mètres et en certains endroits elle peut ne faire que quelques centimètres de sorte qu'elle constitue à toute fin pratique une surface d'érosion. Étant donné la faible amplitude de la couche alluviale, l'aquifère qui est réellement exploité est celui contenu dans les sables et graviers deltaïques. L'épaisseur moyenne de la formation deltaïque comprise dans cette unité hydrogéologique est de 5 mètres. L'argile marine est la formation géologique qui forme dans la plupart des cas la base de l'unité de sables et graviers quoiqu'il en soit, par endroits, le till ou le socle rocheux peuvent aussi constituer cette base. Les sables et graviers deltaïques constituent une formation aquifère très productive qui peut alimenter des réseaux d'aqueducs municipaux. La plupart des résidents qui ne sont pas desservis par des réseaux municipaux obtiennent leur eau potable à partir de puits de surface ou de puits instantanés (pointes) aménagés dans les sables et graviers deltaïques. La profondeur à la nappe dépend en grande partie de l'épaisseur des dépôts et de la proximité par rapport au cours d'eau mais en général elle varie de 0 à 3 m. La présence de zones marécageuses et de dépôts de matières organiques témoignent du voisinage de la nappe. La proximité de la nappe contribue à augmenter la vulnérabilité de l'eau souterraine. Par contre la présence de sols organiques (Terre noire) diminue le potentiel de contamination des eaux souterraines.

Moraine de Saint-Narcisse 1J



Cette unité hydrogéologique est caractérisée par un terrain faiblement ondulé formé des dépôts de la moraine de Saint-Narcisse qui sont en partie enfouis soit sous les silts et argiles marins ou directement sous les sables deltaïques. Son épaisseur varie entre 1 et 20 mètres mais peut atteindre jusqu'à 40 mètres en certains endroits. Localement, à l'intérieur de la moraine, on peut trouver des zones de sables et graviers bien triés qui peuvent servir d'aquifère. Ces unités perméables lorsqu'elles sont exposées à la surface peuvent aussi servir de zones de recharge pour la moraine ainsi que pour les formations rocheuses sous-jacentes. Elles offrent cependant peu de protection contre l'infiltration des contaminants. Les zones qui sont recouvertes par les argiles et silts marins sont mieux protégées de la contamination que celles où affleurent la crête morainique. Le complexe morainique contient aussi des sédiments fins ou mal triés ce qui diminue son potentiel aquifère global ainsi que la quantité de recharge permise dans ces secteurs. Les profondeurs à la nappe sont variables tout dépendant de l'épaisseur de la moraine ainsi que de la perméabilité des dépôts mais se trouve en général entre 0 et 3 mètres sous la surface. Aussi, la présence d'une prise d'eau municipale dans cette unité ainsi que le captage de

Sables littoraux 1M



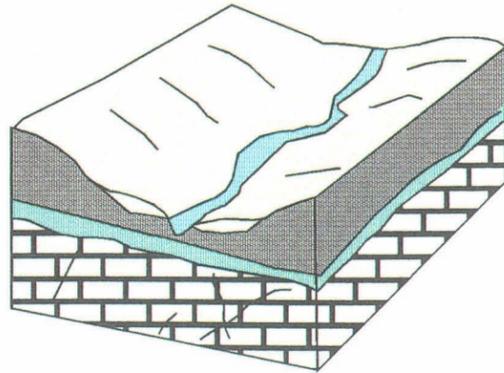
Cette unité hydrogéologique est caractérisée par des dépôts de sables reposant sur l'argile marine, le till ou le socle rocheux qui peut être de nature ignée ou sédimentaire. Le relief est peu accentué, plat ou ondulé. Les sables littoraux sont des formations très perméables d'épaisseur plutôt modérée (1-8 m). Les sables littoraux s'étendent sur de grandes superficies qui peuvent occuper, alternativement, des zones de recharge et d'émergence. Lorsque l'épaisseur de sable est importante, ces dépôts peuvent constituer des formations aquifères très productives. Par contre, la couverture de sable que forme ces dépôts est souvent très mince (2-3 m) ce qui fait que les principaux ouvrages de captage qui y sont aménagés sont des puits à usage domestique. Pour connaître la variation d'épaisseur dans cette unité hydrogéologique le lecteur est invité à consulter la carte d'épaisseur de sable qui est fournie avec les autres documents. La nature généralement sablonneuse des sols ainsi que le faible relief permettent une bonne réalimentation de ces formations aquifères. Les matériaux perméables du sol et de l'aquifère offrent cependant peu de protection contre l'infiltration des contaminants et par conséquent la vulnérabilité à la contamination est très élevée dans ces matériaux. Les sables littoraux emmagasinent les eaux des précipitations et contribuent donc aussi à la recharge des formations aquifères sous-jacentes. Cependant, la présence de l'argile marine en profondeur peut grandement limiter les taux d'infiltration au roc. Le niveau de la nappe phréatique dans les sables littoraux est généralement

Aquifères libres ou semi-captifs

Région des Basses-Terres

Alluvions de plaines d'inondation

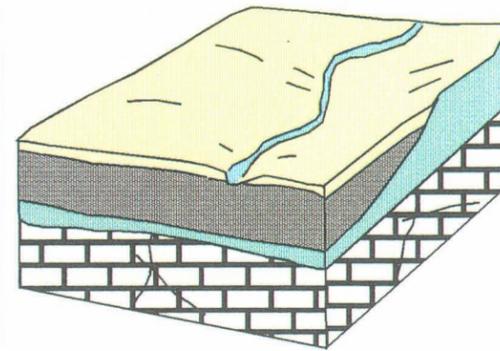
1C



Cette unité hydrogéologique est caractérisée par une topographie formée de dépressions et de berges parfois escarpées, résultants de l'action des cours d'eau. Les sables alluviaux bordent les cours d'eau (alluvions de plaines d'inondation) et atteignent au maximum quelques mètres d'épaisseur; ils reposent sur les argiles marines. Ces sables sont plutôt fins et contiennent du silt, de l'argile ainsi que de la matière organique ce qui en fait des formations aquifères peu productives, même dans le cas où il y a un lien hydraulique direct avec les cours d'eau avoisinant. La nappe phréatique se retrouve généralement proche de la surface. La nature silteuse du sol favorisent par contre le ruissellement. (Tiré de Champagne, 1990).

Sables de Hautes-Terrasses

1D



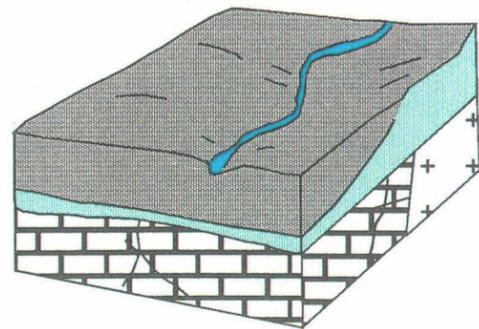
Cette unité hydrogéologique est caractérisée par des étendues de sédiments de hautes terrasses reposant sur les argiles marines. Ces dépôts comprennent des sables à stratifications subhorizontales. L'épaisseur de la couverture alluviale n'excède généralement pas 2 mètres et fait en moyenne de 0 à 1 mètre. Le terrain est plat avec micro-reliefs en certains endroits. La topographie peu accentuée ne favorise pas le drainage et en certaines période de l'année (printemps, automne), la nappe phréatique peut se retrouver à moins de 60 cm de la surface du sol. Le mauvais drainage limite la réalimentation malgré la nature sablonneuse des sols. Les aquifères sablonneux de surface sont utilisés localement comme source d'approvisionnement en eau mais, en général, la faible épaisseur des dépôts limite les quantités d'eau disponibles; ce sont les formations rocheuses sédimentaires sous-jacentes à l'argile et au till qui constituent l'aquifère principal. (Modifié de Champagne, 1990).

Aquifères captifs

Région des Basses-Terres

Roches Sédimentaires et ignées recouvertes par argiles marines

1Ea



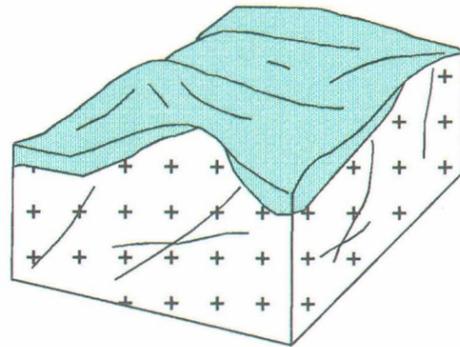
Cette unité hydrogéologique est caractérisée par de très grandes étendues de sédiments argileux qui recouvrent till et roc et, possiblement, des sables et graviers fluvioglaciers. L'argile peut-être surmontée, en certains endroits, d'une mince couche de sables. La surface est très plane sauf aux abords des cours d'eau où le relief est formé de dépressions et de berges parfois escarpées. On retrouve aussi de nombreuses petites zones de sédiments fins qui ont été remaniés par des glissements de terrain. Le till et les dépôts fluvioglaciers, lorsque présents, peuvent servir à l'approvisionnement en eau, mais ce sont les formations rocheuses sédimentaires et ignées qui représentent l'aquifère principal. Ces formations sont essentiellement composées de calcaires, de schiste argileux et des roches ignées et métamorphiques. La limite entre les formations sédimentaires et ignées est représentée sur la carte des unités hydrogéologiques. La perméabilité des roches est variable et est liée à l'existence de réseau de fractures, de zones d'altération et/ou de cavités de dissolution dans le cas des formations calcareuses. La présence d'un horizon argileux limite l'infiltration directe des eaux de précipitation et des contaminants jusqu'au roc. L'épaisseur de l'argile varie entre 2 mètres aux abords des tills à plus de 70 mètres dans certains secteurs des bassins argileux. La plaine argileuse laisse cependant émerger plusieurs basses collines de till où il y a réalimentation des aquifères rocheux. Aussi, en quelques endroits, les rivières ont troué la couche d'argile pour s'encaisser jusqu'au roc; les affleurements rocheux au fond des rivières constituent généralement des zones de décharge mais, en période de crue, les rivières peuvent aussi contribuer à la réalimentation de l'aquifère. (Modifié de Champagne (1990).

Aquifères libres ou semi-captifs

Région des Laurentides

Till sur roches ignées/métamorphiques

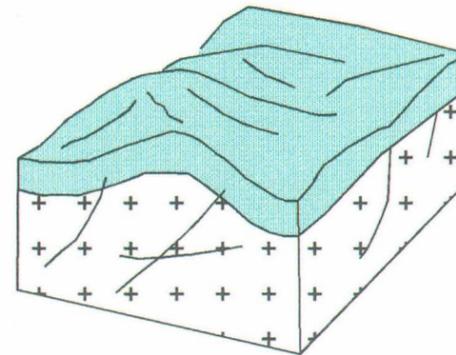
2Aa



Cette unité hydrogéologique est caractérisée par la présence d'une couche de till recouvrant de façon discontinue les roches ignées et métamorphiques. Le relief est variable passant de fortement ondulé à montueux. Le till fait à peine un mètre d'épaisseur et laisse apparaître le roc en plusieurs endroits. Il contient de nombreux blocs et cailloux incorporés à une matrice composée d'un mélange variable de graviers, sables, silts et argiles. L'eau souterraine circule dans le roc et le till, mais l'aquifère principal est représenté par le roc. Les débits disponibles sont souvent limités et dépendent essentiellement du degré de fracturation de la roche. Les dépôts de till, là où l'épaisseur est suffisante, peuvent servir à emmagasiner les eaux de précipitations et ainsi contribuer à la recharge du massif rocheux. Cependant, le rocher, souvent affleurant et imperméable (peu fracturé) et le relief accentué favorisent le ruissellement. La profondeur de l'eau varie considérablement et est liée, entre autres, à l'épaisseur de la couche de till. L'eau souterraine peut faire résurgence au creux des vallées ou dans les dépressions du terrain. Les nombreux affleurements rocheux rendent la formation aquifère vulnérable à la contamination. (Tiré de Champagne, 1990).

Till en couverture continue sur roches ignées/métamorphiques

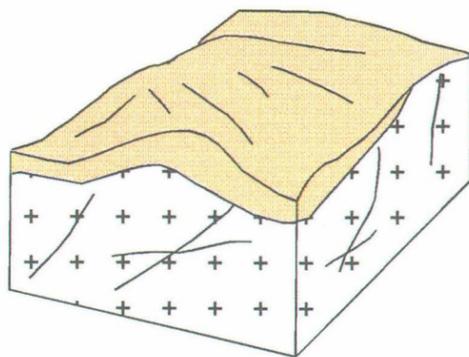
2Ab



Cette unité hydrogéologique est caractérisée par la présence d'une couche de till pouvant faire plusieurs mètres d'épaisseur couvrant les roches ignées et métamorphiques. Le relief est fortement ondulé à vallonné. Les dépôts de till se retrouvent principalement dans les creux des vallées ou des dépressions topographiques des Laurentides. Les dépôts de till contiennent de nombreux blocs incorporés à une matrice sablo-graveleuse. L'épaisseur de till, généralement importante, peut toutefois varier et à certains endroits le roc peu parfois être exposé. L'eau circule dans le roc et le till, mais l'aquifère principal est le socle rocheux. Les débits disponibles sont souvent limités et dépendent essentiellement du degré de fracturation de la roche. Les dépôts de till, lorsque l'épaisseur est suffisante, peuvent servir à approvisionner des puits domestiques ainsi qu'à emmagasiner les précipitations ce qui peut contribuer à augmenter la quantité de recharge dans le massif rocheux. La profondeur de l'eau varie tout dépendant de l'épaisseur de till et de sa perméabilité, mais elle se situe généralement à moins de 5 mètres de profondeur de la surface. L'eau souterraine peut faire résurgence au

Moraine de Saint-Narcisse

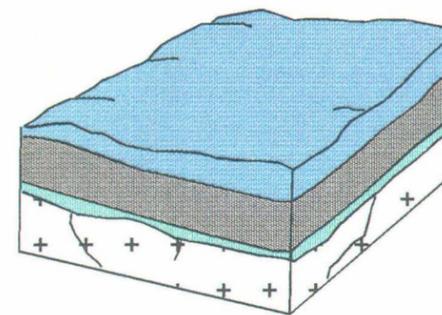
2J



La moraine de Saint-Narcisse, dans la région des Laurentides, est une crête faisant 500 m à 1 km de largeur et de 20 à 40 m d'épaisseur orientée selon un axe Nord-Sud. Cette moraine est formée de plusieurs types de dépôts, soit de tills, de silts et de sédiments juxtaglaciaires comprenant des sables, des graviers et des blocs. Elle repose sur le till ou le roc qui est constitué des roches ignées et métamorphiques. Contrairement à l'unité hydrogéologique 1J où il est commun de retrouver la Moraine recouverte par des sédiments marins, les segments de la Moraine que l'on retrouve dans le secteur des Laurentides sont typiquement toujours affleurants. Le potentiel aquifère de la moraine est variable et dépend entre autres de la présence de lentille de sables et graviers ainsi que de leur dimension. Les profondeurs à la nappe sont variables et dépendent de l'épaisseur de la moraine ainsi que de la perméabilité des dépôts mais se trouve généralement entre 0 et 3 mètres sous la surface. Le potentiel aquifère de la moraine n'a encore jamais fait l'objet d'une étude détaillée et son classement en tant que tel a été basé sur ses caractéristiques sédimentaires.

Sables littoraux

2M

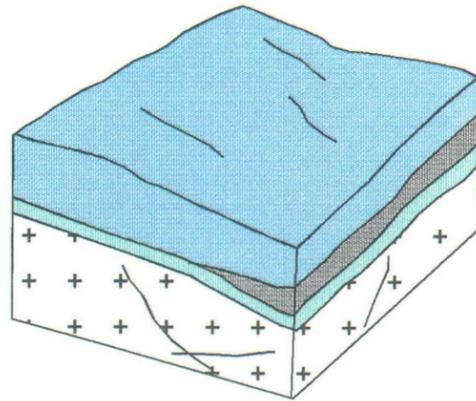


Cette unité hydrogéologique est caractérisée par des dépôts de sables reposant sur l'argile marine, le till ou le socle rocheux qui est composé des roches ignées et métamorphiques. Le relief est peu accentué, plat ou ondulé. Les sables littoraux sont des formations très perméables d'épaisseur modérée (1-8 m). Lorsque l'épaisseur de sable est importante, ces dépôts peuvent constituer des formations aquifères très productives pouvant approvisionner des municipalités en eau potable. Par contre, localement, la couverture de sable peut faire seulement quelques mètres (2-3 m) et les principaux ouvrages de captage envisageables sont alors des puits domestiques. Pour connaître la variation d'épaisseur dans cette unité hydrogéologique le lecteur est invité à consulter la carte d'épaisseur de sable qui est fournie avec les autres documents. La nature généralement sablonneuse des sols ainsi que le faible relief permettent une bonne réalimentation de ces aquifères. Les matériaux perméables du sol et de l'aquifère offrent cependant peu de protection contre l'infiltration des contaminants et par conséquent la vulnérabilité à la contamination est très élevée dans ces matériaux. Les sables littoraux emmagasinent les eaux des précipitations et contribuent donc aussi à la recharge des formations aquifères sous-jacentes. Cependant, la présence de l'argile marine en profondeur peut grandement limiter les taux d'infiltration au roc. Le niveau de la nappe phréatique dans les sables littoraux se trouve généralement près de la surface et seulement en quelques endroits on la retrouve à plus de 5 mètres sous la surface. Les régions où la nappe est subaffleurante sont généralement caractérisées par de faibles épaisseurs de sables et/ou par la présence de l'argile marine, du till ou du roc près de la surface. En contraste, les secteurs où la nappe est plus profonde sont ceux qui possèdent des épaisseurs plus importantes de sables. La grande perméabilité des sables, le faible relief ainsi que la proximité de la nappe rendent les aquifères de cette unité hydrogéologique très vulnérable à la contamination.

Aquifères libres ou semi-captifs

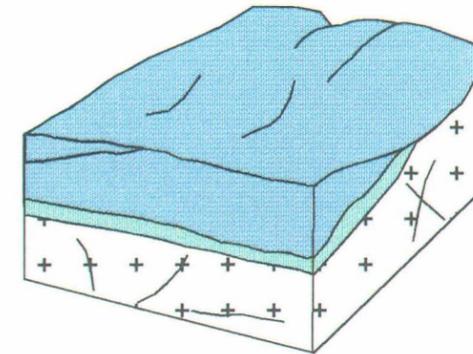
Région des Laurentides

Sables et graviers deltaïques 2B



Cette unité hydrogéologique est caractérisée par des dépôts de sables et graviers stratifiés reposant sur l'argile marine, le till ou le socle rocheux qui est composé des roches ignées et métamorphiques. Le relief est peu accentué, plat ou ondulé. Les sables et graviers deltaïques forment des formations très perméables pouvant faire plusieurs mètres d'épaisseur (1-40 m) et par conséquent constituent des formations aquifères très productives pouvant servir à l'alimentation de réseaux d'aqueducs municipaux. Par contre, localement, l'épaisseur des sables et graviers peut faire que quelques mètres (2-3 m) et leur étendue est souvent limitée par les vallées étroites des Laurentides. Le lecteur est donc invité à consulter la carte d'épaisseur de sable qui est fournie avec les autres documents pour mieux apprécier les variations dans l'amplitude de cette unité. La nature sablonneuse des sols ainsi que le faible relief permettent une bonne réalimentation. Les matériaux perméables du sol et de l'aquifère offrent cependant peu de protection contre l'infiltration des contaminants et par conséquent la vulnérabilité à la contamination est très élevée dans ces matériaux. Les sables et graviers emmagasinent les eaux des précipitations et contribuent donc aussi à la recharge des formations aquifères sous-jacentes. Cependant, la présence de l'argile marine en profondeur peut grandement limiter les taux d'infiltration au roc. Le niveau de la nappe phréatique dans les sables et graviers est très variable pouvant aller de quelques mètres à plus de 15 mètres de profondeur. Les régions où la nappe est près de la surface sont généralement caractérisées par de faibles épaisseurs de sables et graviers et/ou par la remontée d'un substratum imperméable (till ou roc) près de la surface. En contraste, les secteurs où la nappe se situe à de très grandes profondeurs (>10 m) sont généralement indicateurs de la présence d'une couche épaisse de sables et graviers. (Modifié de Champagne, 1990).

Sables et graviers fluvioglaciaires 2I

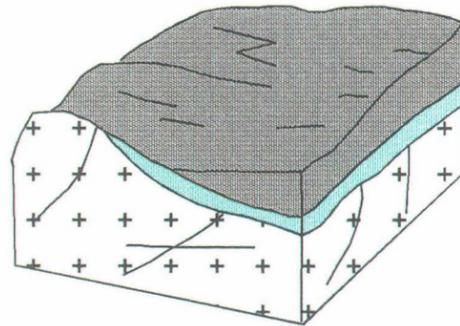


Cette unité hydrogéologique est caractérisée par un terrain ondulé formé de sables et graviers stratifiés d'origine fluvioglaciaire. Les sables et graviers fluvioglaciaires qui font plusieurs mètres d'épaisseur et qui sont très perméables constituent de bons aquifères bien que leur productivité varie en fonction de l'étendue et la dimension des dépôts qu'ils forment. Les dépôts fluvioglaciaires de forme allongée compris à l'intérieur des vallées étroites des Laurentides ont un potentiel aquifère moindre que ceux qui sont de forme étalée occupant des superficies plus importantes en bordures des Laurentides. La nature sablonneuse des sols permet une bonne réalimentation de ces formations de sable et gravier mais offre peu de protection contre l'infiltration des contaminants. Les sables et graviers emmagasinent les eaux de précipitations et contribuent donc aussi à la recharge du massif rocheux (roches ignées et métamorphiques) sur lequel il repose. La profondeur de l'eau varie de 1.5 mètres à plus de 15 mètres tout dépendant de l'épaisseur des dépôts. (Modifié de Champagne, 1990).

Aquifères captifs

Région des Laurentides

Roches ignées/métamorphiques recouvertes par argiles marines 2F



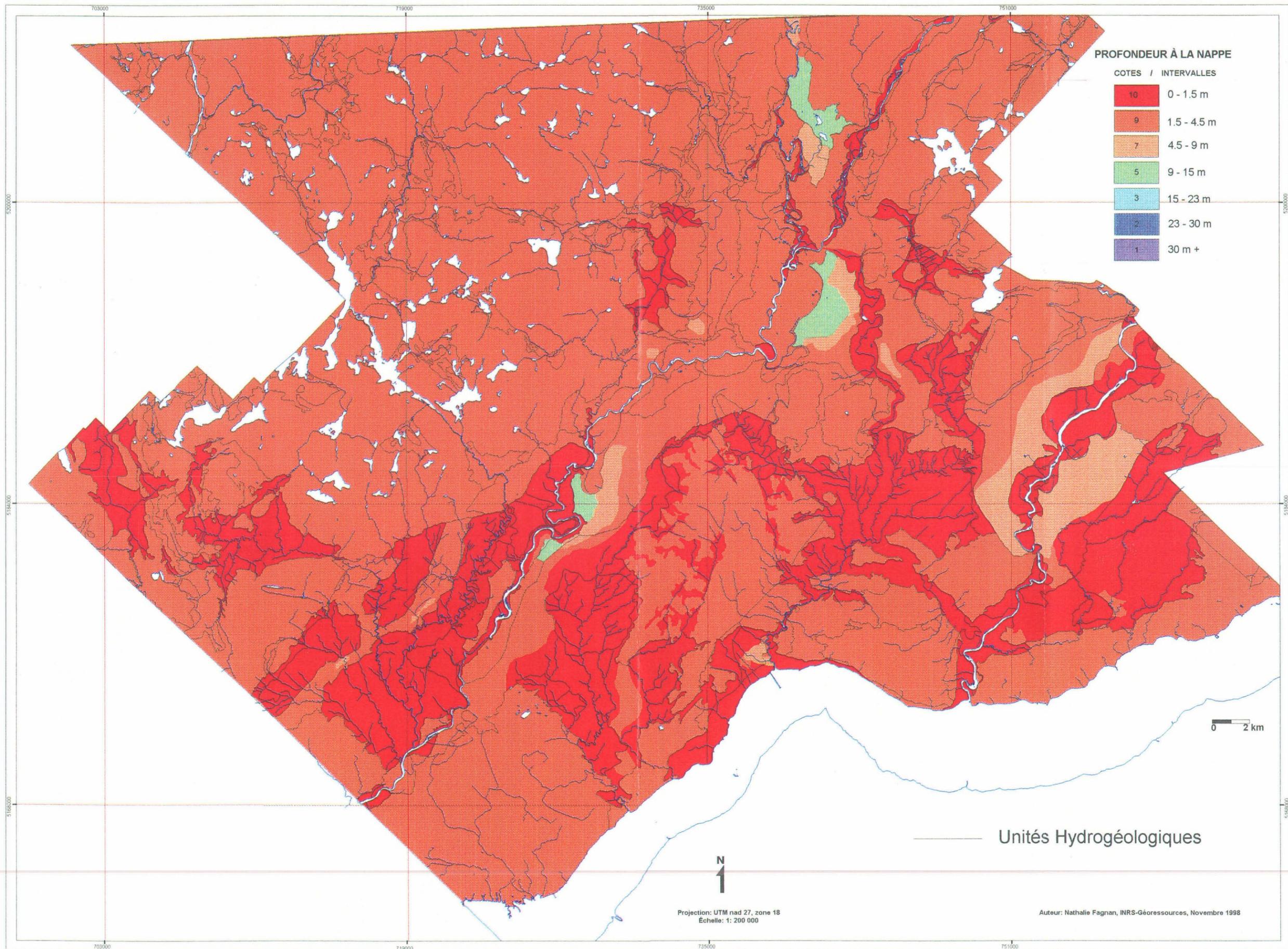
Cette unité hydrogéologique est caractérisée par la présence d'un horizon d'argile qui recouvre le till et le roc. La surface est plane avec micro-reliefs par endroits. Les formations rocheuses composées principalement de gneiss, granites et anorthosites représentent l'aquifère principal. La productivité de l'aquifère, généralement faible, est directement reliée au degré de fracturation du massif rocheux. L'existence d'une couche argileuse limite l'infiltration directe des eaux de précipitations et des contaminants jusqu'au socle mais les zones de réalimentation de l'aquifère sont formées des affleurements rocheux du Plateau Laurentien. L'épaisseur de l'argile peut grandement varier et reflète la topographie du socle sous-jacent ainsi que les conditions de déposition qui prévalurent dans le bassin.

ANNEXE K

RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC PROFONDEUR À LA NAPPE

Sources des données :

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)

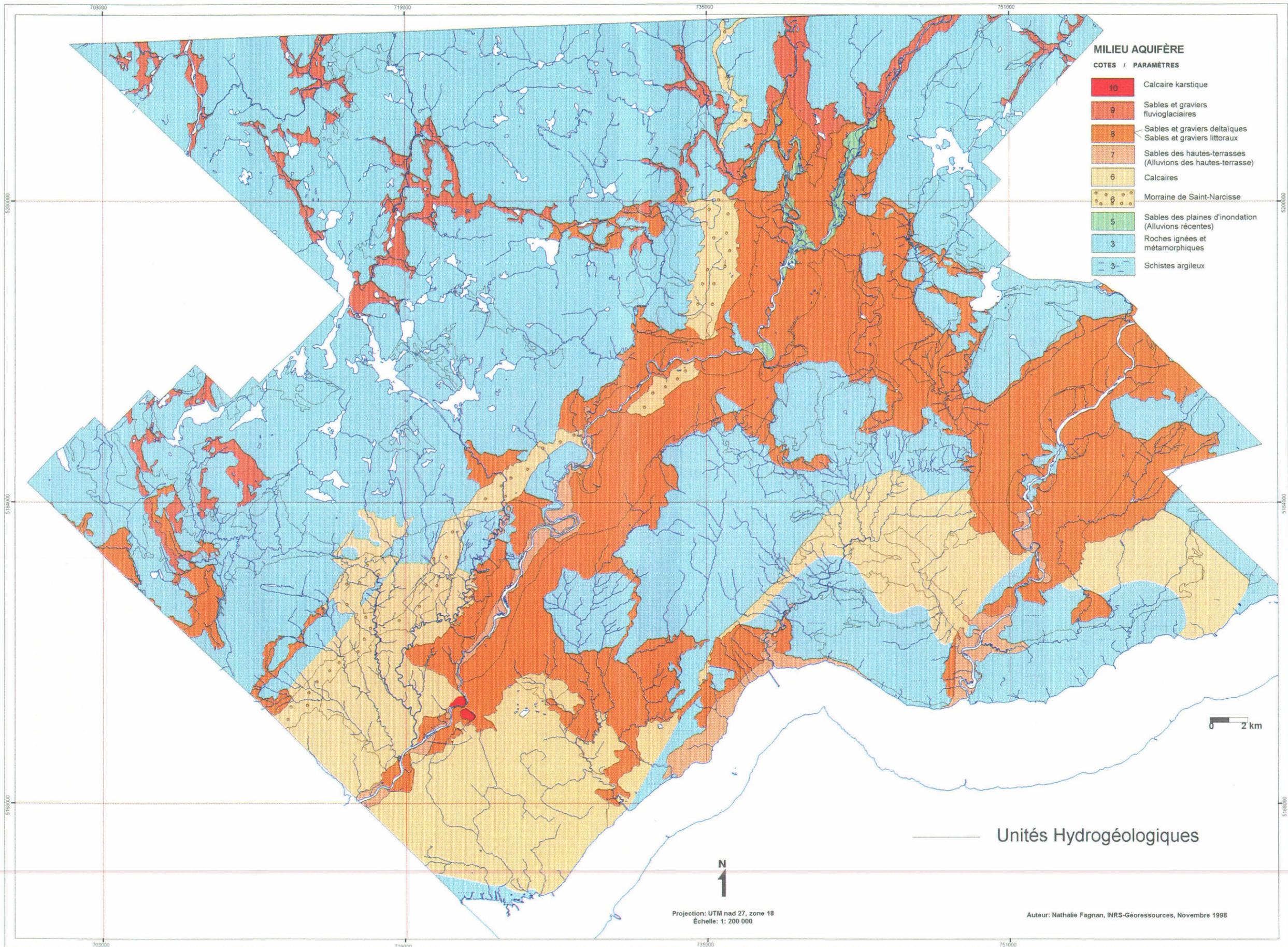


ANNEXE L

RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC MILIEU AQUIFÈRE

Sources des données :

Géologie des formations superficielles : Cloutier *et al.*, (1997)
Rapports géologiques du MRN : Clark et Globensky (1973, 1975)
Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



MILIEU AQUIFÈRE

COTES / PARAMÈTRES

- 10 Calcaire karstique
- 9 Sables et graviers fluvioglaciaires
- 8 Sables et graviers deltaïques
Sables et graviers littoraux
- 7 Sables des hautes-terrasse (Alluvions des hautes-terrasse)
- 6 Calcaires
- 6 Morraine de Saint-Narcisse
- 5 Sables des plaines d'inondation (Alluvions récentes)
- 3 Roches ignées et métamorphiques
- 3 Schistes argileux

0 2 km

Unités Hydrogéologiques



Projection: UTM nad 27, zone 18
Échelle: 1: 200 000

Auteur: Nathalie Fagnan, INRS-Géoressources, Novembre 1998

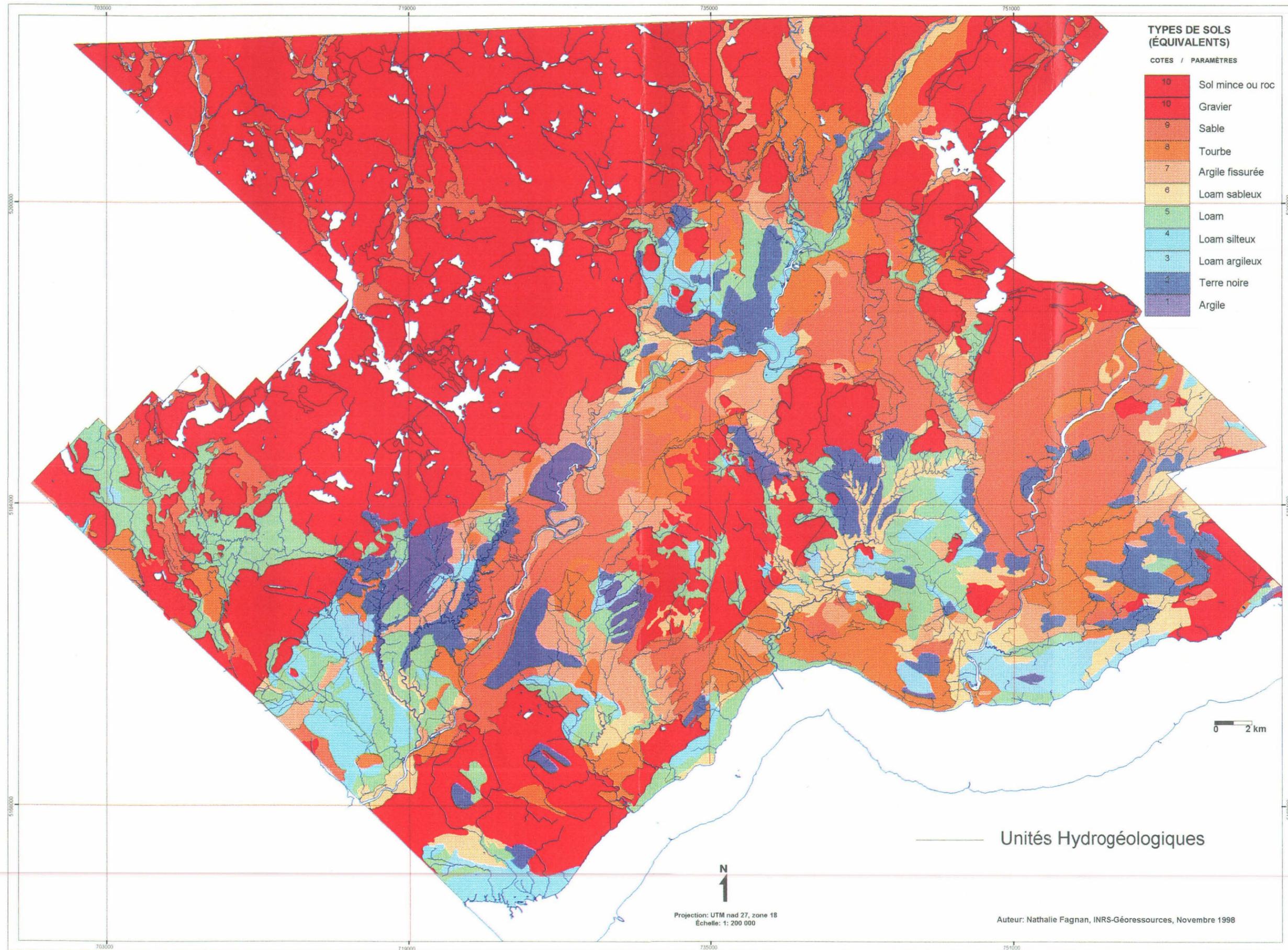
ANNEXE M

RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC TYPES DE SOLS

Sources des données :

Carte pédologique du comté de Portneuf : Raymond *et al.*, (1976)

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



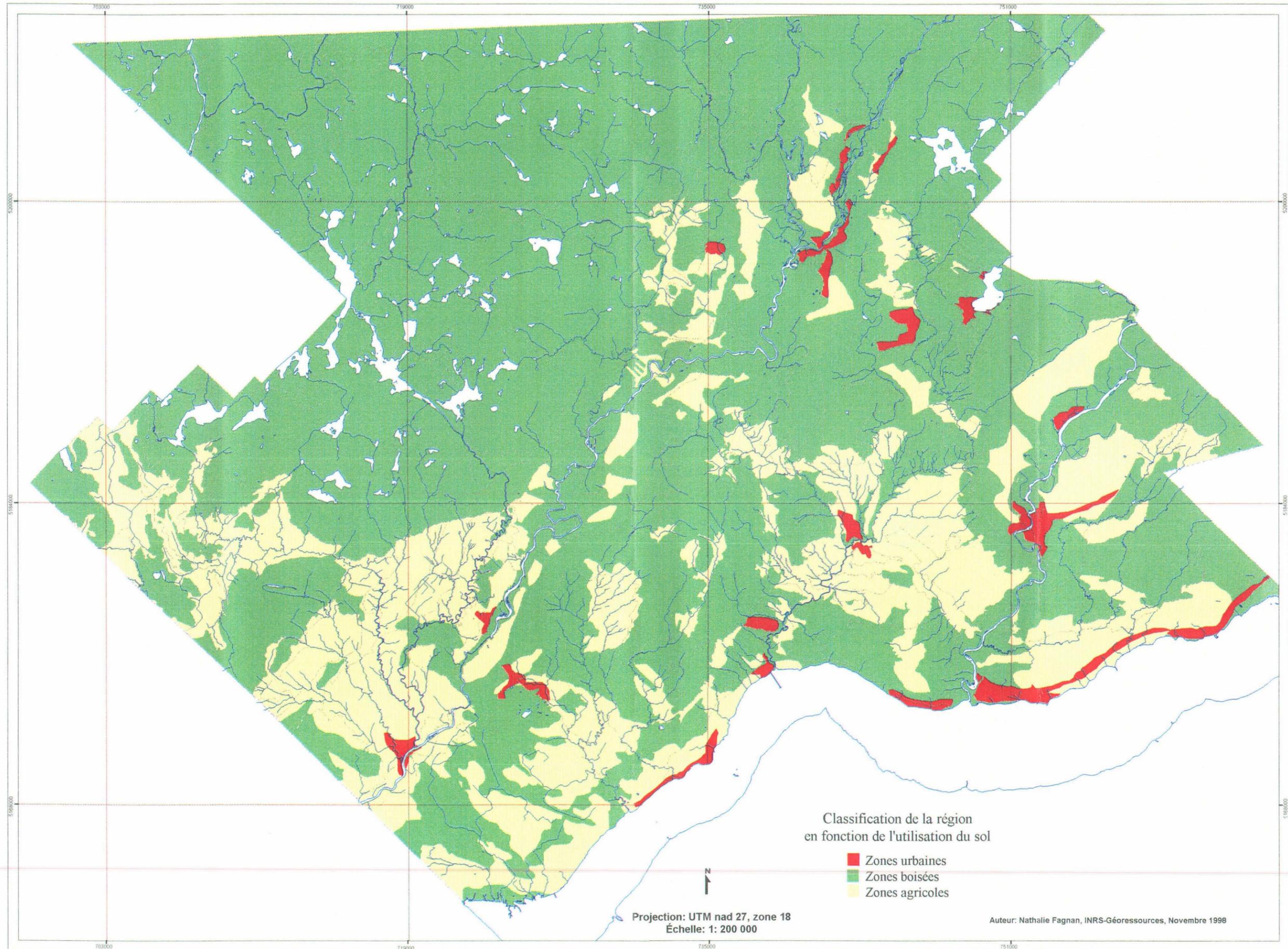
ANNEXE N

CALCUL DE LA RECHARGE : CLASSIFICATION DE LA RÉGION PAR TYPE D'UTILISATION DU SOL

Sources des données :

Utilisation du sol : MRC de Portneuf

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



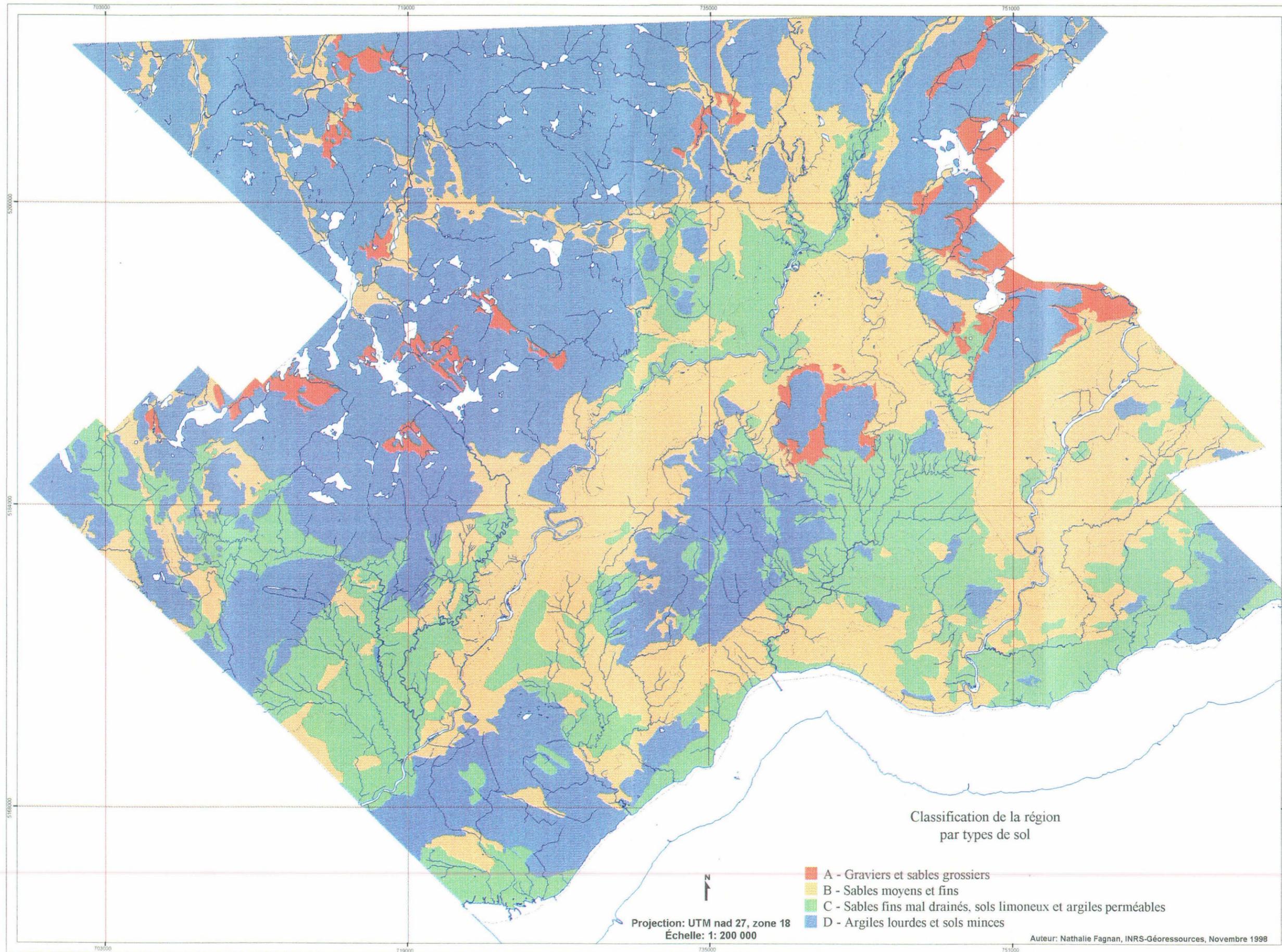
ANNEXE O

CALCUL DE LA RECHARGE : CLASSIFICATION DE LA RÉGION PAR TYPES DE SOL

Sources des données :

Carte pédologique du comté de Portneuf : Raymond *et al.*, (1976)

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



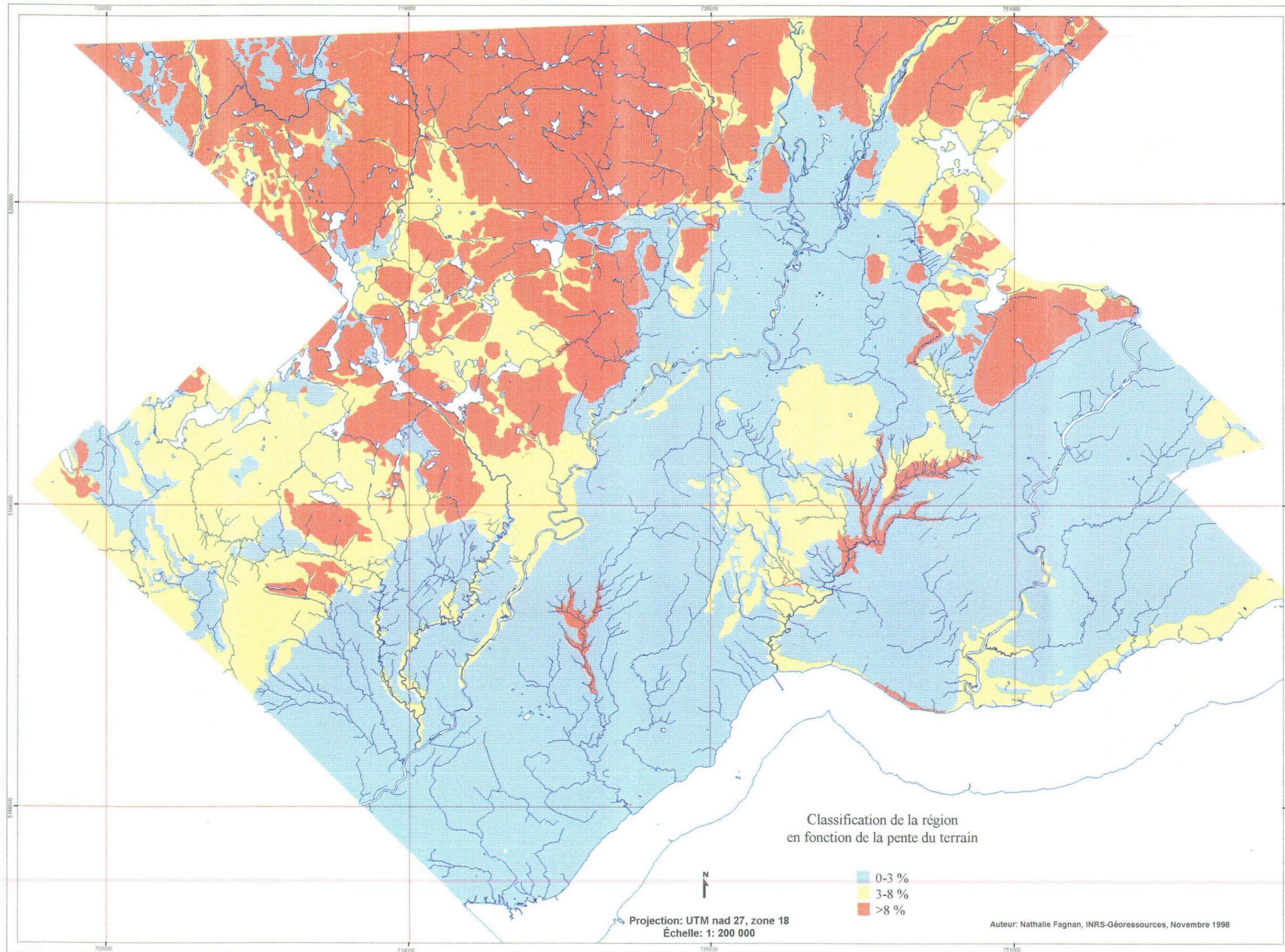
ANNEXE P

CALCUL DE LA RECHARGE : **CLASSIFICATION DE LA RÉGION EN** **FONCTION DE LA PENTE DU TERRAIN**

Sources des données :

Modèle numérique de terrain (MNT) : Commission géologique du
Canada

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



Classification de la région
en fonction de la pente du terrain

- 0-3 %
- 3-8 %
- >8 %

Projection: UTM nad 27, zone 18
Échelle: 1: 200 000

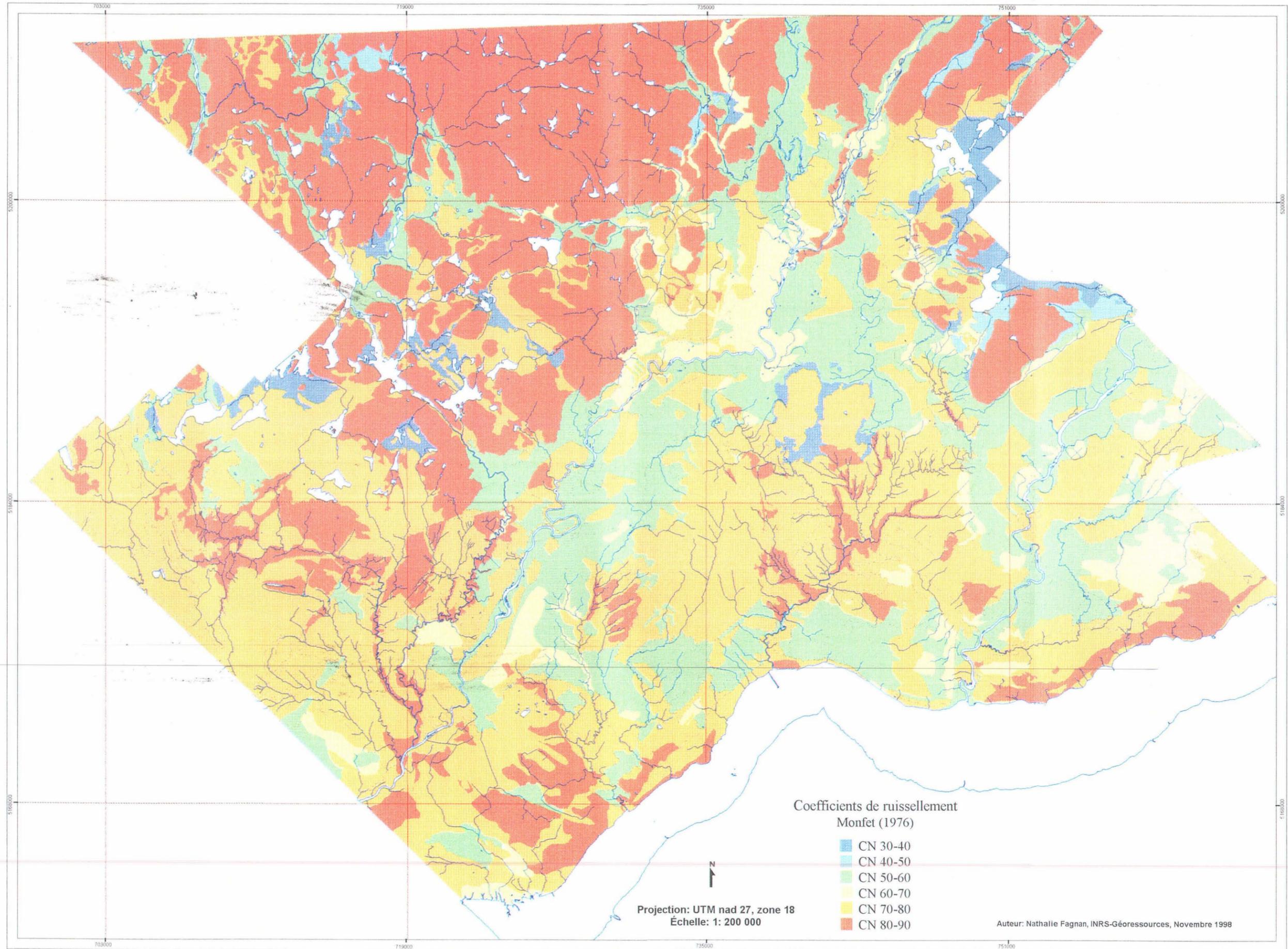
Auteur: Nathalie Fagnan, INRS-Géoresources, Novembre 1998

ANNEXE Q

CALCUL DE LA RECHARGE : **COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT**

Sources des données :

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)

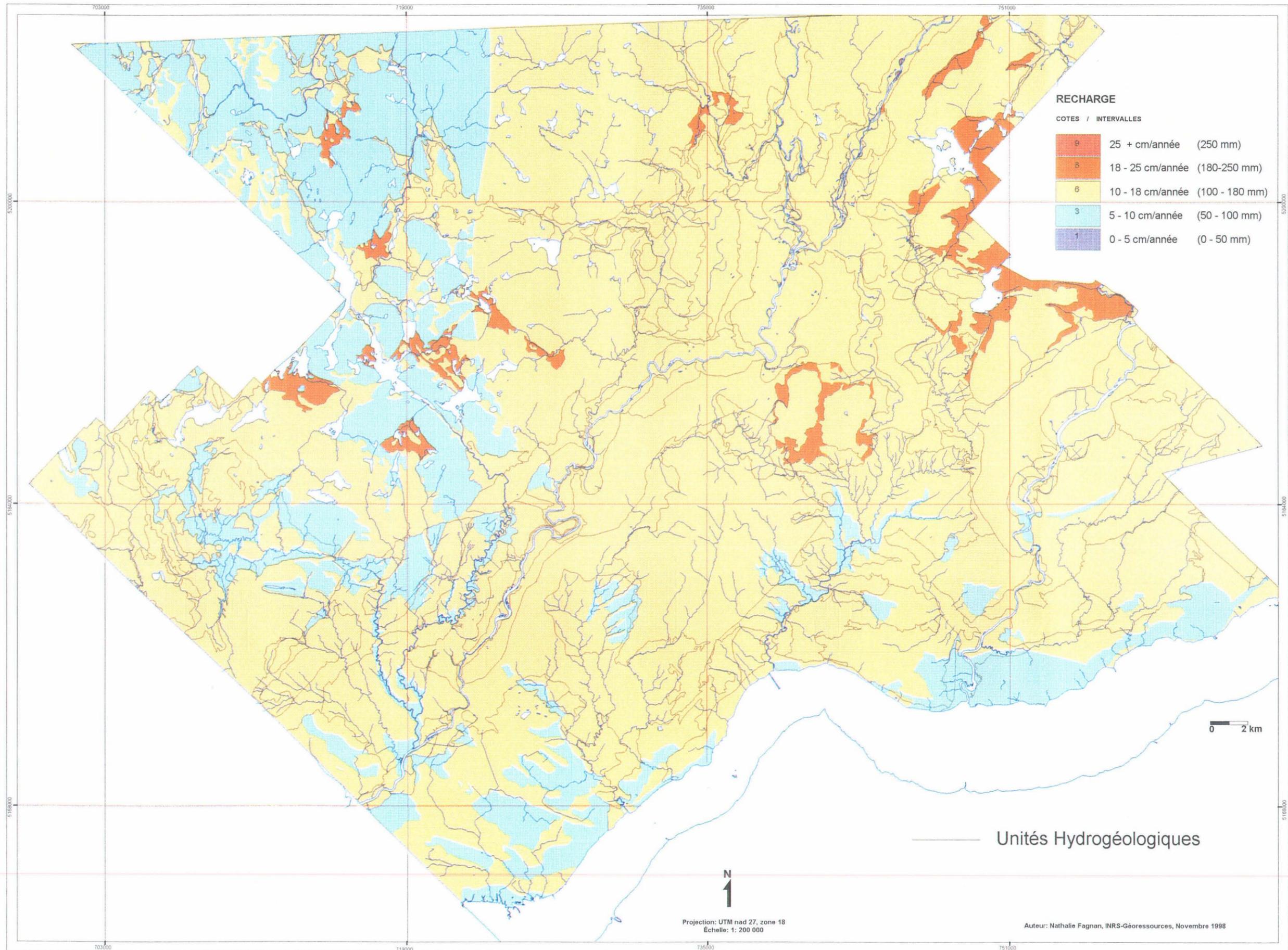


ANNEXE R

RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC RECHARGE

Sources des données :

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



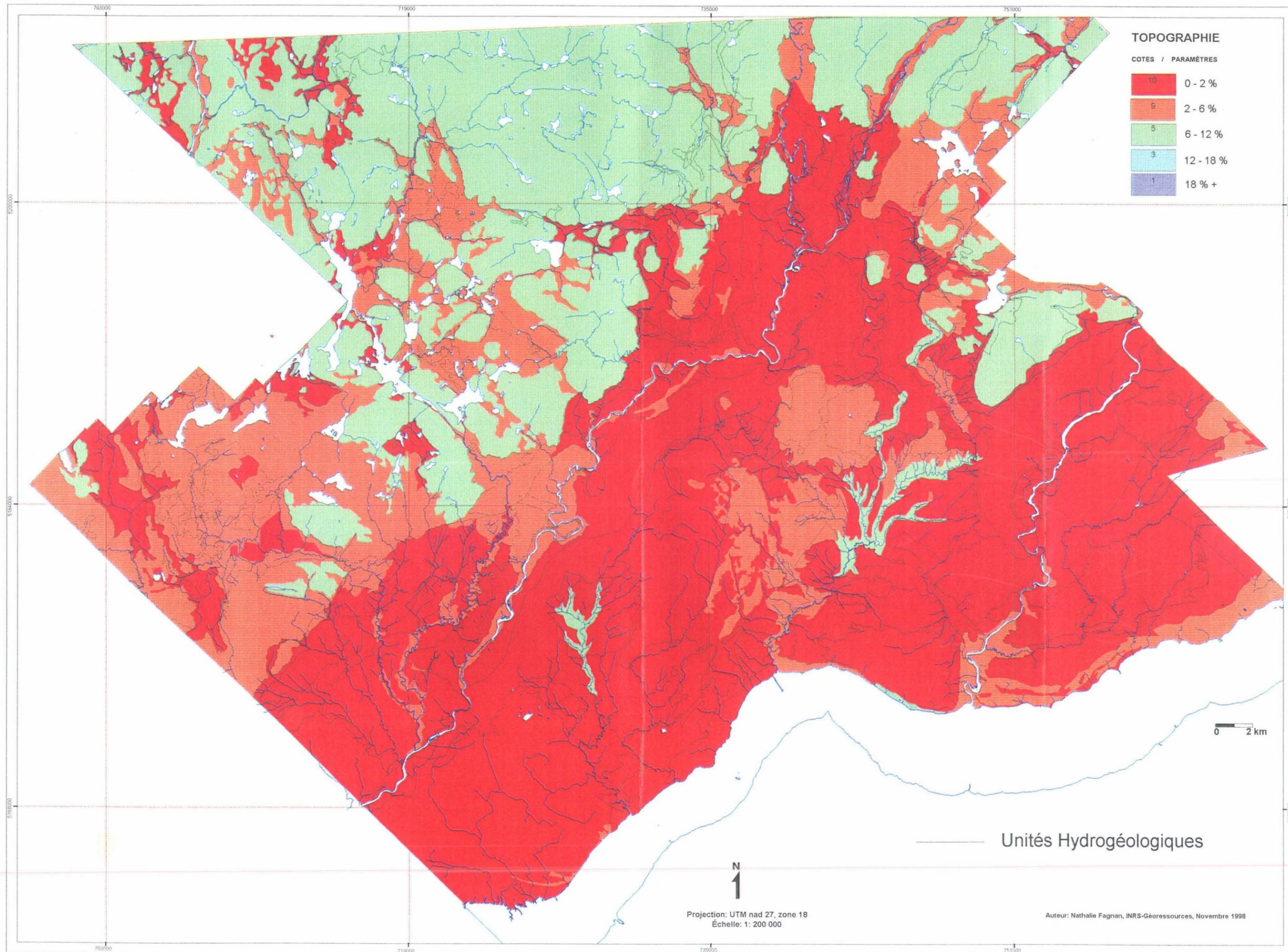
ANNEXE S

RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC TOPOGRAPHIE

Sources des données :

Modèle numérique de terrain (MNT) : Commission géologique du
Canada

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



TOPOGRAPHIE

COTES / PARAMÈTRES

10	0 - 2 %
9	2 - 6 %
5	6 - 12 %
3	12 - 18 %
1	18 % +

0 2 km

Unités Hydrogéologiques

N
↑
Projection: UTM nad 27, zone 18
Échelle: 1: 200 000

Auteur: Nathalie Fagnan, INRS-Géoressources, Novembre 1998

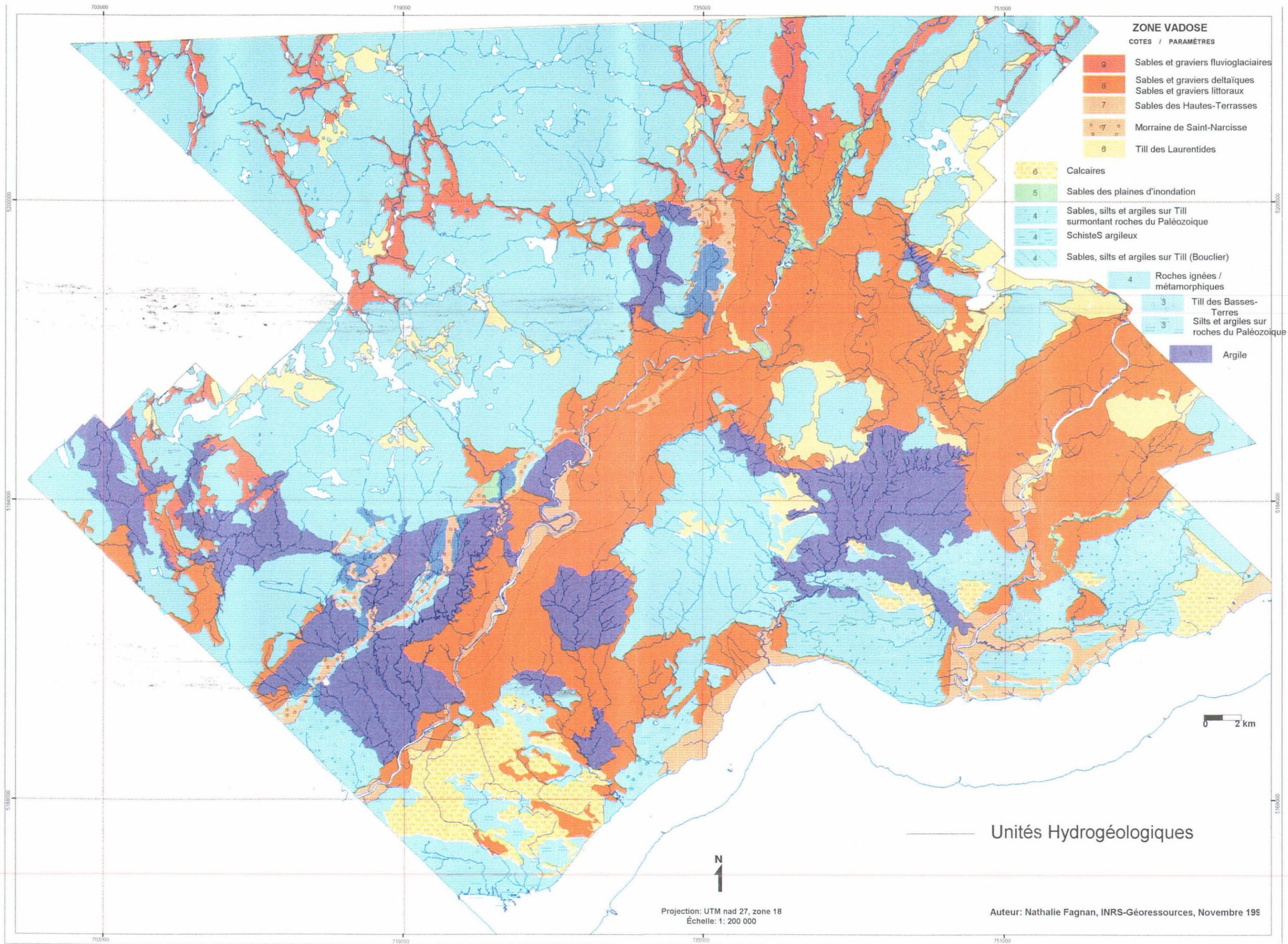
ANNEXE T

RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC ZONE VADOSE

Sources des données :

Géologie des formations superficielles : Cloutier *et al.*, (1997)

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)

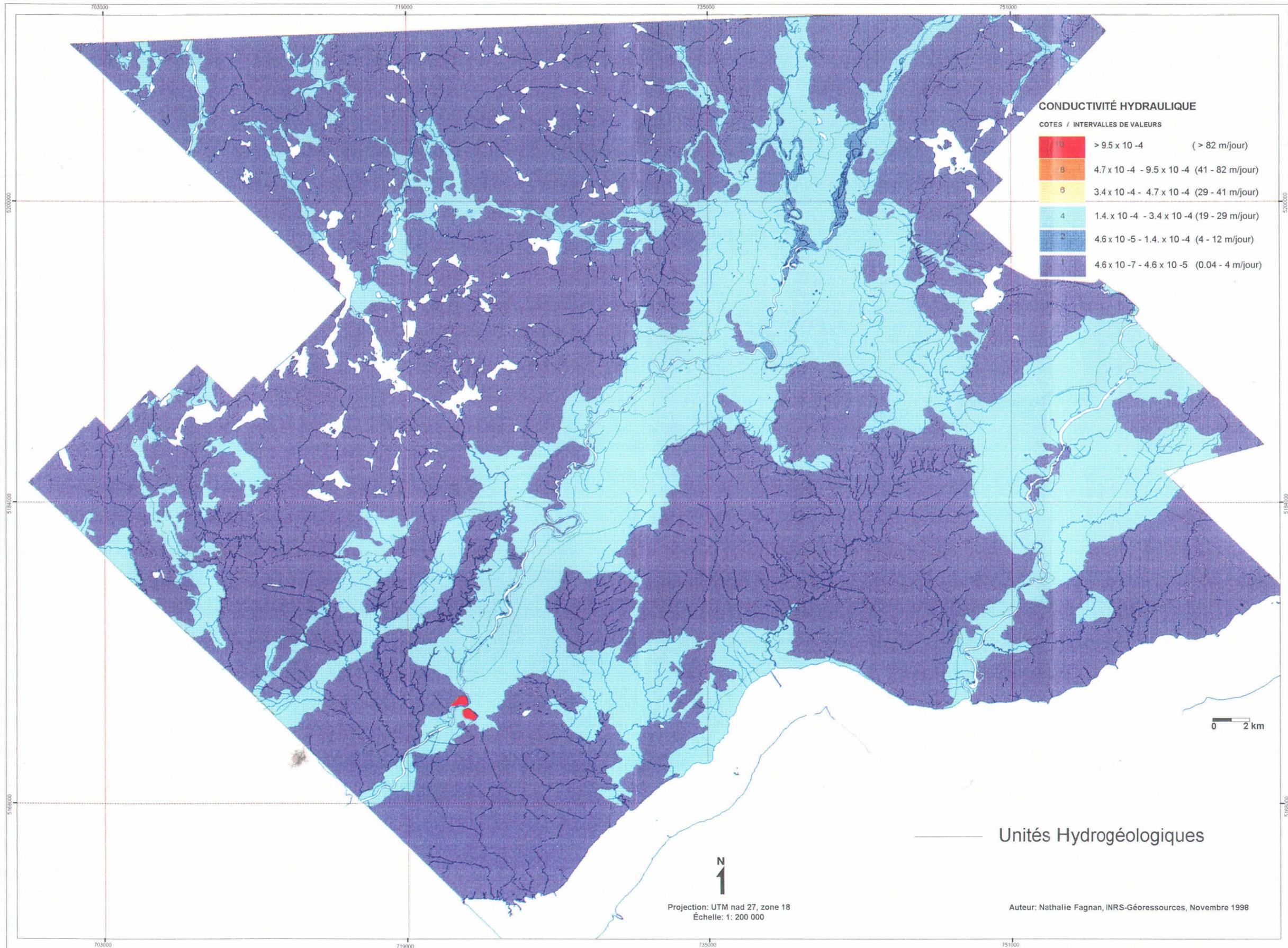


ANNEXE U

RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE DRASTIC CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

Sources des données :

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



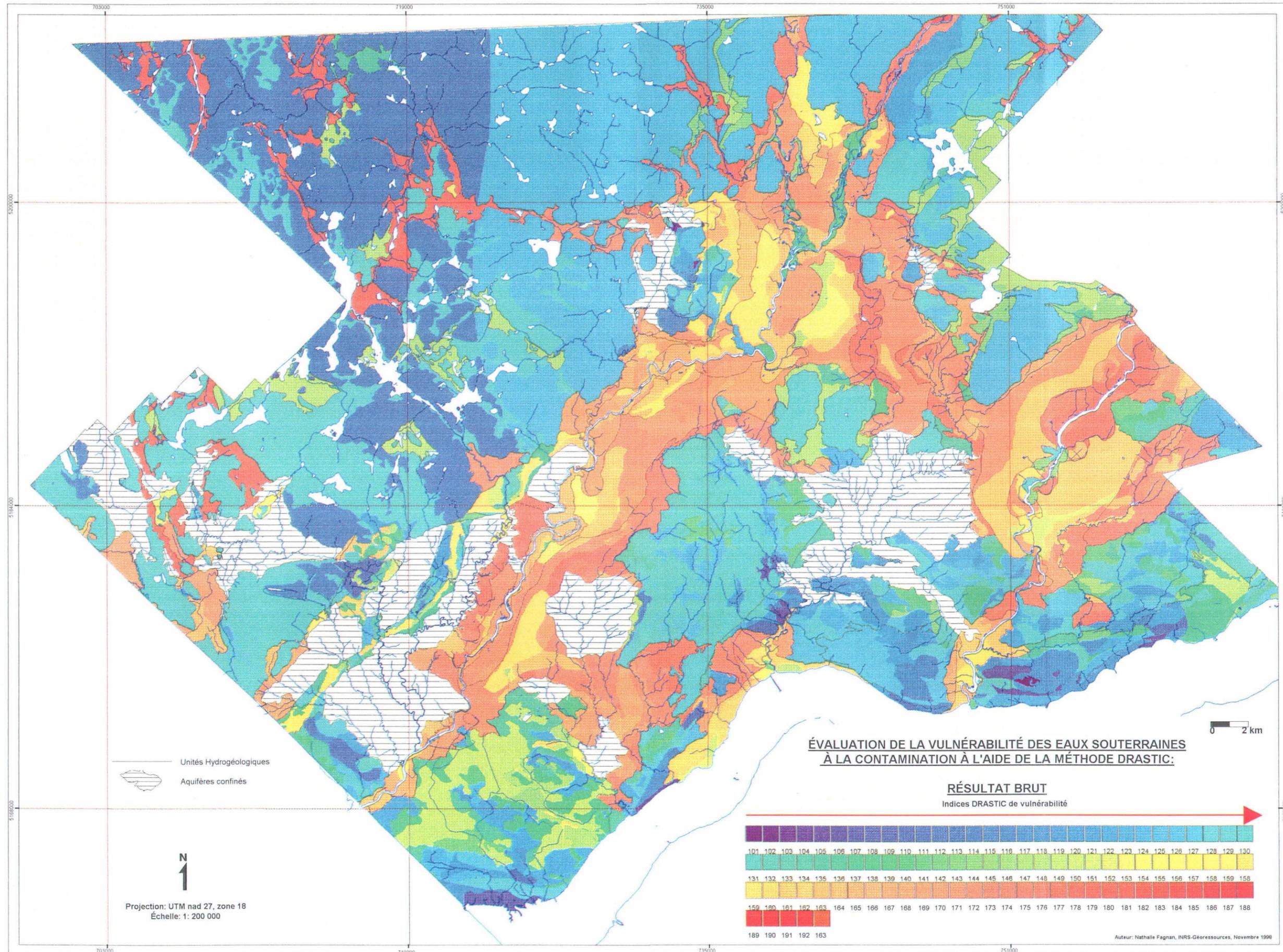
ANNEXE V

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES À LA CONTAMINATION À L'AIDE DE LA MÉTHODE DRASTIC :

RÉSULTATS BRUTS

Sources des données :

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



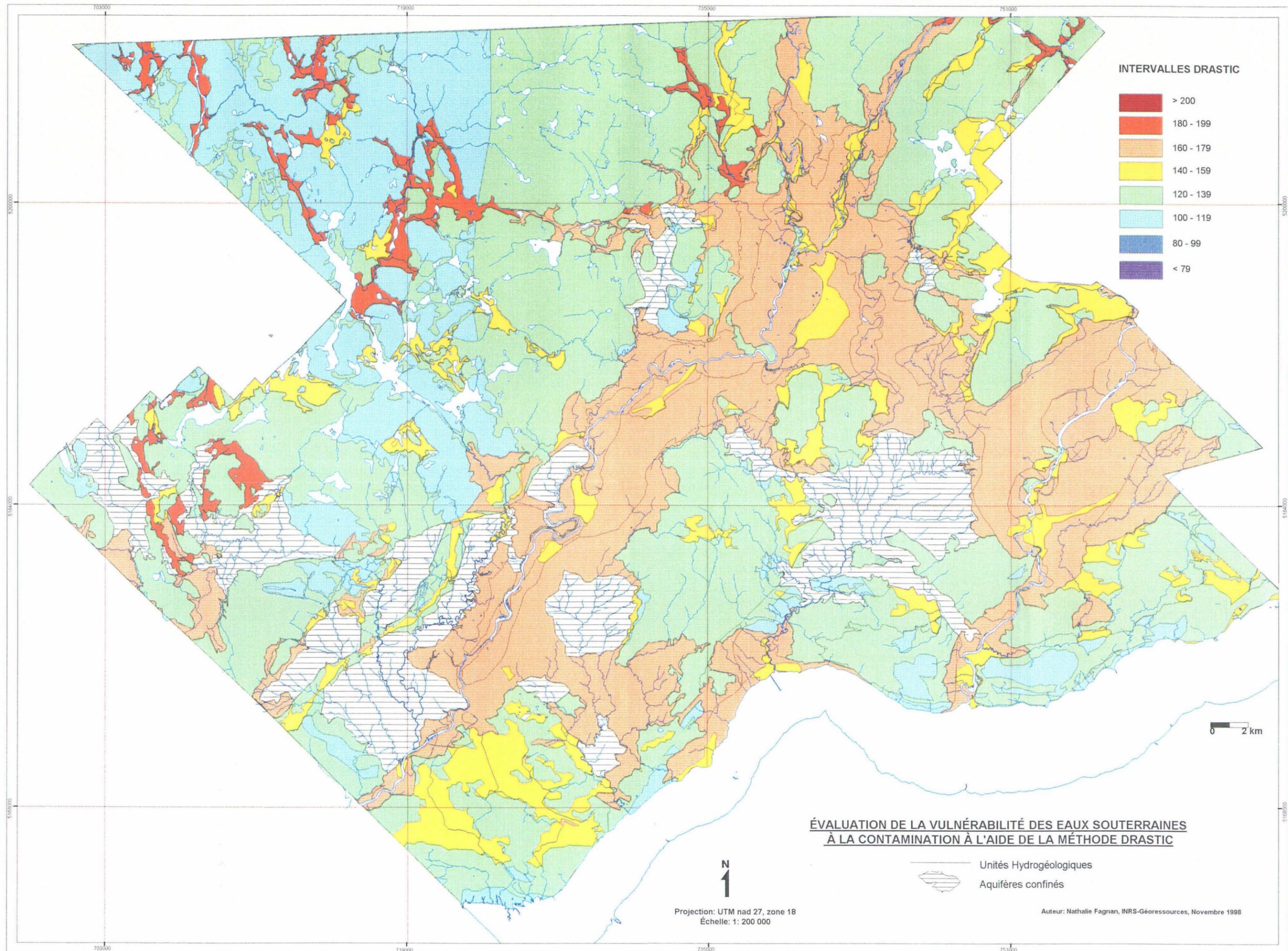
ANNEXE W

CARTE DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES À LA CONTAMINATION, MÉTHODE DRASTIC

Sources des données :

Géologie des formations superficielles : Cloutier *et al.*, (1997)

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



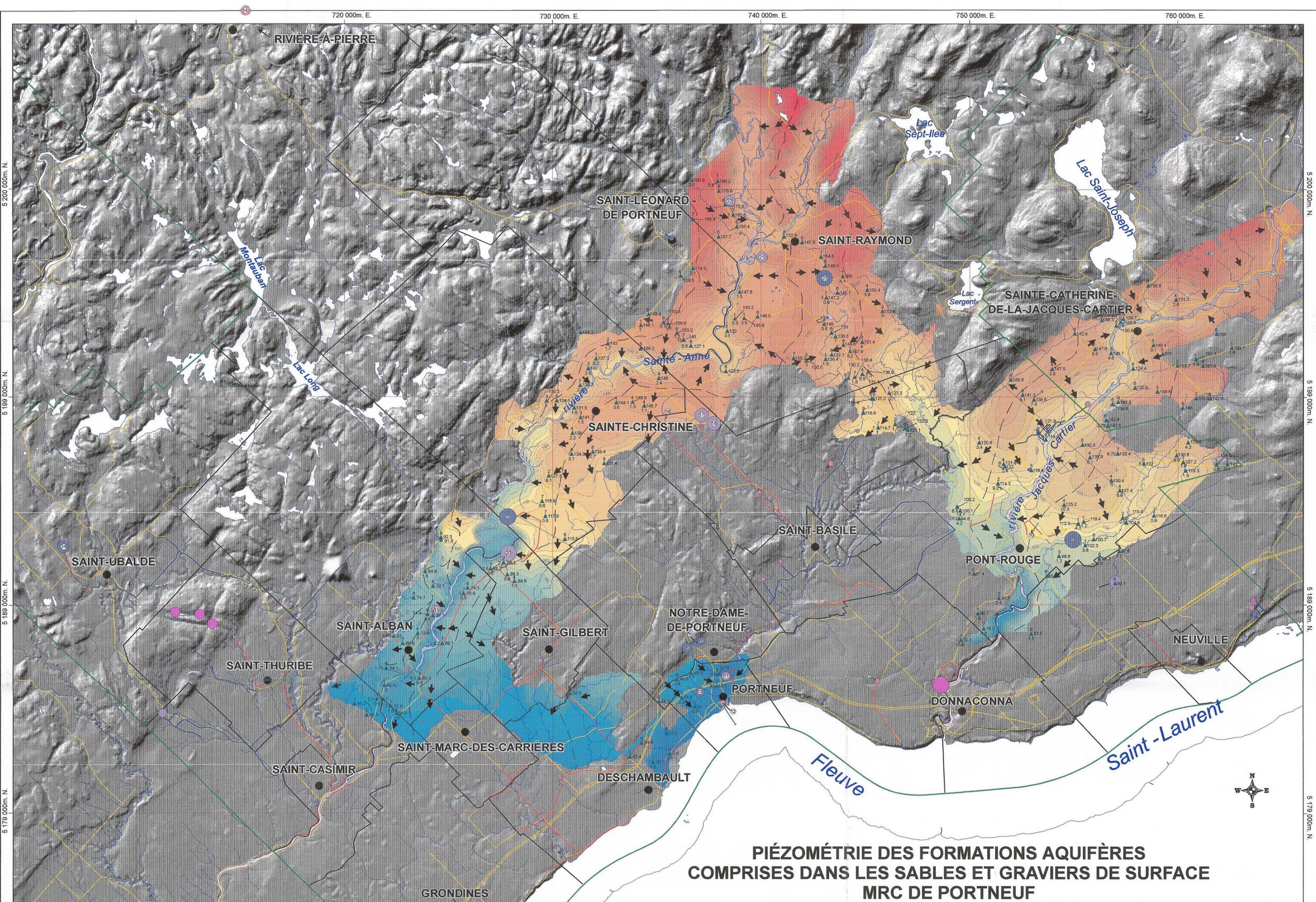
POCHETTE 1

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Sources des données :

Systeme d'approvisionnement et de distribution de l'eau potable : MRC
de Portneuf

Reseau hydrographique : Geomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)



PIÉZOMÉTRIE DES FORMATIONS AQUIFÈRES COMPRISES DANS LES SABLES ET GRAVIERS DE SURFACE MRC DE PORTNEUF

Municipalités utilisant les eaux souterraines comme source d'eau potable (*)							
Municipalité	Population	Superficie (km²)	# id / Prises d'eau municipales Nom	Matériel aquifère	Type de captage	Débit moyen pompé (m³/j)	% de la municipalité qui est desservie
Cap-Santé	2,563	54	1 - Puits Julien	SA	1 Puits tubulaire (10 m)	40	6
			2 - Puits Bertrand	SA	1 Puits tubulaire (20m)	575	75
Deschambault	1,213	56	3 - Prise d'eau Sainte-Christine	SA	2 Puits tubulaires (45 m)	1,800	75
			4 - Prise d'eau Pointe-aux-Trembles	Mb / Ca	Bassin de captage installé au contact des sables et du calcaire	700	40
Notre-Dame-de-Portneuf	1,676	102	5 - Maurice Hudon	Mb / AI	Source captée	70	34
			6 - Puits no 1, Prise Gauthier & Julien	SA	Puits de 28 m dans horizon sableux, crépiné	360	60
			7 - Puits no 3, Prise Gauthier & Julien	SA	Puits de 26 m dans horizon sableux, crépiné	170	
			8 - Puits no 2, Prise Gauthier & Julien	SA	Puits de 26 m dans horizon sableux, crépiné	170	
			9 - Source Paquet	SA	20 points filtrants à une profondeur de 6m	2,690	67
Pont-Rouge et Sainte-Jeanne-de-Pont-Rouge	6,099	121	10 - Source Dansereau	SA	Source captée, eau utilisée en cas de feu ou pénurie	0	0
			11 - Prise d'eau les Sources	SA	Plusieurs sources captées	270	80
Portneuf	1,393	9	12 - Puits Provencher	SA	1 Puits tubulaire (23 m)	55	
			13 - Prise d'eau Puits Thibodeau	SA	1 Puits tubulaire (35 m)	320	
			14 - Rivière-à-Pierre	SA	1 Puits tubulaire (30 m)	330	100
Rivière-à-Pierre	672	521	15 - Source de Saint-Alban	SA	2 Puits de 2.5 m captent des sources par gravité	440	50
Saint-Alban	1,176	151	16 - Source Saint-Joseph	SA	Source captée / non utilisée	0	68
			17 - Source Sainte-Anne 2	SA	Source captée	530	
Saint-Basile et Saint-Basile-Sud	2,566	98	18 - Source Sainte-Anne 1	SA	Source captée	530	
			19 - Prise d'eau Pettigrow	GxT	1 Puits tubulaire (21 m)	45	53
Saint-Léonard-de-Portneuf	997	139	20 - Les Sources / Saint-Marc-des-Carières	SA	4 Sources captées	1680	100
Saint-Marc-des-Carières	2,844	17	21 - Chute Panet	SA	Source captée	490	50
Saint-Raymond	8,126	684	22 - Source Sainte-Croix	SA	Source captée	535	
			23 - Prise d'eau rue Pelletier (Grand remous)	SA	3 Puits tubulaires (21 m)	1770	
Saint-Ubalde	1,552	141	24 - Prise d'eau aqueduc rang Saint-Paul	Gx	1 Puits tubulaire (16 m)	750	70

Points de mesures des niveaux d'eau
(Mesures nivelées (station totale) entre juin et août 1996)

- puits de surface utilisés
- puits de surface abandonnés
- puits de surface / ? utilisation
- piézomètres
- fossés
- rivières / ruisseaux
- sablillères
- trous à la tarière ou pionjir
- réurgences

Lien hydraulique entre les formations poreuses de surface et les rivières principales

- Lien direct :** Le lit de la rivière repose sur la formation aquifère qui est composée de sables et graviers.
- Lien indirect :** s'entend de l'eau souterraine le long des berges composées de silt et d'argiles. Le lit de la rivière repose sur le roc qui est composé des roches ignées et métamorphiques.
- Lien indirect :** s'entend de l'eau souterraine le long des berges composées des séquences silto-argileuses et du roc. Le lit de la rivière repose sur les formations rocheuses paléozoïques.

Altitude de la surface libre (surface de la nappe phréatique)
mètres au-dessus du niveau de la mer

215 +	105 - 110
210 - 215	100 - 105
205 - 210	95 - 100
200 - 205	90 - 95
195 - 200	85 - 90
190 - 195	80 - 85
185 - 190	75 - 80
180 - 185	70 - 75
175 - 180	65 - 70
170 - 175	60 - 65
165 - 170	55 - 60
160 - 165	50 - 55
155 - 160	45 - 50
150 - 155	40 - 45
145 - 150	35 - 40
140 - 145	30 - 35
135 - 140	25 - 30
130 - 135	20 - 25
125 - 130	15 - 20
120 - 125	10 - 15
115 - 120	5 - 10
110 - 115	0 - 5

Prises d'eau municipales et privées: milieu aquifère exploité et débits moyens pompés

type m³/j	Sources	Dépôts meubles	Socle rocheux	Eau de surface
2000	●	●	●	●
1000	●	●	●	●
500	●	●	●	●

numéro d'identification de la prise d'eau. Le numéro est relié au nom de la prise d'eau municipale ou de la municipalité qui l'exploite (voir tableau des prises d'eau municipales ci-contre).

Limites administratives
— limite de la MRC ● Ville et village
— limite municipale

Réseau routier
— Route principale

Étendue des réseaux d'aqueduc en zones rurales
— Réseau d'aqueduc privé
— Réseau d'aqueduc municipal

ÉCHELLE 1: 100 000
Kilomètres 2 0 2 4 6 8 Kilomètres

Auteur : Nathalie Fagnan, INRS-Géoresources, Novembre 1998.

POCHETTE 2

CARTE SYNTHÈSE : VULNÉRABILITÉ ET UTILISATION DU SOL

Sources des données :

Sites de dispositions des déchets, sites d'extraction, utilisation du sol :

MRC de Portneuf

Géologie des formations superficielles : Cloutier *et al.*, (1997)

Réseau hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des Sciences de
la Terre)

CARTE SYNTHÈSE: UTILISATION DU SOL, UTILISATION DE LA RESSOURCE EN EAUX SOUTERRAINES, SOURCES POTENTIELLES DE CONTAMINATION ET INDICES DRASTIC DE VULNÉRABILITÉ

LÉGENDE

Sites de dispositions des déchets

- Centre de traitement des boues de fosses septiques
- Centre de tri
- Cimetières d'automobiles
- Dépôts de pneus usés
- Dépôts ou déversements de neiges usées
- Dépotoirs
- Dépôts de matériaux secs
- Sites d'enfouissement sanitaire
- Sites de dépôts de déchets dangereux
- Sites de disposition des boues de fosses septiques
- Sites contaminés

L'État des sites d'extraction (sablères/gravrières/carières)

- Sites actifs
- Sites inactifs
- Sites reportés non-dokumentés

Systèmes d'approvisionnement et de distribution de l'eau potable

Prises d'eau

- Sources captées
- Eaux de surface
- Puits de pompage au roc
- Puits de pompage dans les dépôts meubles

Réseaux d'aqueduc

- Municipal
- Privé

Utilisation du Sol

- Forestière
- Agricole
- Résidentiel / Rural
- Résidentiel / Villégiature
- Résidentiel / Urbain
- Minière
- Marécage - Tourbière
- Ligne de transport électrique
- cultures de la pomme de terre
- zones d'épandages de fumier

VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES, COMPRIS DANS LES LES AQUIFÈRES LIBRES ET SEMI-CAPTIFS, À LA CONTAMINATION

Indices DRASTIC

Indices DRASTIC	Cotes correspondantes aux Indices DRASTIC qui se retrouvent sur la carte
< 79 *	3
80 - 99 *	4
100 - 119	5
120 - 139	6
140 - 159	7
160 - 179	8
180 - 199	9
> 200 *	10

* : Intervalles DRASTIC non rencontrés dans la MRC de Portneuf

▲ : Aquifères Confinés

Sources:

Utilisation du sol:

- Informations fournies par le Groupe ECO-RECHERCHE de l'Université Laval: Maritius Thériault, Marc Miller, Carlo Prévil, Marc-Olivier Grasse et Marc Girard (1996)

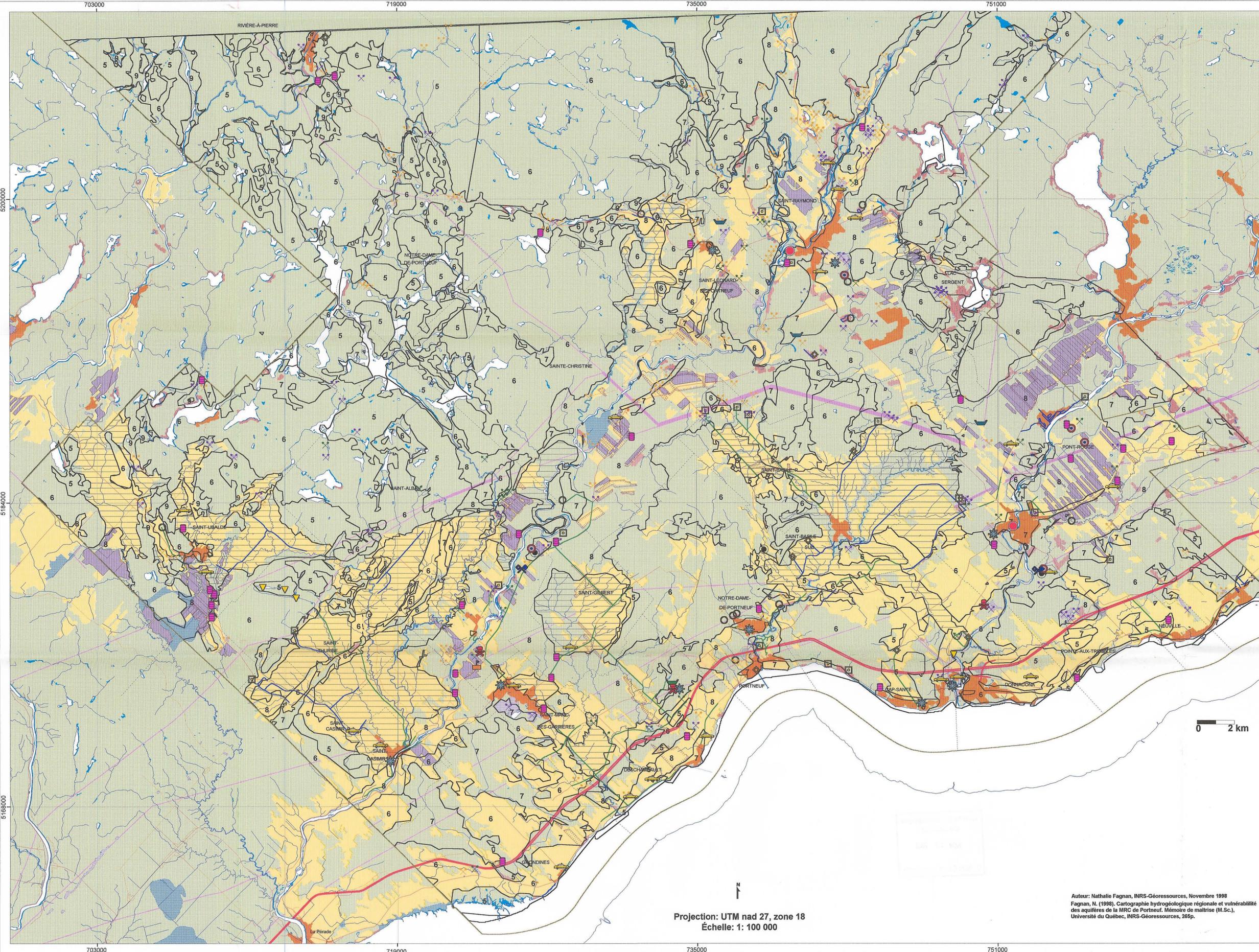
Sites d'extraction: Compilation effectuée par la MRC de Portneuf, références citées sur la carte:

- André Brazeau, Inventaires de ressources en granulats, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service géologique du Québec, 1989
- André Brazeau, Liste des carrières et mines de la MRC de Portneuf, cartes au 1:50,000, 1993
- Ministère des Ressources Naturelles, Direction des redevances et titres miniers, Liste informelle, 1996, Cartes au 1:125,000 et au 1:50,000
- Ministère Énergie et Ressources, Carte géologique, 1:50,000, 1989
- Questionnaires soumis aux municipalités, MRC de Portneuf, 1994

Évaluation de la vulnérabilité:

Aller, L., et al., (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. EPA/600/2-87-035, 455p.

Note: Les informations concernant les sites de dispositions des déchets, les sites d'extraction, ainsi que les systèmes d'approvisionnement en eau ont été recueillies à la MRC de Portneuf durant la période de l'été 1994. Toutes les données disponibles étaient sous forme de cartes papiers et ont été numérisées ainsi que saisies dans une base de données utilisant le logiciel MapInfo.



Projection: UTM nad 27, zone 18
Échelle: 1: 100 000

Auteur: Nathalie Fagnan, INRS-Géoresources, Novembre 1998
Fagnan, N. (1998). Cartographie hydrogéologique régionale et vulnérabilité des aquifères de la MRC de Portneuf. Mémoire de maîtrise (M.Sc.), Université du Québec, INRS-Géoresources, 265p.