

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR
MARIE-LINE TREMBLAY, ing. stag.

INTÉGRATION DE L'INFORMATION GÉOLOGIQUE
LORS DE L'ESTIMATION DE L'AIRE D'ALIMENTATION
DE CAPTAGE D'EAU SOUTERRAINE

AVRIL 2007



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Les caractéristiques géologiques d'un aquifère ont un effet sur la dimension et la géométrie de l'aire d'alimentation de captage d'eau souterraine. La méthode préconisée pour estimer l'aire d'alimentation consiste à tracer le périmètre intégrant la totalité des lignes d'écoulement aboutissant à l'ouvrage de captage. Les lignes d'écoulement représentent la direction d'écoulement de l'eau souterraine.

Une typologie basée sur les caractéristiques géologiques distingue douze types d'aquifères dont six en milieu fracturé et six constitués de dépôts meubles. En milieu fracturé, les caractéristiques typologiques correspondent à l'ouverture, la densité, l'orientation et l'intersection des fractures. Tandis que dans les dépôts meubles, ces caractéristiques correspondent aux faciès sédimentaires et à leur agencement. Tous ces paramètres géologiques influencent la direction et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine.

Dix simulations numériques démontrent les effets engendrés par les caractéristiques géologiques sur les lignes d'écoulement. Un cas de référence dont les caractéristiques géologiques sont homogènes et isotropes, montre une aire d'alimentation de forme parabolique parallèle à la direction d'écoulement régional et ouverte vers l'amont. Dans les neuf autres cas, un ou plusieurs corps géologiques plus perméables, pour lesquels la dimension, l'orientation et la position par rapport à l'ouvrage de captage varient, sont ajoutés au cas de référence. Chaque cas illustre l'effet de la formation géologique plus perméable dans laquelle la vitesse d'écoulement est plus rapide et la direction d'écoulement influencée par l'orientation du corps plus perméable. Ceci démontre que l'estimation de l'aire d'alimentation dépend des caractéristiques géologiques constituant l'aquifère.

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier le directeur et le co-directeur de ce projet, respectivement messieurs Denis W. Roy et Alain Rouleau, pour avoir généreusement partagé avec moi leurs connaissances ainsi que pour les discussions scientifiques, leur disponibilité et l'encouragement qu'ils m'ont donnés. Je remercie également messieurs Pierre Cousineau et Guy Archambault pour la lecture critique de ce mémoire. Je remercie vivement toutes les municipalités qui ont participé à ce projet en me permettant d'accéder à leurs données hydrogéologiques et géologiques. Je remercie le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec qui, par le Programme d'aide à la recherche et au développement en environnement (PARDE), a supporté financièrement ce projet, de même que la Fondation de l'UQAC et Récupère-Sol. Je salue mes collègues Henrik Rasmussen et Michaël Verreault pour le partage d'idées et les discussions constructives. Je remercie Monsieur Claude Dallaire pour sa collaboration et son aide à la réalisation des illustrations. Finalement, je remercie chaleureusement mon amoureux, Louis Grenier, et mes parents, Pauline et Gaëtan, qui m'ont supporté, encouragé et soutenu tout au long de mes études.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	II
REMERCIEMENTS.....	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES ANNEXES	VIII
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 PROBLÉMATIQUE.....	1
1.2 OBJECTIFS.....	10
1.3 PLAN DE TRAVAIL	11
CHAPITRE 2 : CLASSIFICATIONS DES AQUIFÈRES	13
2.1 CLASSIFICATIONS CONVENTIONNELLES.....	14
2.1.1 <i>Classification des aquifères d'après le type de porosité.....</i>	14
2.1.2 <i>Classification des aquifères selon le degré de confinement.....</i>	16
2.1.3 <i>Utilité de ces classifications pour l'estimation de l'aire d'alimentation ...</i>	18
2.2 CLASSIFICATION DES AQUIFÈRES INTÉGRANT LES CONNAISSANCES	
GÉOLOGIQUES – EXEMPLE DE LA FRANCE	19
2.3 CLASSIFICATION DES AQUIFÈRES INTÉGRANT LES CONNAISSANCES	
GÉOLOGIQUES – CLASSIFICATION GÉNÉRALE	22
2.3.1 <i>Aquifères en milieux fracturés</i>	23
2.3.2 <i>Aquifères constitués de dépôts meubles.....</i>	24
2.4 COMPARAISON DES CLASSIFICATIONS	26
CHAPITRE 3 : TYPES D'AQUIFÈRES EXPLOITÉS DANS LE QUÉBEC MÉRIDIONAL	28
3.1 TYPES D'AQUIFÈRES EXPLOITÉS EN MILIEU FRACTURÉ	30
3.1.1 <i>Type F1 : zones de fracturation dans la partie supérieure du roc</i>	32
3.1.2 <i>Type F2 : réseaux orthogonaux formés de jeux de diaclases et de paraclases.....</i>	33
3.1.3 <i>Type F3 : fractures induites par la mise en place des Montérégien...es</i>	35
3.1.4 <i>Type F4 : fractures variables dans la Formation de Cap-aux-Meules aux Iles-de-la-Madeleine</i>	36

3.1.5 Type F5 : failles de chevauchement au contact entre les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches	36
3.1.6 Type F6 : fractures associées aux plis et aux failles des roches compétentes.....	37
3.2 TYPES D'AQUIFÈRES CONSTITUÉS DE DÉPÔTS MEUBLES.....	39
3.2.1 Type P1 : moraine d'ablation	42
3.2.2 Type P2 : moraine frontale.....	44
3.2.3 Type P3 : esker.....	46
3.2.4 Type P4 : dépôt d'épandage fluvio-glaciaire	47
3.2.5 Type P5 : dépôts alluviaux	51
3.2.6 Type P6 : delta post-glaciaire	53
3.3 PRINCIPAUX RÉSULTATS ET LIMITES DE LA TYPOLOGIE	55
CHAPITRE 4 : FACIÈS HYDROGÉOLOGIQUES ET MODÈLES CONCEPTUELS	59
4.1 FACIÈS SÉDIMENTAIRE, HYDROSTRATIGRAPHIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE	59
4.2 FACIÈS HYDROGÉOLOGIQUES PRÉSENTS DANS LES AQUIFÈRES FRACTURÉS EXPLOITÉS AU QUÉBEC	62
4.3 IDENTIFICATION DES FACIÈS HYDROGÉOLOGIQUES DES AQUIFÈRES CONSTITUÉS DE DÉPÔTS MEUBLES.....	64
4.3.1 Faciès sédimentaires de Miall (1977, 1984, 1992).....	65
4.3.2 Exemple montrant la relation entre faciès sédimentaires et faciès hydrogéologiques	70
4.4 CONSTRUCTION DES MODÈLES CONCEPTUELS	76
4.5 ÉLABORATION D'UN MODÈLE CONCEPTUEL D'AQUIFÈRE : EXEMPLE DE L'AQUIFÈRE EXPLOITÉ À LATERRIÈRE AU SAGUENAY – LAC-SAINT-JEAN	78
4.5.1 Description du site à l'étude	78
4.5.2 Identification du contexte géologique	79
4.5.3 Identification du type d'aquifère exploité à Laterrière	82
4.5.4 Modèle conceptuel	82
CHAPITRE 5 : INFLUENCE D'UN CORPS PLUS PERMÉABLE LORS DE L'ESTIMATION DE L'aire D'ALIMENTATION.....	85
5.1 BRÈVE DESCRIPTION DU LOGICIEL DE SIMULATION NUMÉRIQUE MODFLOW	86
5.2 RÉSULTATS DE SIMULATIONS NUMÉRIQUES	87
5.2.1 Cas 1 : aquifère homogène et isotrope	88
5.2.2 Cas 2 : introduction d'un cordon plus perméable parallèle à l'écoulement régional	93
5.2.3 Cas 3 : introduction d'un cordon plus perméable à 30° par rapport à la direction de l'écoulement régional	95
5.2.4 Cas 4 : introduction d'un cordon plus perméable à 45° par rapport à la direction de l'écoulement régional	96
5.2.5 Cas 5 : introduction d'un cordon plus perméable à 60° par rapport à la direction de l'écoulement régional	100

5.2.6 Cas 6 : introduction d'un cordon plus perméable perpendiculaire à la direction de l'écoulement régional	102
5.2.7 Cas 7 : introduction de trois cordons plus perméables à 45° de la direction de l'écoulement régional.....	102
5.2.8 Cas 8 : introduction d'une succession de cordons plus perméables à 45° de la direction de l'écoulement régional.....	105
5.2.9 Cas 9 : introduction d'un large cordon plus perméable à 45° de la direction de l'écoulement régional situé à côté de l'ouvrage de captage	107
5.2.10 Cas 10 : introduction d'un large cordon plus perméable à 45° de la direction de l'écoulement régional situé à la même hauteur que l'ouvrage de captage	107
5.3 DISCUSSION SUR LES RÉSULTATS DES SIMULATIONS.....	110
CHAPITRE 6 : DISCUSSION	114
6.1 IDENTIFICATION DU TYPE D'AQUIFÈRE EXPLOITÉ	115
6.2 UTILISATION DE LA TYPOLOGIE ÉLABORÉE AU CHAPITRE 3	116
6.3 APPLICATION DE LA TYPOLOGIE À DES CAS RÉELS	117
6.3.1 <i>Identification des faciès hydrogéologiques.....</i>	117
6.3.2 <i>Construction d'un modèle conceptuel et conversion en modèle numérique</i>	118
6.4 INFLUENCE DE L'INTRODUCTION D'UN FACIÈS PLUS PERMÉABLE SUR L'ESTIMATION DE L'AIRE D'ALIMENTATION.....	120
CHAPITRE 7 : CONCLUSION.....	122
RÉFÉRENCES.....	125

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Vue en plan de l'aire d'alimentation de forme parabolique.....	4
Figure 1.2: Réseaux de fractures et leur aire d'alimentation	9
Figure 2.1: Porosité primaire et secondaire	15
Figure 2.2: Types d'aquifère classifiés d'après leur degré de confinement.....	19
Figure 3.1: Localisation des aquifères fracturés et de ceux constitués de dépôts meubles utilisés pour élaborer la typologie.....	29
Figure 3.2: Distribution des types d'aquifères fracturés	32
Figure 3.3: Systèmes de paraclases et de diaclases	35

Figure 3.4: Failles et fentes de traction formées lors de plissement.....	38
Figure 3.5: Failles normale, de chevauchement et en décrochement	38
Figure 3.6: Relais et rampes en échelon.....	39
Figure 3.7: Distribution des types d'aquifère constitué de dépôts meubles.....	41
Figure 3.8: Moraine d'ablation.....	43
Figure 3.9: Moraine frontale	45
Figure 3.10: Esker.....	47
Figure 3.11: Vue en coupe d'une traînée de vallée.....	48
Figure 3.12: Dépôt d'épandage sub-aquatique	49
Figure 3.13: Dépôt d'épandage sub-aérien.....	50
Figure 3.14: Cône d'alluvions.....	52
Figure 3.15: Dépôt de plaine alluviale	53
Figure 3.16: Dépôt deltaïque à influence fluviale	55
 Figure 4.1: Dépôts d'épandage au Saguenay – Lac Saint-Jean	81
 Figure 5.1: Vue en plan du premier cas illustrant l'aire d'alimentation d'un captage dans un aquifère constitué de dépôts meubles, homogène et isotrope constitué de sable.	92
Figure 5.2: Vue en coupe du premier cas illustrant l'aire d'alimentation d'un captage dans un aquifère constitué de sable.....	93
Figure 5.3: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du deuxième cas ...	97
Figure 5.4: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du troisième cas	98
Figure 5.5: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du quatrième cas ...	99
Figure 5.6: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du cinquième cas. 101	
Figure 5.7: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du sixième cas.....	103
Figure 5.8: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du septième cas ..	104
Figure 5.9: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du huitième cas ...	106
Figure 5.10: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du neuvième cas 108	
Figure 5.11: Vue en plan du résultat de la simulation du dixième cas.....	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Classification des aquifères de France.....	21
Tableau 2.2: Correspondance entre les aquifères classifiés par Lallemand- Barrès et Roux et les grands ensembles aquifères du Québec.....	22

Tableau 3.1: Caractéristiques générales des types d'aquifères fracturés du Québec	56
Tableau 3.2: Caractéristiques générales des types d'aquifère constitué de dépôts meubles du Québec.....	57
Tableau 4.1: Description des faciès hydrogéologiques en milieu fracturé.....	63
Tableau 4.2: Codes utilisés pour identifier les faciès sédimentaires	67
Tableau 4.3: Noms et définitions des vingt-trois faciès sédimentaires	67
Tableau 4.4: Classification des faciès sédimentaires selon Miall	69
Tableau 4.5: Conductivités hydrauliques et porosité des faciès hydrogéologiques	73
Tableau 4.6: Faciès hydrogéologiques définis à partir des faciès sédimentaires..	74
Tableau 5.1: Dimensions de l'aire d'alimentation calculée par les équations analytiques	90

LISTE DES ANNEXES

Annexe I: Classification des aquifères en milieu fracturé	137
Annexe II: Classification des aquifères constitués de dépôts meubles	142
Annexe III: Compilation des aquifères exploités en milieu fracturé dans le Québec méridional.....	145
Annexe IV: Compilation des aquifères exploités dans les dépôts meubles dans le Québec méridional.....	150

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Ce chapitre présente la problématique de cette étude traitant de l'importance de l'intégration de l'information géologique qui influence la direction et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine, deux paramètres nécessaires à l'estimation d'aire d'alimentation de captage d'eau souterraine. L'énoncé des objectifs général et spécifiques du projet suit. Finalement, le plan de travail est décrit, il intègre la méthodologie et présente la séquence des chapitres.

1.1 Problématique

L'eau souterraine est utilisée à travers le monde pour l'alimentation en eau potable. Au Québec, plusieurs municipalités et industries exploitent cette ressource et la qualité naturelle de l'eau souterraine est généralement plus près des normes de potabilité que celle des eaux de surface. Le règlement sur le captage des eaux

souterraines est en vigueur depuis 2003 (MDDEP, 2003). Ce règlement a resserré les normes de potabilité de l'eau ainsi que le contrôle de la qualité de l'eau potable. Ce resserrement concerne notamment la turbidité et les trihalométhanes qui contribuent à diminuer la qualité de l'eau potable. La turbidité se définit par la quantité de matières en suspension retrouvées dans l'eau et caractérise principalement les eaux de surface. L'utilisation de l'eau souterraine permet de remédier à ce problème. Quant aux trihalométhanes, ils résultent de l'interaction chimique du chlore avec la matière organique lorsque l'eau contenant de la matière organique doit être traitée. Comme pour le cas de la turbidité, la matière organique se retrouve surtout dans les eaux de surface, occasionnellement dans les eaux souterraines.

Cependant, la ressource en eau souterraine est fragile et, dans bien des cas, vulnérable à la contamination si sa protection est négligée. Les méthodes de protection autour d'ouvrages de captage permettent de contrôler, voire même prohiber, les activités propices à la contamination de l'eau souterraine captée (MDDEP, 2003). Au Québec, trois aires de protection distinctes contribuent à protéger les nappes exploitées : protection immédiate, protection rapprochée et protection éloignée. L'aire de protection immédiate consiste en un périmètre protégé d'un rayon d'au moins 30 mètres autour du puits. À l'intérieur de ce périmètre, seules les installations de pompage sont permises, une clôture ferme le périmètre et toutes autres activités que le pompage y sont prohibées. L'aire de

protection rapprochée se détermine par le temps de migration nécessaire pour que l'eau soit exempte de bactéries et virus lorsqu'elle est captée par le puits. L'aire de protection bactériologique requiert un temps de migration d'au moins 200 jours et la protection virologique au moins 550 jours. L'aire de protection éloignée correspond à l'aire d'alimentation de l'ouvrage de captage. Selon Rasmussen *et al.* (2006), l'aire d'alimentation correspond à la portion du territoire sur laquelle l'eau qui s'infiltre arrive tôt ou tard à l'ouvrage de captage. Diverses méthodes existent pour estimer l'aire d'alimentation (Rasmussen *et al.*, 2006) : le rayon fixe arbitraire, le rayon calculé, la cartographie hydrogéologique, les équations analytiques simples et les modèles numériques.

Pour un aquifère homogène et isotrope contenant une nappe captive, l'aire d'alimentation peut être estimée à partir d'équations analytiques simples développées par Bear et Jacobs (1965). Ces équations sont présentées plus loin dans ce chapitre et sont identifiées par les numéros 1, 2 et 3. L'utilisation de ces équations nécessite de connaître l'épaisseur de l'aquifère, la perméabilité moyenne et le gradient hydraulique (Figure 1.1). L'aire d'alimentation estimée à partir de ces équations correspond à sa plus simple expression. Elle est de forme parabolique et l'extrémité en amont est délimitée par la ligne de partage des eaux.

Trois équations permettent de calculer les paramètres de l'aire d'alimentation Bear et Jacobs (1965). Les dimensions de base correspondent à la longueur (L) et au temps (T).

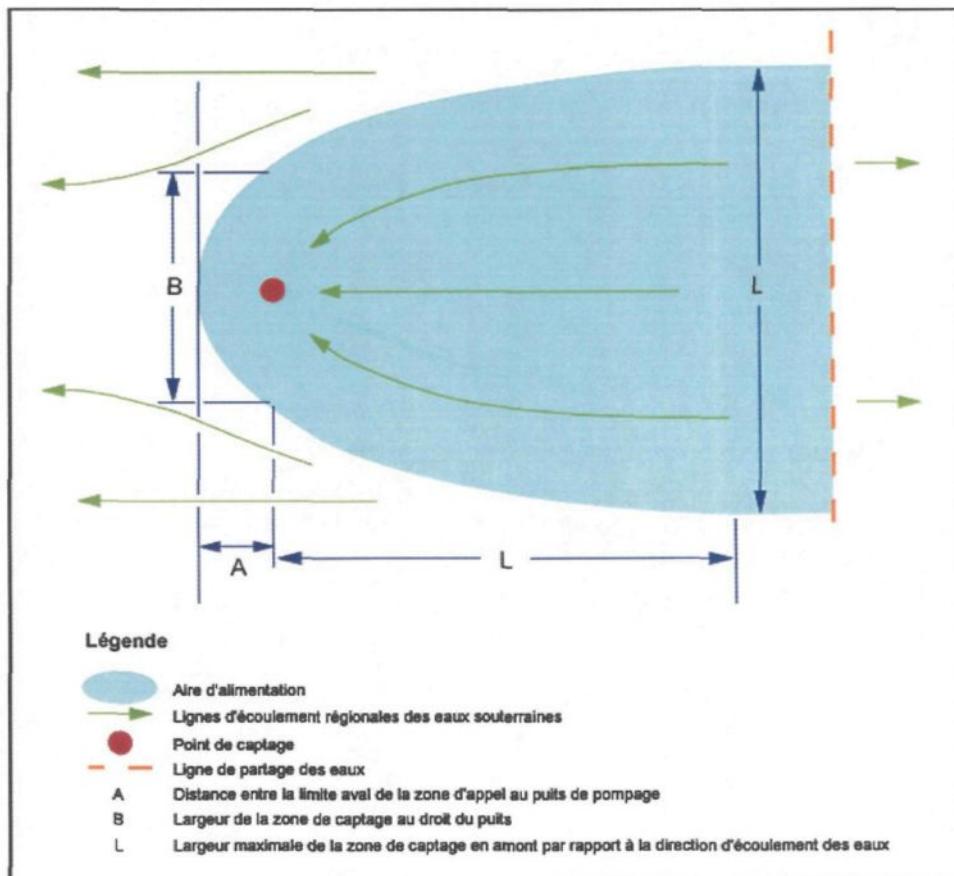


Figure 1.1: Vue en plan de l'aire d'alimentation de forme parabolique calculée à partir des équations de Bear et Jacobs (1965 ; figure modifiée de MENV, 1995).

$$[1] \quad A = \frac{Q}{2\pi K b i}$$

où A : distance à la limite aval de la zone d'appel au puits de pompage [L].

Q : débit de pompage [L^3/T]

K : conductivité hydraulique régionale [L/T]

b : épaisseur saturée de la formation aquifère [L]

i : gradient hydraulique régional [sans dimension]

$$[2] \quad L = \frac{Q}{K b i}$$

où L : largeur maximale de la zone de captage en amont par rapport à la direction d'écoulement des eaux [L]

$$[3] \quad B = \frac{L}{2}$$

où B : largeur de la zone de captage au niveau du puits [L]

Cette méthode considère un aquifère à nappe confinée, homogène, isotrope, d'épaisseur constante et d'étendue latérale infinie. Cependant, pour un grand nombre d'aquifères, les paramètres hydrogéologiques sont hétérogènes et anisotropes. Par conséquent, pour utiliser cette méthode, l'aquifère réel doit être simplifié en un aquifère équivalent dont les paramètres hydrogéologiques sont

homogènes et isotropes. Alors, l'aire d'alimentation estimée peut être très différente de l'aire d'alimentation réelle.

La direction et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine sont influencées par la nature et la disposition des matériaux géologiques formant l'aquifère. De ce fait, une bonne estimation d'aire d'alimentation doit considérer un modèle conceptuel d'aquifère représentatif de l'aquifère réel en considérant l'hétérogénéité et l'anisotropie

L'anisotropie du milieu aquifère se définit par la variation des valeurs d'une propriété en fonction de la direction en un même point. L'hétérogénéité du milieu aquifère se définit par la variation d'un paramètre hydrogéologique d'un point à un autre.

La méthode préconisée pour estimer l'aire d'alimentation devrait intégrer les caractéristiques géologiques dans le but de considérer l'hétérogénéité et l'anisotropie d'un aquifère, et ce, autant dans les dépôts meubles que les milieux fracturés.

Les paramètres hydrogéologiques des aquifères constitués de dépôts meubles sont contrôlés par des éléments texturaux, structuraux et géométriques des dépôts. De façon générale, la texture d'un dépôt se caractérise par : 1) la

granulométrie et les propriétés granulométriques notamment la forme, l'arrondi et le tri ; 2) la couleur et 3) la fabrique, c'est-à-dire l'agencement des grains. La structure correspond à l'agencement des grains en trois dimensions, ce qui reflète un mode de sédimentation particulier. Un faciès sédimentaire correspond à une portion du dépôt qui se distingue par ses propriétés texturales et structurales. La géométrie du dépôt correspond à l'assemblage de faciès. La combinaison d'assemblages de faciès permet d'identifier un modèle de faciès qui mène à l'identification du type d'environnement de dépôt.

Ces caractéristiques sédimentaires contrôlent la direction et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine à différentes échelles. La texture influence l'écoulement à une échelle millimétrique à centimétrique et la structure à une échelle centimétrique à métrique. La perméabilité du dépôt dépend de la texture et de la structure. Les faciès contrôlent l'écoulement à une échelle centimétrique à décamétrique et les assemblages de faciès à l'échelle métrique et décamétrique. Le modèle de faciès contrôle l'écoulement à l'échelle hectométrique à kilométrique. L'ensemble de ces caractéristiques contrôle donc à différentes échelles : 1) la direction et la vitesse des lignes d'écoulement ; 2) les gradients hydrauliques horizontal et vertical ; 3) la quantité d'eau contenue dans l'aquifère et 4) la dimension de l'aire d'alimentation. Les limites du dépôt sont également très importantes lors de l'estimation de l'aire d'alimentation. Si les limites sont

imperméables ou à charge constante, l'aire d'alimentation n'aura pas la même forme.

La perméabilité dépend de la porosité primaire du milieu et des liens entre les pores qui permettent la circulation de l'eau. En hydrogéologie, deux types de porosité caractérisent les aquifères : la porosité primaire et la porosité secondaire. La porosité primaire correspond aux vides qui se trouvent entre les composantes de la matrice. La porosité secondaire correspond aux vides à l'intérieur des fractures. Il est important de ne pas confondre ces définitions de la porosité avec d'autres définitions valides dans d'autres domaines de la géologie. Par exemple, en sédimentologie, la porosité primaire est celle qui se forme au moment de la mise en place du dépôt ; la porosité secondaire est postérieure à cette mise en place, elle inclut autant la porosité intergranulaire que la porosité de fracture.

L'estimation de l'aire d'alimentation d'un aquifère en milieu fracturé est influencée principalement par les caractéristiques du système de fractures. Dans les massifs rocheux, les deux types de porosité se distinguent. Les caractéristiques du système de fractures telles la géométrie des fractures (dimension et orientation), leur densité ainsi que leur perméabilité doivent être prises en considération lors de l'estimation d'aire d'alimentation (Bradbury et Muldoon, 1994). Ces caractéristiques influencent beaucoup la géométrie de l'aire d'alimentation (Figure 1.2).

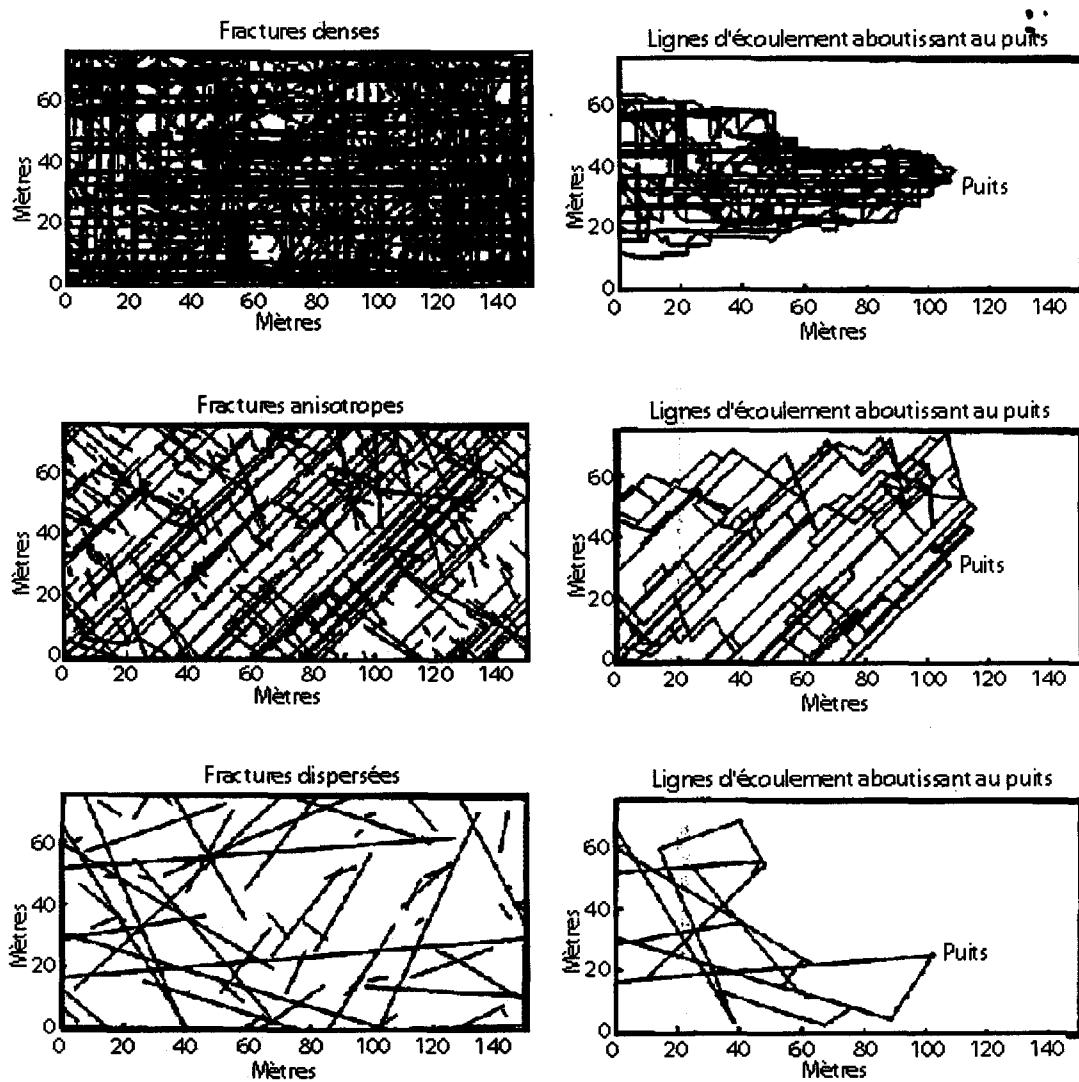


Figure 1.2: Réseaux de fractures (à gauche) et leur aire d'alimentation (à droite) où l'écoulement régional s'effectue de la gauche vers la droite (modifiée de Bradbury et Muldoon, 1994).

Quant aux réseaux karstiques (Back et al., 1992), en plus de présenter la même problématique que pour les réseaux fracturés, la perméabilité des fractures varie énormément à cause des différentes largeurs et cavité que la dissolution entraîne. Ainsi, l'ouverture des fractures varie de fermée jusqu'à des fractures « tubulaires » d'ordre métrique et même polymétrique.

1.2 Objectifs

L'objectif général du projet est de présenter une démarche pratique pour estimer le plus exactement possible l'aire d'alimentation de captages d'eau souterraine intégrant les facteurs géologiques responsables de la circulation de l'eau souterraine dans un aquifère. Les objectifs spécifiques ci-après détaillent les étapes logiques de réalisation:

- produire un inventaire des aquifères exploités comme source d'eau potable au Québec pour confectionner une typologie de ces derniers ;
- proposer une démarche d'identification du type de formation géologique aquifère et d'identification des particularités locales potentiellement importantes pour la délimitation d'aires d'alimentation ;
- démontrer par des cas simples l'importance d'intégrer les connaissances géologiques à l'estimation d'aire d'alimentation.

1.3 Plan de travail

Pour arriver à élaborer une démarche d'estimation de l'aire d'alimentation de captages d'eau souterraine intégrant les facteurs géologiques responsables de la direction et de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine, il faut répondre aux deux questions suivantes :

1. Quels types d'aquifères sont exploités au Québec ?
2. Quels facteurs géologiques influencent l'écoulement de l'eau souterraine pour chacun de ces types d'aquifère ?

Afin d'y répondre, il faut définir quels types d'aquifères sont exploités au Québec. Pour ce faire, un inventaire le plus complet possible est dressé à partir des données disponibles. Cet inventaire est l'outil de base pour l'élaboration d'une typologie des aquifères basée sur les facteurs géologiques influençant l'écoulement de l'eau souterraine. Des modèles conceptuels inspirés de cette typologie sont construits et sont utiles à l'identification efficace des particularités géologiques à considérer dans l'estimation de l'aire d'alimentation. Finalement, des simulations numériques sont effectuées sur des cas simples. Les résultats démontrent que les facteurs géologiques qui influencent l'écoulement de l'eau souterraine peuvent faire varier la géométrie de l'aire d'alimentation estimée, dépendant de leur situation par rapport à l'ouvrage de captage.

Ce mémoire se divise en sept chapitres incluant ce premier qui constitue l'introduction. Le second présente quelques classifications d'aquifère provenant de différents auteurs et le troisième énumère les types d'aquifère exploités au Québec en milieux fracturé et constitués de dépôts meubles. Le quatrième traite des faciès hydrogéologiques et des modèles conceptuels. Le cinquième montre les résultats d'une dizaine de simulations numériques pour lesquelles l'aire d'alimentation est estimée. Finalement les sixième et septième chapitres exposent respectivement la discussion et la conclusion de l'étude.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATIONS DES AQUIFÈRES

Les classifications conventionnelles discriminent les aquifères selon le type de matériau géologique, la perméabilité ou le degré de confinement. Lorsque l'aquifère est exploité et que l'aire d'alimentation de l'ouvrage de captage doit être estimée, une classification plus pointue et plus appropriée qui intègre l'information géologique influençant la direction et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine doit être utilisée. Ce chapitre présente les classifications conventionnelles, ainsi que deux classifications qui intègrent l'information géologique dont une élaborée à partir des aquifères français et l'autre pour classifier les aquifères susceptibles d'être exploités au Québec.

2.1 Classifications conventionnelles

Selon plusieurs auteurs de manuels d'hydrogéologie reconnus (Freeze et Cherry, 1979 ; Todd, 1980 ; Fetter, 1994 ; Banton et Bangoy, 1999), les aquifères se classent selon le type de pore caractérisant les corps géologiques aquifères tels les dépôts meubles, les roches sédimentaires poreuses, les massifs rocheux fracturés ou les systèmes karstiques. Les aquifères se distinguent également suivant leur degré de confinement qui peut varier d'un endroit à un autre à l'intérieur d'un même aquifère.

2.1.1 Classification des aquifères d'après le type de porosité

Deux types de porosité sont présents dans les formations géologiques aquifères (Figure 2.1). La porosité primaire correspond aux vides entre les composantes de la matrice, que ce soit des cristaux ou des grains. La porosité secondaire correspond aux systèmes de fractures ou karstiques d'un massif rocheux. Les roches susceptibles de posséder une bonne porosité primaire sont celles qui résultent de la consolidation de sédiments pulvérulents. Selon le processus de sédimentation et le ciment composant la roche, celle-ci est plus ou moins poreuse.

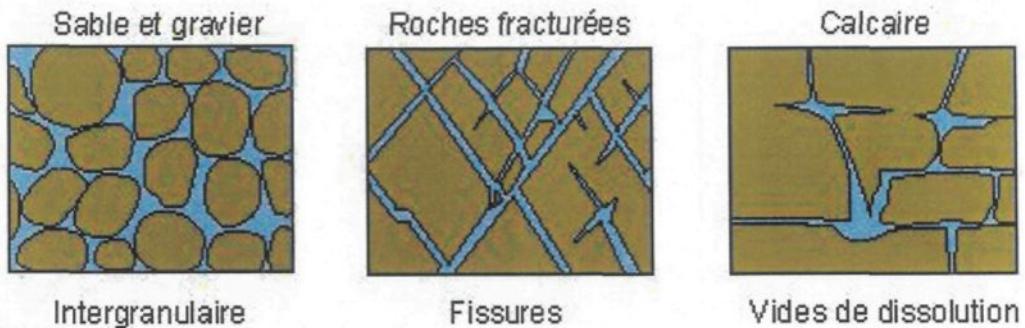


Figure 2.1: Porosité primaire (figure de gauche) et secondaire (figures du centre et de droite; modifiées de Banton et Bangoy, 1999). Les trois illustrations ne sont pas à la même échelle, la figure de gauche est à plus grande échelle par rapport aux figures du centre et de droite.

Les aquifères à porosité primaire correspondent principalement à des dépôts meubles. Les roches sédimentaires poreuses peuvent également appartenir à cette classe mais il faut considérer qu'elles peuvent également être fracturées et avoir deux types de porosité effective. La classe d'aquifère constitué de dépôts meubles se distingue par la dimension des pores entre les constituantes de la matrice et les liens entre ces pores qui favorisent l'écoulement de l'eau (Freeze et Cherry, 1979 ; Todd, 1980 ; Fetter, 1994 ; Banton et Bangoy, 1999).

Les aquifères dont le principal apport en eau provient du réseau de fractures sont considérés comme des aquifères fracturés. En milieu fracturé, les deux types

de porosité sont présents mais c'est essentiellement la porosité secondaire qui contrôle l'écoulement (Sylvestre, 1981). Il en est de même pour les systèmes karstiques dont l'ouverture des fractures est généralement plus élevée que celle des massifs rocheux fracturés à cause de l'élargissement des fractures par dissolution des carbonates (Trenhaile, 1998). En plus de l'ouverture des fractures, trois autres facteurs importants influencent la porosité efficace de fracture dans l'aquifère : la densité des fractures, l'orientation des jeux des fractures et la longueur des fractures. Ces trois caractéristiques déterminent le degré de recouplement entre les fractures (Bradbury et Muldoon, 1994).

2.1.2 Classification des aquifères selon le degré de confinement

Indépendamment du milieu géologique de l'aquifère, trois classes d'aquifère se distinguent selon le type de nappe phréatique qu'ils contiennent : 1) un aquifère non-confiné contient une nappe libre; 2) un aquifère confiné contient une nappe captive et 3) un aquifère semi-confiné contient une nappe semi-captive.

Un aquifère non-confiné (Figure 2.2) se caractérise par une couche à perméabilité élevée qui affleure à la surface du terrain et s'étend jusqu'à la limite inférieure de l'aquifère. La nappe qu'il contient est libre et se recharge par l'infiltration verticale des eaux de surface (Todd, 1980; Banton et Bangoy, 1999). Trois facteurs contrôlent la quantité d'eau contribuant à la recharge (Fetter, 1994) :

1) la quantité d'eau météorique disponible pour la recharge; 2) la conductivité hydraulique verticale des dépôts de surface et des autres couches situées au-dessus du toit de la nappe et 3) la transmissivité et le gradient hydraulique utilisés pour déterminer la quantité d'eau provenant de l'infiltration. Dans ce type d'aquifère, l'élévation du toit de la nappe phréatique varie dans l'espace et dans le temps.

Un type particulier de nappe contenue dans un aquifère non-confiné est la nappe perchée (Figure 2.2) qui est retenue par une lentille imperméable qui, située à l'intérieur d'un aquifère non-confiné, retient une partie de la recharge. Cette nappe s'écoule ensuite par les bordures de la couche imperméable ou par infiltration verticale vers le bas au travers de cette couche pour rejoindre la nappe principale de l'aquifère.

Un aquifère semi-confiné se caractérise par une couche de surface aquiclude. La recharge de la nappe se fait verticalement lorsque la couche aquifère rejoint la surface et/ou par infiltration verticale à travers la couche aquiclude, de la même façon que pour les aquifères confinés.

Une nappe captive remplit complètement et à saturation un aquifère situé sous une couche aquitard (Figure 2.2). La recharge s'effectue verticalement lorsque l'aquifère apparaît en surface et/ou par percolation très lente à travers la

couche aquiclude. Lorsqu'il y a des zones de recharge où l'aquifère apparaît en surface, la recharge est contrôlée par les trois mêmes facteurs que pour la recharge d'une nappe libre. L'élévation du toit de la nappe phréatique peut se trouver plus élevée que la limite supérieure de l'aquifère, alors la nappe est soumise à des conditions artésiennes. Ces conditions sont moins fréquemment rencontrées dans les climats arides où la quantité d'eau disponible à la recharge potentielle est moindre, de ce fait le niveau du toit de la nappe est moins élevé (Fetter, 1994).

2.1.3 Utilité de ces classifications pour l'estimation de l'aire d'alimentation

La classification conventionnelle discrimine les aquifères selon le type de porosité et le degré de confinement. Ces classifications considèrent de grands ensembles géologiques mais n'intègrent pas les différents faciès sédimentaires pour les dépôts meubles, ni les caractéristiques des réseaux de fractures pour les massifs rocheux.

Une classification basée sur les particularités géologiques influençant l'écoulement de l'eau souterraine est un outil de base à l'estimation de l'aire d'alimentation d'un ouvrage de captage.

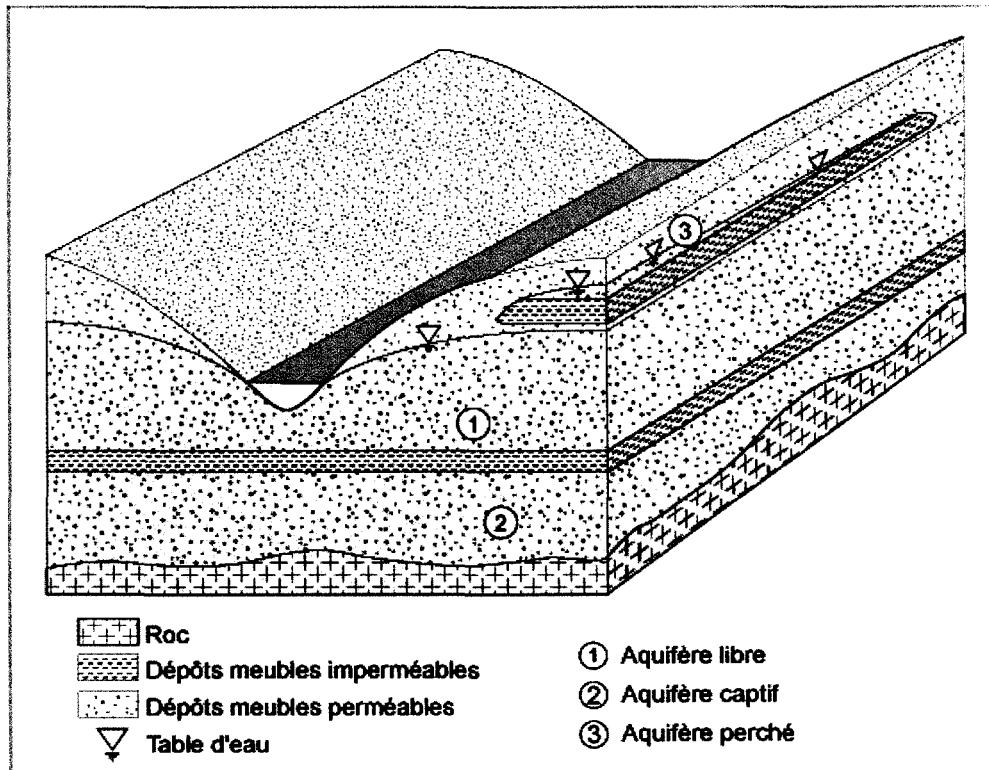


Figure 2.2 : Types d'aquifère classifiés d'après leur degré de confinement (tirée de Verreault et al., 2006).

2.2 Classification des aquifères intégrant les connaissances géologiques – exemple de la France

Lallemand-Barrès et Roux (1999) présentent une classification des principaux aquifères de France selon les milieux géologiques identifiés sur ce territoire. Cette classification s'intègre dans un ouvrage dédié aux périmètres de

protection des captages d'eau souterraine. Une typologie des principaux systèmes aquifères de France est établie à partir de critères liés à la nature lithologique de l'aquifère tels que les structures, l'ordre de grandeur de la perméabilité et les conditions de surface de l'aquifère.

Six classes d'aquifères sont identifiées selon les caractéristiques géologiques des aquifères de France (Tableau 2.1). Bien que cette classification soit appliquée aux aquifères du territoire français, elle présente de grands ensembles géologiques constituants plusieurs aquifères sur d'autres territoires.

Tableau 2.1: Classification des aquifères de France (d'après Lallemand-Barrès et Roux, 1999).

Classes d'aquifères		Milieu géologique	Caractéristiques hydrogéologiques	Localisation
Bassins sédimentaires	Grands aquifères monocouches à nappe libre	Roches carbonatées (craie, calcaire).	Vitesses d'écoulement variables. Une fissuration peut coexister avec la porosité.	Les nappes les plus importantes sont celles des aquifères de la craie dans le Nord de la France et une grande partie du bassin de Paris (Normandie, Picardie, Champagne, Sénonnaïs), la nappe de la Beauce et la nappe des sables des Landes.
	Aquifères stratifiés complexes	Sédiments tertiaires, variés et hétérogènes.	Nappe supérieure libre; plusieurs nappes semi-captives en profondeur.	Ces nappes appartiennent aux régions centrales des bassins de Paris et d'Aquitaine.
	Grands aquifères captifs profonds	Aquifères sableux ou gréseux, parfois carbonatés (calcaire carbonifère du Nord).	Réservoirs des nappes artésiennes classiques qui se retrouvent à de grandes profondeurs.	Les principales nappes sont : la nappe des sables verts du bassin de Paris, la nappe des grès du Trias inférieur de Lorraine, la nappe du calcaire carbonifère de la région de Lille et la nappe inframolassique dans le bassin Aquitain.
Aquifères alluviaux		Sables et graviers déposés au fond des vallées.	Nappe libre; localement captive dans les basses vallées non loin des embouchures.	Les plus importants aquifères sont ceux des vallées des grands fleuves : Seine, Meuse et Moselle, Rhin, Loire et Allier, Saône, Rhône, Durance, Var.
Massifs anciens		Terrains cristallins et schisteux fracturés à divers degrés.	Aquifères discontinus. Sources à faibles débits mais nombreuses et assez régulières.	
Régions karstiques		Vastes plateaux calcaires plus ou moins karstiques, parfois gréseux.	Aquifères compartimentés mais assez nombreux; ils sont d'étendue moyenne.	Ces aquifères se situent en bordure des massifs anciens ou des chaînes de montagnes (Alpes, Préalpes et Pyrénées), à la périphérie des grands bassins sédimentaires : de la Lorraine à la Bourgogne, au Berry et au Poitou; du Quercy aux Causses du Sud du Massif central, aux garrigues du Languedoc et à la Haute Provence (plateaux du Vaucluse et du Verdon).

Cette classification se distingue d'abord à partir des caractéristiques géologiques observées et, de ce fait, des similitudes existent entre les aquifères de cette classification et ceux exploités au Québec. Les corrélations possibles sont les suivantes :

Tableau 2.2: Correspondance entre les aquifères classifiés par Lallemand-Barrès et Roux et les grands ensembles aquifères du Québec.

Classification de Lallemand-Barrès et Roux (1999)		Grands ensembles aquifères du Québec
Bassins sédimentaires	Grands aquifères monocouches à nappe libre	Aquifères fracturés dans les Basses-Terres du Saint-Laurent
	Aquifères stratifiés complexes	
Aquifères alluviaux	Aquifères de dépôts post-glaciaires	
Massifs anciens	Aquifères fracturés dans le Bouclier canadien et les Appalaches	
Régions karstiques	Aquifère karstique de l'île d'Anticosti	

2.3 Classification des aquifères intégrant les connaissances géologiques – classification générale

Une autre classification des types d'aquifère est présentée par Roy et al. (2006). Cette classification est également basée sur l'intégration des connaissances géologiques tant pour les aquifères en milieu fracturé que ceux

constitués de dépôts meubles. La structure interne de l'aquifère considère l'arrangement des fractures dans un massif rocheux incluant les systèmes karstiques ou les différents faciès sédimentaires observés dans les dépôts meubles. Cette typologie est proposée pour faciliter l'identification d'hétérogénéité et d'anisotropie de l'écoulement souterrain dans les aquifères susceptibles d'être exploités au Québec, mais elle ne s'applique pas qu'à ce territoire.

2.3.1 Aquifères en milieux fracturés

Les milieux fracturés pouvant présenter de bons potentiels aquifères sont :

1) les systèmes de paraclases et de diaclases (Tableau 1, annexe I) ; 2) les réseaux de fractures formés lors du plissement (Tableau 2, annexe I) ; 3) les réseaux de fractures associés aux failles (Tableau 3, annexe I); 4) les réseaux de fractures associés aux roches ignées et métamorphiques (Tableau 4, annexe I). Les tableaux de l'annexe I présentent les caractéristiques physiques et l'anisotropie d'écoulement pour chacune de ces grandes familles d'aquifère.

Lorsque des couches de roches compétentes et ductiles se superposent, les fractures des couches compétentes ont tendance à induire une anisotropie de l'écoulement suivant les horizons de roches compétentes et l'orientation des fractures les plus fréquentes.

Les roches solubles, principalement les carbonates, peuvent développer des réseaux karstiques en climat humide et chaud. L'élargissement des fractures par dissolution, préférentiel selon l'importance relative de l'écoulement, tend à accentuer progressivement l'anisotropie des aquifères en milieu carbonaté en concentrant de plus en plus l'écoulement souterrain dans les fractures les plus larges (Trenhaile, 1998). Au Québec, certains réseaux karstiques sont plus ou moins bien développés, notamment la caverne Laflèche en Outaouais, la grotte de Saint-Thérèse-de-Blainville, la grotte de Joliette, la grotte de Saint-Casimir (Corbel, 1958) ainsi que des karsts sur l'île d'Anticosti.

2.3.2 Aquifères constitués de dépôts meubles

Roy et al. (2006) présentent une classification par types de dépôt selon leur environnement et leur mode de formation (glaciaires, d'épandage et post-glaciaires). Au total, quinze types d'aquifère se distinguent sur la base de leur géométrie externe, leur caractéristique de surface, leur architecture interne et leur dimension : moraine frontale, moraine d'ablation, moraine de retrait, esker, terrasse de kame, butte de kame, dépôt de cours d'eau tressé, cône d'alluvions, dépôt d'épandage sub-aquatique, dépôt d'épandage sub-aérien, dépôts alluviaux, delta post-glaciaire, crêtes de plage, cône et talus de roches et de débris et dunes. Ils sont classés dans un tableau à l'annexe II. Ce tableau peut être un outil pour l'identification du type de dépôt aquifère lorsque les dépôts meubles sont peu

connus dans un secteur. En effet, les dépôts meubles du Québec n'ont pas tous été cartographiés et lorsqu'un puits se situe dans un tel secteur où seules les photos aériennes et/ou les investigations de terrain pour la recherche en eau sont disponibles, c'est d'abord la forme externe du dépôt, principalement sa limite supérieure, qui peut être caractérisée et identifiée. En second lieu, des travaux de terrain (cartographie des coupes stratigraphiques et forages) permettent de décrire l'architecture interne de l'aquifère.

La géométrie externe d'un aquifère se définit principalement par les rapports dimensionnels de longueur, de largeur et d'épaisseur d'un dépôt. Quatre géométries se distinguent selon ces critères : le feuillet, le ruban, le cordon et la butte ou le cône. Le feuillet possède une longueur et une largeur qui sont de grande étendue comparativement à son épaisseur qui est moindre d'au moins deux ordres de grandeur. Le ruban possède une grande étendue en longueur et une largeur d'environ un ordre de grandeur plus grand que son épaisseur. Le cordon possède également une grande étendue en longueur mais sa largeur et son épaisseur sont presque équivalentes sinon que la largeur est un peu plus prononcée. La butte, ou le cône, possède une longueur et une largeur qui sont de dimensions semblables tandis que l'épaisseur est légèrement moindre. Les pentes de ces dépôts sont généralement escarpées. L'ensemble des géométries externes décrites peuvent se juxtaposer et se superposer pour former des réseaux d'écoulement complexes à l'intérieur des aquifères.

Pour décrire de façon rigoureuse la géométrie externe, il faut également tenir compte de la texture du dépôt en surface qui peut être régulière, ridée ou bosselée. La surface régulière correspond à une surface non accidentée, plutôt lisse. La surface ridée correspond à des élévations de terrain beaucoup plus larges que longues et parallèles entre elles. La surface bosselée présente des bosses et crêtes distribuées aléatoirement (moraine d'ablation) ou suivant une orientation (champ de dunes). Toutes ces surfaces présentent ou non une pente variant de douce à abrupte.

En plus de la géométrie externe et de la texture de surface, une architecture interne caractérise chaque dépôt. L'architecture interne d'un dépôt s'applique principalement aux relations qu'ont deux ou plusieurs faciès hydrogéologiques entre eux. Cette architecture est principalement qualifiée de massive, stratifiée ou à matrice supportant des chenaux, des lentilles et des croissants. Comme pour la géométrie externe, plusieurs combinaisons d'architecture interne sont possibles.

2.4 Comparaison des classifications

Les classifications conventionnelles se basent sur des critères caractérisant un paramètre hydrogéologique tels le degré de confinement de l'aquifère ou le type de porosité. Ces classifications ne permettent pas d'identifier de possibles

variations à l'intérieur de l'aquifère. Elles considèrent l'aquifère comme un ensemble pour lequel les caractéristiques sont les mêmes en tout point.

Les classifications intégrant les connaissances géologiques considèrent des caractéristiques géologiques variables dans l'espace et qui influencent les paramètres hydrogéologiques à l'intérieur d'un même aquifère.

Lorsque l'estimation de l'aire d'alimentation de captage d'un aquifère est requise, il est fort important de pouvoir identifier les variations géologiques et hydrogéologiques à l'intérieur d'un même aquifère. Dans ce cas, une classification intégrant les connaissances géologiques constitue un outil efficace. C'est à partir de la classification de Roy et al. (2006) que les types d'aquifère exploités au Québec seront classés au chapitre suivant.

CHAPITRE 3 : TYPES D'AQUIFÈRES EXPLOITÉS DANS LE QUÉBEC MÉRIDIONAL

Ce chapitre présente une compilation partielle des municipalités s'alimentant en eau souterraine au Québec. Chaque type d'aquifère exploité correspond à un des types décrits par Roy et al. (2006). Cette classification a été choisie parce qu'elle intègre les caractéristiques géologiques des aquifères et permet d'identifier les hétérogénéités et l'anisotropie de chaque type d'aquifère.

La compilation des rapports d'hydrogéologie appartenant à certaines municipalités s'est déroulée au cours de l'été 2001 jusqu'à l'automne 2002. Ce sont d'abord les municipalités du Saguenay – Lac-Saint-Jean qui ont été sollicitées, puis les autres régions du Québec ont suivi. Autant les aquifères en milieu fracturé que ceux constitués de dépôts meubles ont été répertoriés (Figure 3.1). Pour obtenir la compilation la plus complète possible, un grand nombre de

cartes et de rapports gouvernementaux ont également été consultés. Ce chapitre présente une section sur les types d'aquifères exploités en milieu fracturé et une seconde sur ceux exploités dans les dépôts meubles.

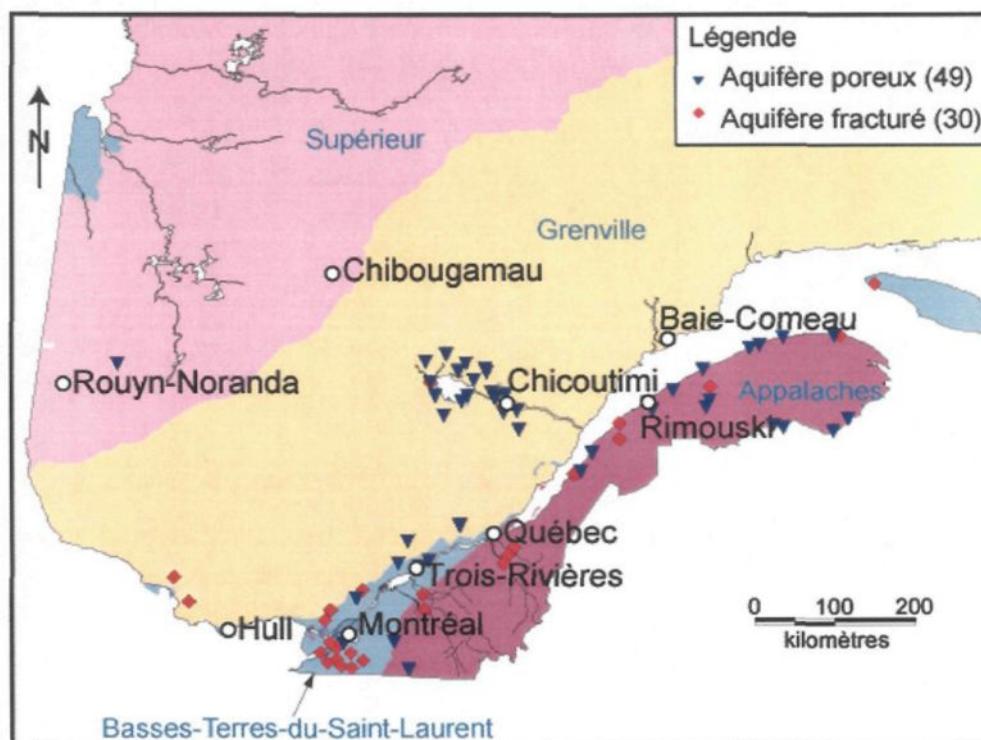


Figure 3.1 : Localisation des aquifères fracturés et de ceux constitués de dépôts meubles utilisés pour élaborer la typologie. Certaines villes sont utilisées comme repère. Les provinces géologiques se distinguent par couleur et le nom de chacune est inscrit en bleu.

Afin d'identifier le type d'aquifère, les caractéristiques géologiques de l'aquifère décrites dans les rapports hydrogéologiques doivent être validées avec

l'information géologique disponible pour le secteur. Ces informations doivent ensuite être corrélées afin d'établir des correspondances et déterminer le type d'aquifère exploité. Cette interprétation sommaire permet, dans la plupart des cas, une convergence de l'information géologique vers un seul type d'aquifère autant en milieu fracturé qu'en dépôt meuble.

3.1 Types d'aquifères exploités en milieu fracturé

Les aquifères en milieu fracturé ont déjà été classifiés par Simard et Des Rosiers (1979) qui les discriminent suivant les lithologies et la moyenne des débits de pompage. Roy et al. (2006) ont valorisé cette classification en y ajoutant les structures internes et les types de fracturation possibles, ce qui a permis d'ajouter trois nouveaux types d'aquifère à cette classification.

Les aquifères en milieu fracturé exploités au Québec qui ont été recensés dans le cadre de la présente étude sont intégrés dans le tableau de l'annexe III. Ce tableau comparatif des aquifères exploités en milieu fracturé au Québec présente une partie de la classification des aquifères en milieu fracturé de Roy et al. (2006) qui se base sur les informations contenues dans le rapport sur la classification des aquifères de Simard et Des Rosiers (1979). Seuls les types d'aquifères pour lesquels un exploitant de la nappe souterraine a été recensé, sont présentés à

l'annexe III. La dernière colonne de ce tableau constitue un élément nouveau qui intègre une liste de quelques municipalités qui exploitent ce type d'aquifère.

De cette compilation, six types d'aquifère exploités dans les milieux fracturés se distinguent et correspondent soit à des patrons de fracturation ou à des contextes géologiques particuliers (Figure 3.2) :

- Type F1 : zones de fracturation dans la partie supérieure du roc ;
- Type F2 : réseaux orthogonaux formés de jeux de diaclases et de paraclases ;
- Type F3 : fractures induites par la mise en place des Montéréggiennes ;
- Type F4 : fractures variables dans la Formation de Cap-aux-Meules aux îles-de-la-Madeleine ;
- Type F5 : failles de chevauchement au contact entre les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches ;
- Type F6 : fractures associées aux plis et aux failles des roches compétentes.

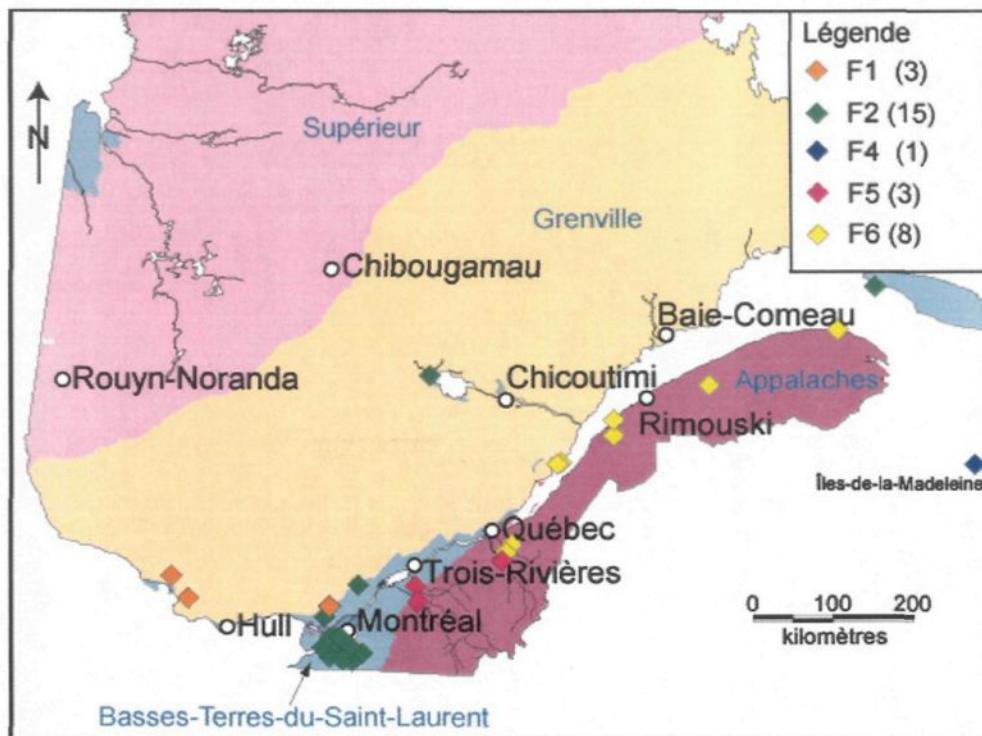


Figure 3.2: Distribution des types d'aquifères fracturés. Certaines villes sont utilisées comme repère. Les provinces géologiques se distinguent par couleur et le nom de chacune est inscrit en bleu. Le type F3 n'apparaît pas sur cette figure parce que d'après les données obtenues il ne semble pas exploité mais il présente toutefois un bon potentiel aquifère.

3.1.1 Type F1 : zones de fracturation dans la partie supérieure du roc

À la lumière des informations compilées dans le tableau de l'annexe III, le premier type d'aquifère exploité en milieu fracturé au Québec correspond à des zones de fracturation situées dans la partie supérieure du roc. L'origine de ces

zones fracturées n'est pas clairement identifiée mais l'une se situe le long d'un linéament important. Les autres aquifères de ce type se situent sous d'épais dépôts meubles et correspondent à une fracturation importante du roc en surface. Cette fracturation diminue très rapidement en profondeur. Ces fractures pourraient notamment être dû au « sheeting » résultant de la décompression suite aux glaciations continentales (Tremblay et al., 2006). Ces aquifères ont un bon potentiel lorsqu'ils sont recouverts d'épais dépôts meubles sus-jacents qui contribuent à leur recharge.

De tels aquifères sont principalement présents dans le Bouclier canadien ; ils ont entre autres été observés en Outaouais (Monerval, 1990) ainsi que dans les Laurentides au nord de Saint-Jérôme (Sylvestre, 1981).

3.1.2 Type F2 : réseaux orthogonaux formés de jeux de diaclases et de paraclases

Le second type d'aquifère exploité en milieu fracturé au Québec correspond aux réseaux de fractures assez denses et bien connectées composés de jeux de paraclases et de diaclases (Figure 3.3) qui caractérisent les unités lithologiques des Basses-Terres du Saint-Laurent les plus compétentes. L'origine de ces fractures est liée à la déformation régionale. Voici les principales unités lithologiques composant ces aquifères :

- 1) les **grès cambriens** du **Groupe de Postdam** sont exploités par plusieurs municipalités de la Montérégie (McCormack, 1981a et 1981b) principalement dans les bassins versants des rivières Châteauguay et Richelieu ;
- 2) les **dolomies ordoviciennes** du **Groupe de Beekmanton** sont également exploitées par bon nombre de municipalités des régions des Laurentides, entre autres Mirabel (Grenier et McCormack, 1987), de Lanaudière et de la Montérégie, principalement dans les bassins versants des rivières Châteauguay et Richelieu ;
- 3) les **calcaires ordoviciens** du **Groupe de Trenton** sont exploités entre autres par les municipalités de Saint-Félicien au Lac Saint-Jean (Verreault, 2003) et de Napierville dans le bassin versant de la rivière Richelieu (McCormack, 1981b) ;
- 4) les **calcaires siluriens** des formations de Becksie, Gun River, Jupiter et Chicotte (Hocq, 1994) observés sur la moitié nord de l'île d'Anticosti sont exploités par la municipalité de Port-Menier (Comm. pers. de Mme Guylaine Lamarre, du MENV Côte-Nord, 2002). Ces calcaires présentent par endroit un réseau karstique développé.

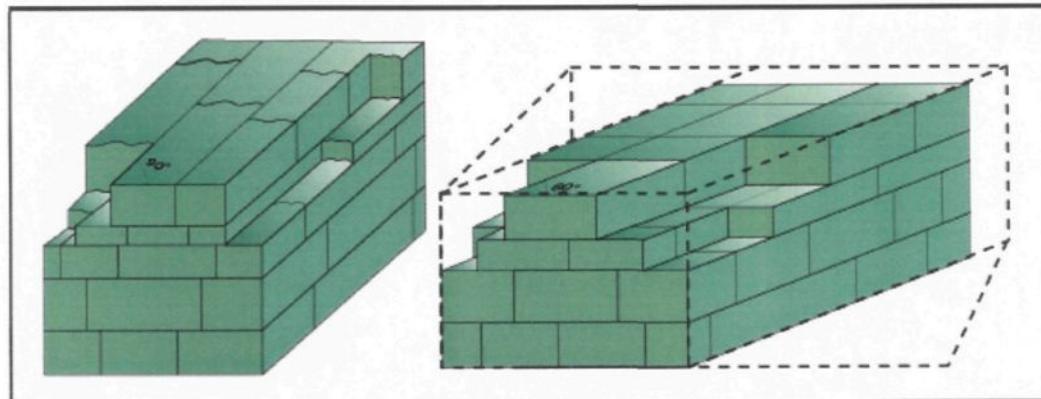


Figure 3.3: Systèmes de paraclases et de diaclases. Le schéma de gauche illustre un cas de diaclases rectangulaire (angle = 90°) tandis que celui de droite montre un cas de diaclases rhomboédriques (angle = 60°; tirée de Roy et al., 2006).

3.1.3 Type F3 : fractures induites par la mise en place des Montérégienennes

Un type d'aquifère particulier se situe en bordure des Montérégienennes où les unités lithostratigraphiques des Basses-Terres du Saint-Laurent ont été fracturées lors de la mise en place de ces intrusions (McCormack, 1981b). Les fractures appartiennent notamment à un réseau orthogonal et proviennent de diverses origines, entre autres de la compression engendrée par la mise en place des intrusions.

3.1.4 Type F4 : fractures variables dans la Formation de Cap-aux-Meules aux Iles-de-la-Madeleine

Aux Iles-de-la-Madeleine, l'eau potable provient exclusivement des eaux souterraines et l'exploitation doit être bien contrôlée pour que les nappes d'eau douce ne soient pas contaminées par les nappes d'eau salées.

La Formation de Cap-aux-Meules constituée de grès rouge et gris-vert est la plus étendue sur les îles et celle qui fournit les meilleurs débits de pompage (Dessureault et Simard, 1970). La perméabilité élevée est sans doute due à la forte densité de fractures dont l'origine est probablement contrôlée par le litage, les changements de faciès, la présence de roches plus compétentes et des diapirs de sels sous-jacents.

3.1.5 Type F5 : failles de chevauchement au contact entre les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches

D'autres bons aquifères fracturés résultent des fractures de chevauchement induites par les nappes de charriage au contact entre les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches (Paré, 1981). Ce type d'aquifère est particulièrement exploité dans les bassins versants des rivières Nicolet et Chaudière.

3.1.6 Type F6 : fractures associées aux plis et aux failles des roches compétentes

Les aquifères fracturés exploités dans les Appalaches sont principalement associés aux plissements (Figures 3.4, 3.5 et 3.6) ainsi qu'aux failles des roches compétentes. Les Appalaches se composent de successions de roches présentant d'importants contrastes de compétence et il est bien connu que les roches plus ductiles accommodent mieux la déformation que les roches plus compétentes. Ceci implique que les couches ductiles constituent des couches à caractère plus aquiclude. Ce type d'aquifère offre donc généralement une perméabilité plus faible que celle des autres types. Les unités lithologiques qui appartiennent à ce type correspondent à des schistes et des mudstones qui sont généralement plus ductiles, ainsi qu'à des grès, des conglomérats et des lits de calcaire qui sont généralement plus compétents. Elles correspondent à des séquences de flyschs allochtones cambro-ordoviciennes où les unités cambriennes chevauchent les unités ordoviciennes. Plusieurs municipalités s'alimentent à partir de ce type :

- 1) dans la région de Chaudière-Appalaches les municipalités de Honfleur (Jolicoeur, 1999a) et de Sainte-Hénédine (Bilodeau, 1991 ; Des Rosiers et Delisle, 1994a et 1994b) ;
- 2) dans la région du Bas-Saint-Laurent les municipalités de Kamouraska (Jolicoeur, 1996), Saint-Germain-de-Kamouraska (Laforest, 2001), Saint-Jean-de-Dieu (Jolicoeur, 1999c) et Saint-Simon (comm. pers. de Mme Nancy Morin, sec.-très. adj. Municipalité de Saint-Simon, 2002) ;

3) en Gaspésie les municipalités de Petite-Vallée (Liard, 1989) et de Saint-Vianney (Jolicoeur, 2001b).

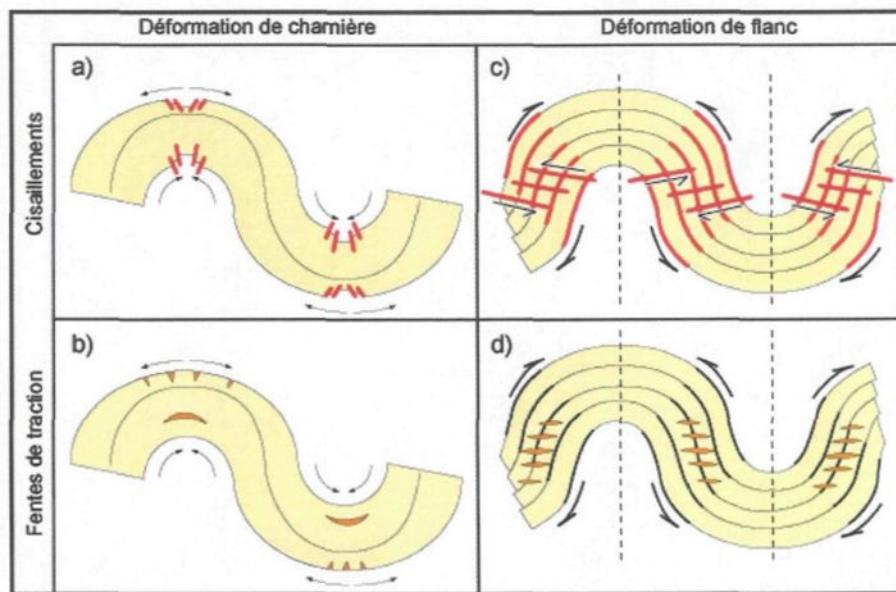


Figure 3.4: Failles et fentes de traction formées lors de plissement (tirée de Roy et al., 2006).

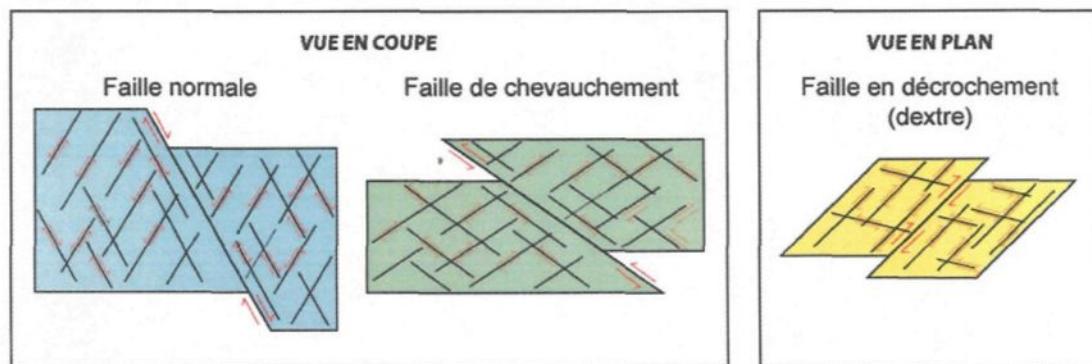


Figure 3.5: Failles normale, de chevauchement et en décrochement avec les réseaux de fractures qui leurs sont associées (tirée de Roy et al., 2006).

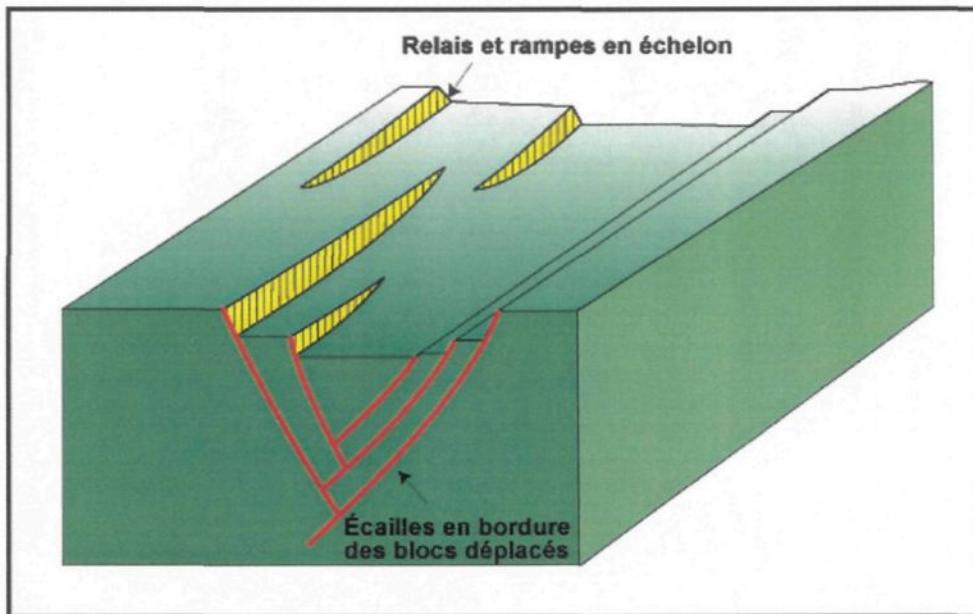


Figure 3.6: Relais et rampes en échelon créés par plusieurs failles normales_(tirée de Roy et al., 2006).

3.2 Types d'aquifères constitués de dépôts meubles

La partie méridionale du Québec est presque entièrement recouverte de sédiments meubles s'étant principalement déposés lors de la dernière glaciation, celle du Wisconsin (Pagé, 1992; Hocq, 1994). Au Québec, ces dépôts constituent un grand nombre d'excellents aquifères.

Cette section présente les différents aquifères constitués de dépôts meubles qui ont été compilés à partir des rapports municipaux recueillis et

gouvernementaux disponibles (Figure 3.7). Les tableaux de l'annexe IV répertorient plusieurs municipalités exploitant des aquifères constitués de dépôts meubles et les caractéristiques physiques de leur environnement sédimentaire. Comme l'information provient de différents auteurs, il est important de noter que des erreurs peuvent être induites étant donné la non uniformité du vocabulaire utilisé par chacun.

Pour faciliter l'interprétation des aquifères constitués de dépôts meubles, il est important de connaître le patron général des dépôts quaternaires du Québec. Voici un résumé d'une séquence typique idéalisée produite suite à la déglaciation d'un terrain situé dans des basses terres : 1) la base est constituée par des dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires; 2) des dépôts glacio-marins et glacio-lacustres les surmontent et 3) les dépôts post-glaciaires se situent au sommet de la séquence. À partir de cette seule information, l'interprétation peut au moins se faire en utilisant des couches de références, par exemple si un dépôt est surmonté d'une couche d'argile, alors ce dépôt résulte fort probablement d'un environnement glaciaire. Il est important de noter qu'il peut y avoir des dépôts sous-jacents qui proviennent de glaciations antérieures à celle du Wisconsin dans le secteur de Québec et de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Il est également à noter qu'il y a deux cycles dans les Appalaches datant du Wisconsin précoce et du Wisconsin tardif (Fulton, 1989; Hocq et Martineau, 1994).

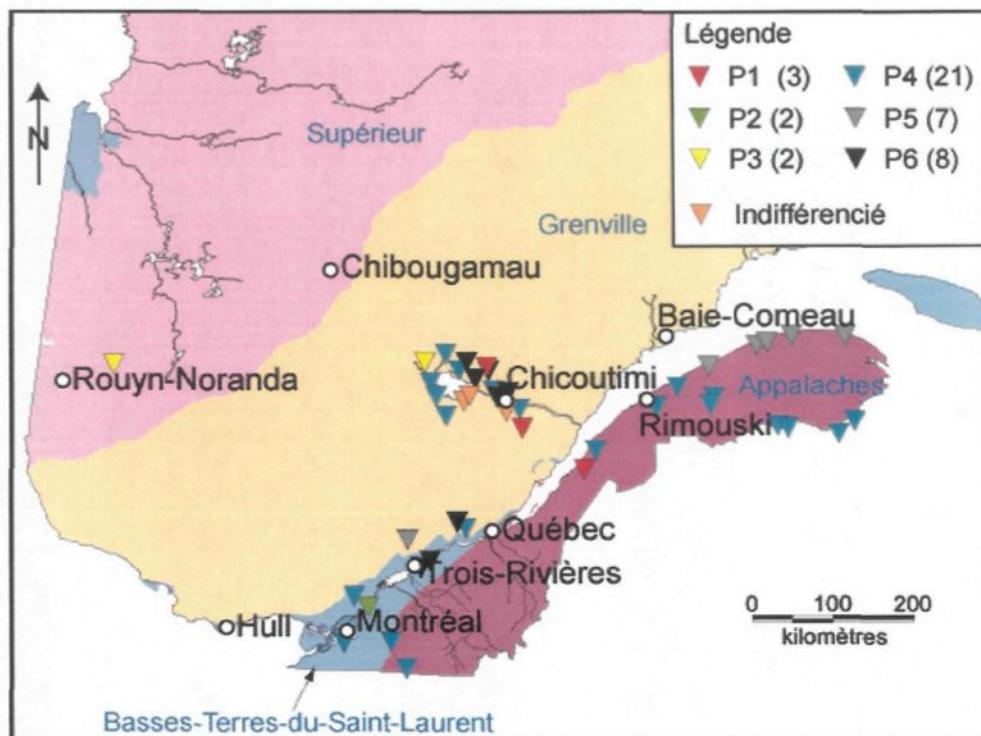


Figure 3.7: Distribution des types d'aquifère constitué de dépôts meubles. Certaines villes sont utilisées comme repère. Les provinces géologiques se distinguent par couleur et le nom de chacune est inscrit en bleu.

Une autre piste aidant à l'interprétation est certainement l'identification de la séquence stratigraphique d'un dépôt. Cependant, les études de faciès sédimentaires sont rares et, plus souvent qu'autrement, les seules données pertinentes concernant la stratigraphie correspondent aux variations granulométriques identifiées lors de forage ou analysées en laboratoire.

La démarche suivie pour faire l'interprétation de chacun des types d'environnement sédimentaire dépend de l'information disponible et, souvent, c'est le contexte régional reconnu des environnements de dépôt qui donne la clé de l'interprétation. En d'autres mots, l'interprétation est souvent faite à partir des connaissances propres à l'histoire glaciaire d'une région ou d'un secteur, ou suivant les connaissances personnelles de l'interprète.

3.2.1 Type P1 : moraine d'ablation

Les moraines d'ablation sont des dépôts glaciaires constitués de till lessivé ou de till de base. Ces dépôts sont généralement d'épaisseur métrique à plurimétrique et leur extension peut aller d'une centaine de mètres à plusieurs kilomètres (Figure 3.8). Comme ce dépôt repose sur le roc, il suit la topographie de ce dernier, ce qui peut limiter la continuité dans le dépôt. Il peut être difficile de faire la différence entre un dépôt de moraine d'ablation et un dépôt fluvioglaciaire. Il faut tenir compte que la moraine d'ablation peut contenir des blocs trop gros pour avoir été mis en place par transport fluvioglaciaire. Aussi, un dépôt de moraine d'ablation ne comporte pas de stratification.

Ce type d'aquifère se définit en une seule unité hydrostratigraphique qui se décrit comme un **feuillet perméable** d'épaisseur irrégulière constitué majoritairement de sable et gravier. Ce type d'aquifère se retrouve dans certains

cas enfouis sous une couche d'argile marine imperméable de plusieurs mètres d'épaisseur qui le protège contre les contaminants de surface. Dans ce cas, l'aquifère est à nappe captive.

Tel qu'interprété aux tableaux de l'annexe IV, ces aquifères sont exploités par certaines municipalités dont Ferland-et-Boilleau (Saguenay – Lac Saint-Jean) et Sainte-Hélène-de-Kamouraska (Bas Saint-Laurent). Ces deux aquifères ont chacun une nappe captive. Un autre cas est celui de la municipalité de Lamarche (Saguenay – Lac Saint-Jean) qui exploite peut-être ce genre de dépôt, mais dans ce cas la nappe est libre.

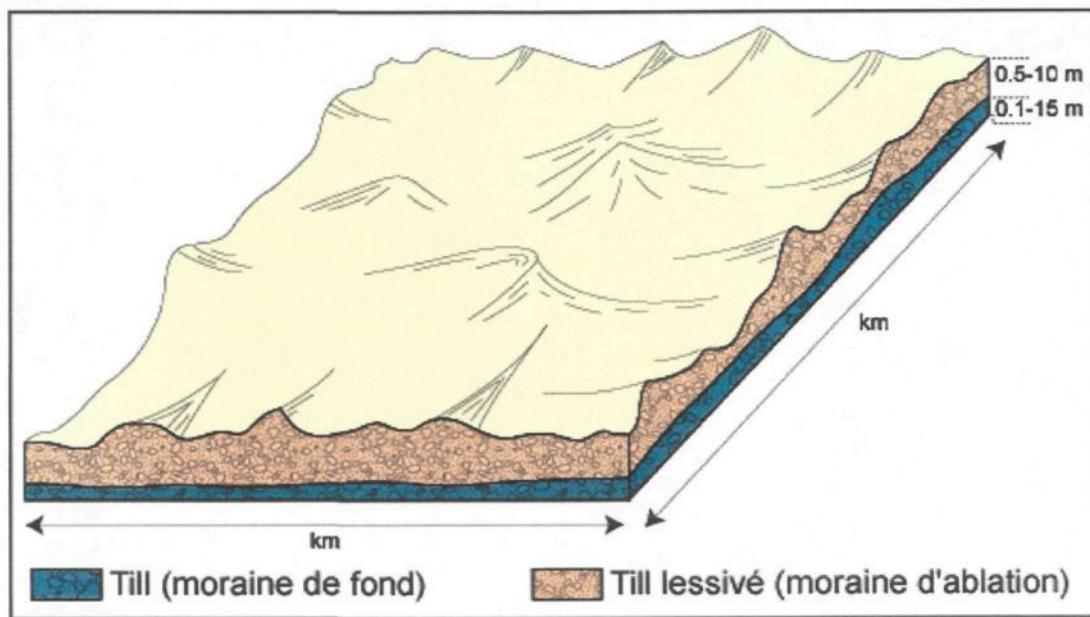


Figure 3.8: Moraine d'ablation montrant les bosses et dépressions dispersées à la surface et formées par le till lessivé (tirée de Roy et al., 2006).

3.2.2 Type P2 : moraine frontale

Une moraine frontale est un dépôt glaciaire plus ou moins continu qui se compose de till lessivé, soit de sable, de gravier et de cailloux, ou de till hétérogène reposant communément sur le socle rocheux. Une telle moraine peut mesurer plusieurs mètres de diamètre et plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs dizaines de kilomètres de longueur (Figure 3.9). Une particularité de ce dépôt est que d'autres dépôts peuvent lui être associés, par exemple les dépôts d'épandage qui se déposent juste à l'avant de la moraine ou des dépôts glacio-lacustres qui peuvent se situer d'un côté ou de l'autre de la moraine.

Tout comme la moraine d'ablation, la moraine frontale se caractérise par une seule unité hydrostratigraphique correspondant à un **cordon perméable** constitué de till lessivé. Le cordon peut être discontinu et, dans ce cas, plusieurs nappes peuvent être exploitées à l'intérieur d'une même moraine frontale.

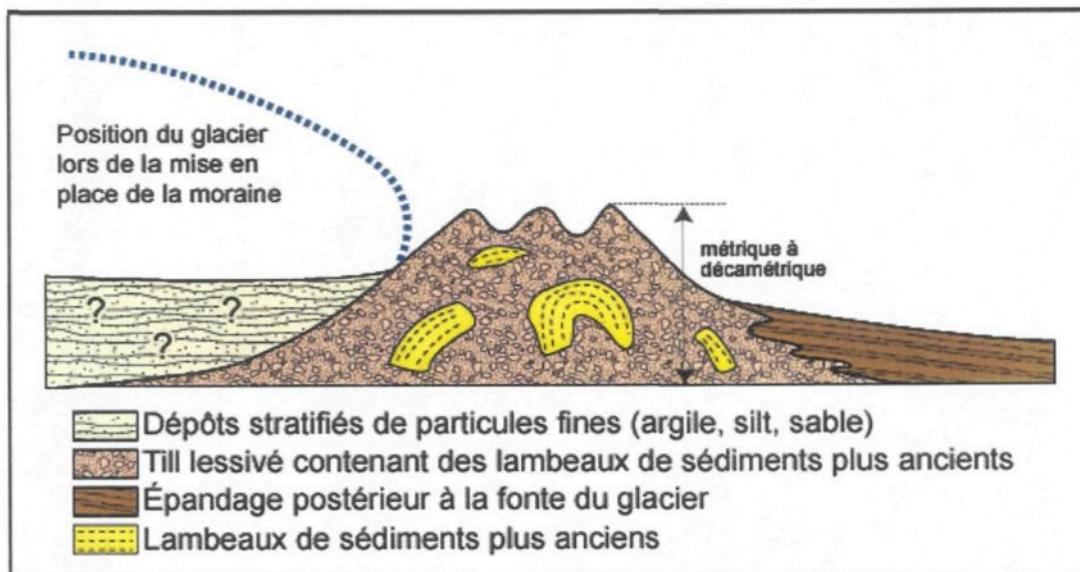


Figure 3.9: Moraine frontale (tirée de Roy et al., 2006).

Tel qu'interprété aux tableaux de l'annexe IV, deux municipalités québécoises sont reconnues pour exploiter de tels aquifères et leurs dépôts associés. La Régie de Grand-Pré (Mauricie) exploite cinq nappes discontinues dans la moraine frontale de Saint-Narcisse et ses dépôts associés (principalement des dépôts d'épandage). L'autre municipalité, celle de Rivière-du-Loup (Bas Saint-Laurent) exploite l'aquifère de Saint-Modeste qui comprend la moraine frontale de Saint-Antonin et ses dépôts d'épandage associés.

3.2.3 Type P3 : esker

Les eskers sont des dépôts fluvio-glaciaires constitués de sable stratifié et de gravier. La stratification peut être détruite suite à la fonte des flancs du glacier juxtaposés au dépôt. Le gravier se concentre principalement au centre de l'esker. Les eskers sont de dimensions variables entre quelques centaines de mètres à des centaines de kilomètres de longueur et quelques dizaines à quelques centaines de mètres de largeur (Figure 3.10). Comme la moraine frontale, un même esker est plus ou moins continu.

L'esker se compose d'une unité hydrostratigraphique principale soit un **cordón très perméable** constitué des strates de sable et de bancs de gravier. Bien entendu, les bancs de gravier sont plus favorables à l'écoulement de l'eau souterraine que les strates sablonneuses.

Plusieurs excellents aquifères exploités au Québec correspondent à des dépôts d'esker. Entre autres, l'aquifère alimentant la municipalité d'Amos (Abitibi; Jolicoeur et Bourgeois, 1977) est également exploité par une industrie d'eau embouteillée. Cet esker correspond à un dépôt de direction NW-SE et plusieurs autres eskers suivant la même direction sont connus sur le territoire de l'Abitibi.

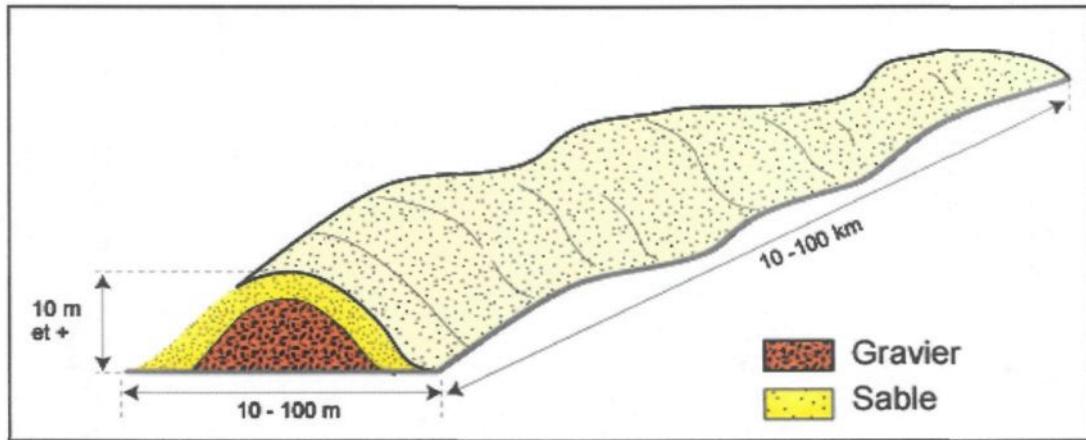


Figure 3.10: Esker (tirée de Roy et al., 2006).

3.2.4 Type P4 : dépôt d'épandage fluvio-glaciaire

Les dépôts d'épandage fluvio-glaciaire peuvent se traduire par plusieurs types de dépôt, entre autres, à ceux mis en place en environnement sub-aquatique (type P4.1) ou sub-aérien (type P4.2). Toutefois, il n'est pas toujours évident de les différencier.

Dans plusieurs études hydrogéologiques, les dépôts sont caractérisés comme étant d'origine fluvio-glaciaire sans être différenciés. Par exemple, l'étude de Liard (1989) associe plusieurs dépôts fluvio-glaciaires présentant de bons potentiels aquifères dans les vallées de la Gaspésie, ce qui peut correspondre, dans certains cas, à des dépôts de traînée de vallée (Figure 3.11).

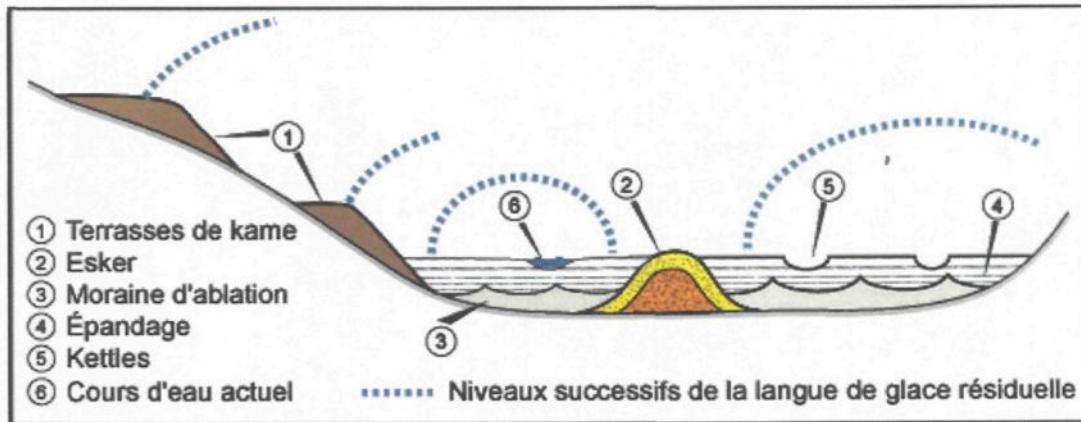


Figure 3.11: Vue en coupe d'une traînée de vallée (tirée de Roy et al., 2006).

3.2.4.1 Type P4.1 : dépôts d'épandage sub-aquatique

Ces dépôts se composent de strates de sables, de graviers et de fines dont la quantité augmente dans la partie distale. Un tel dépôt peut s'étendre sur des centaines de mètres jusqu'à des kilomètres en largeur, sur des kilomètres de longueur et ont une puissance de dizaines de mètres (Figure 3.12).

L'épandage sub-aquatique contient deux unités hydrostratigraphiques, soit des feuillets perméables composés de sables et de graviers et des feuillets imperméables beaucoup plus riche en matériaux fins (silts et argiles), ce qui peut limiter les conduits aquifères.

Par exemple, l'aquifère exploité à La Baie au Saguenay – Lac-Saint-Jean correspond à un dépôt d'épandage sub-aquatique. Cet aquifère est décrit plus en détail à la section 4.5.2.

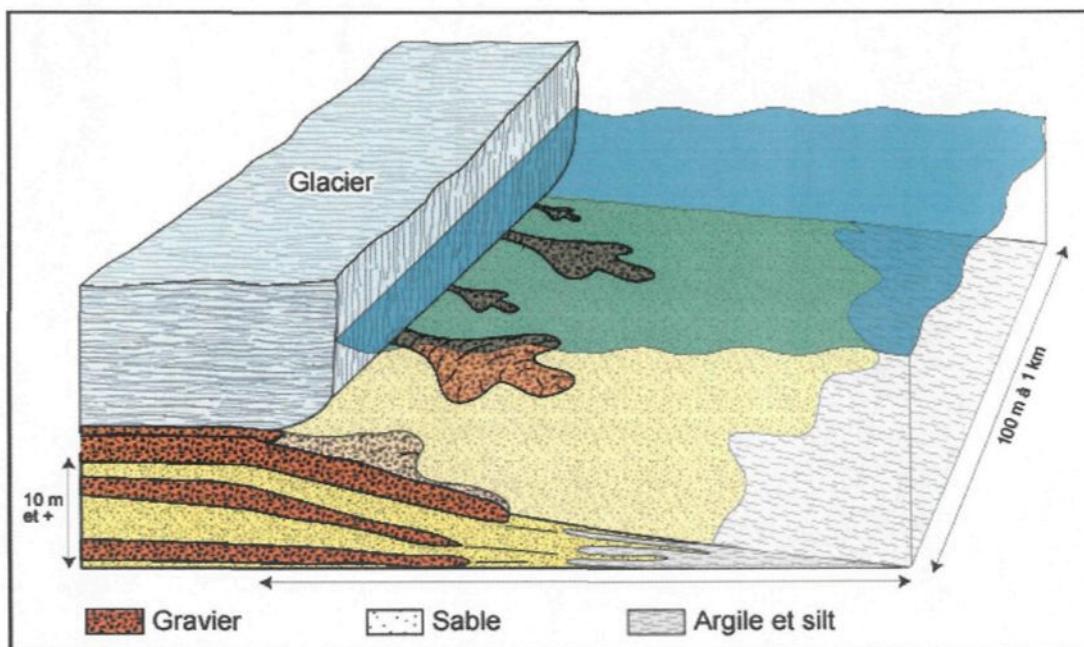


Figure 3.12: Dépôt d'épandage sub-aquatique où des strates de sable sont intercalées de gravier dans la partie proximale du dépôt et, dans la partie distale, le sable est entrecoupé de strates plus riches en fines (tirée de Roy et al., 2006).

3.2.4.2 Type P4.2 : dépôts d'épandage sub-aérien

La composition de ces dépôts consiste majoritairement en une matrice sablo-graveleuse supportant des chenaux et des barres de graviers. Les dépôts

d'épandage sub-aérien présentent sensiblement la même extension que les dépôts sub-aquatiques. Ces dépôts se distinguent par la présence de kettles (Figure 3.13).

Deux unités hydrostratigraphiques caractérisent ces dépôts, la première correspond à la matrice sablo-graveleuse qui présente une bonne perméabilité et la seconde aux barres et chenaux graveleux qui favorisent un meilleur écoulement souterrain et qui présentent une perméabilité excellente.

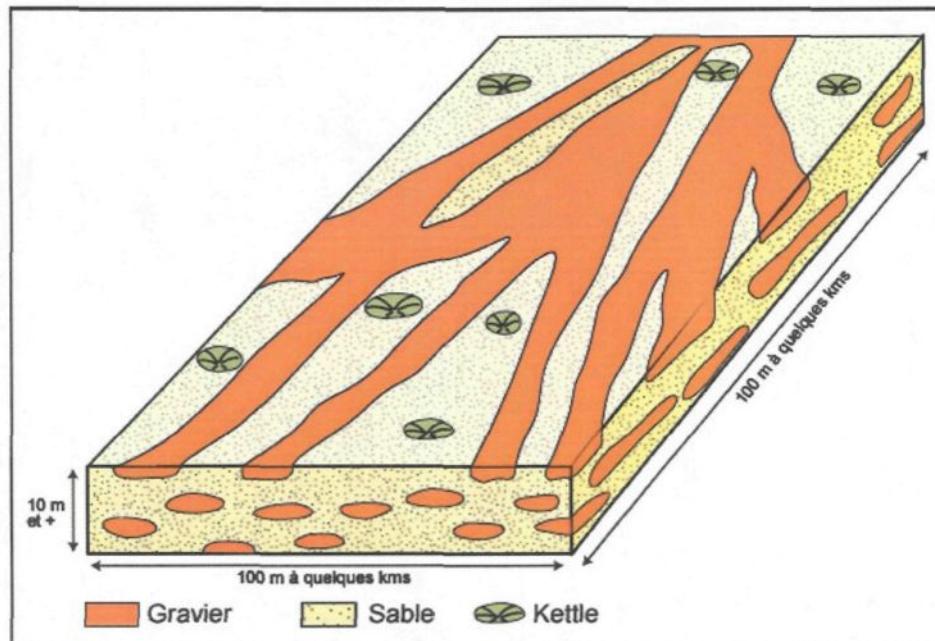


Figure 3.13: Dépôt d'épandage sub-aérien où des chenaux de gravier s'intercalent dans une matrice sablonneuse (tirée de Roy et al., 2006).

Quelques-uns des aquifères exploités dans les dépôts d'épandage sub-aérien sont ceux de Laterrière et de Métabetchouan au Saguenay – Lac-Saint-Jean. Ces dépôts se distinguent des dépôts d'épandage sub-aquatique par la présence de kettles. Particulièrement, celui de Laterrière correspond à la partie proximale d'un dépôt d'épandage qui se prolonge vers l'est jusqu'à La Baie (voir section 4.1). L'aquifère de Laterrière est décrit plus en détail à la section 4.5.2.

3.2.5 Type P5 : dépôts alluviaux

Les dépôts alluviaux post-glaciaires consistent en des chenaux et barres de sable et gravier intercalées avec des couches de sédiments fins. Ces dépôts se trouvent en bordure de cours d'eau anciens et actuels (Figures 3.14 et 3.15). Ces dépôts ont une largeur variant entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres, une épaisseur variant entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres et une longueur suivant celle du cours d'eau. Bien que les épaisseurs de dépôts perméables puissent être de bonne envergure, les couches plus riches en silts et en argiles peuvent séparer l'aquifère en plusieurs nappes distinctes.

Ce type de dépôts réunit deux unités hydrostratigraphiques, soit des rubans perméables correspondant aux dépôts sablo-graveleux et d'autres rubans aquiclude à aquitards correspondant aux sédiments fins déposés entre les couches perméables.

C'est principalement dans les larges vallées abritant actuellement des cours d'eau que ces dépôts sont présents. Ils offrent de bons potentiels aquifères entre autres dans les vallées du Bas Saint-Laurent et de la Gaspésie telles celles des rivières Matapédia, Cap-Chat, Matane, Nouvelle, Sainte-Anne, Humqui et Stewart. Ce sont également des dépôts riches en eau souterraine dans la région de la Mauricie suivant les anciens lits et celui actuel de la rivière Saint-Maurice.

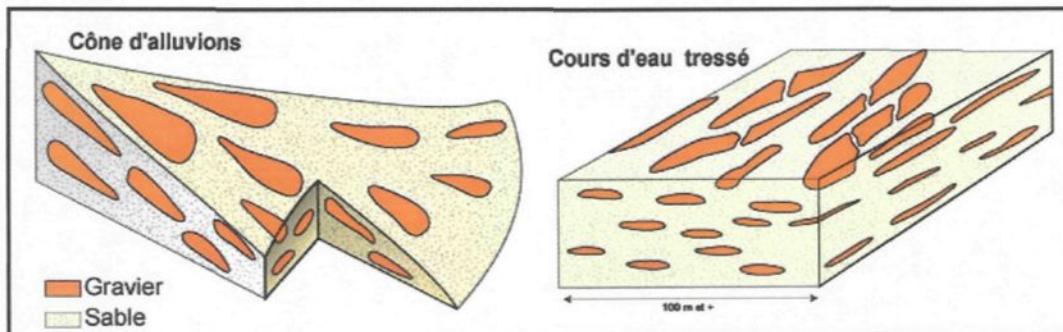


Figure 3.14: Cône d'alluvions avec des amas de gravier dans une matrice sablonneuse (figure de gauche) et dépôt de cours d'eau tressé (figure de droite; tirée de Roy et al., 2006).

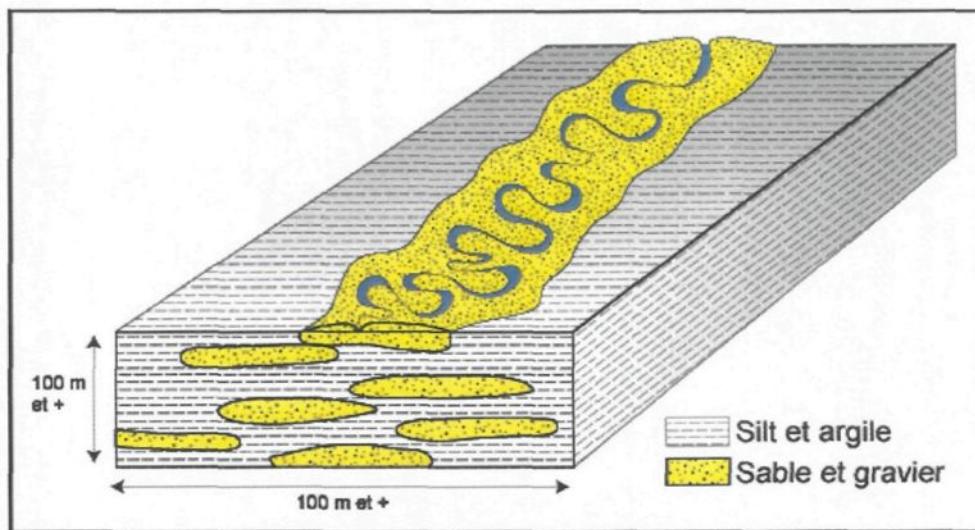


Figure 3.15: Dépôt de plaine alluviale montrant la succession du dépôt de sable et gravier qui s'élève et se déplace latéralement à mesure que les sédiments se déposent (tirée de Roy et al., 2006).

3.2.6 Type P6 : delta post-glaciaire

Les deltas post-glaciaires sont composés de strates de sable, de chenaux et barres de graviers. Ces dépôts sont de dimensions variables avec une largeur et une longueur comparables, allant de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres, et une hauteur variant respectivement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres (Figure 3.16).

Ces dépôts sont d'excellents aquifères de par le fait que le volume de dépôt perméable est élevé et qu'il n'est pas recoupé par des horizons imperméables, ce

qui permet d'avoir une nappe phréatique de grande envergure. Deux unités hydrostratigraphiques caractérisent ce type d'aquifère : la matrice sablonneuse et les barres et chenaux graveleux sont plus perméables et concentrent le drainage des eaux souterraines.

Ces aquifères sont excellents et peuvent alimenter plusieurs milliers de personnes en eau potable. Plusieurs de ces aquifères sont exploités au Québec, entre autres le dépôt deltaïque se trouvant à l'embouchure de la rivière Saint-Maurice (Trois-Rivières, Mauricie). Une des formations aquifères exploitées par la municipalité de Saint-Raymond-de-Portneuf dans la région de Québec qui correspond à ce type. Dans la région du Saguenay – Lac-Saint-Jean plusieurs de ces deltas sont exploités pour l'alimentation en eau potable, entre autres les municipalités de Saint-Honoré, de Shipshaw, de Labrecque, de L'Ascension et de Saint-Ambroise.

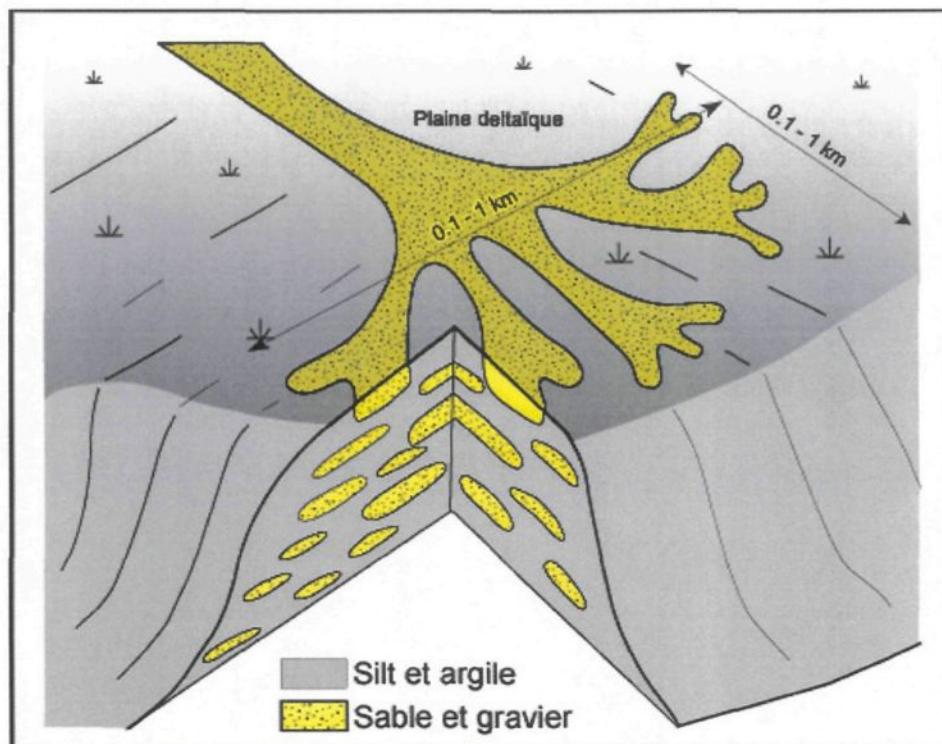


Figure 3.16: Dépôt deltaïque à influence fluviale (tirée de Roy et al., 2006).

3.3 Principaux résultats et limite de la typologie

Le tableau 3.1 rassemble tous les types d'aquifères en milieu fracturé et donne des caractéristiques propres à chacun. Ce tableau peut servir d'outil lors de l'identification du type d'aquifère exploité.

Tableau 3.1 : Caractéristiques générales des types d'aquifères fracturés du Québec

Type d'aquifère	Lieu géographique	Age	Lithologies	Caractéristiques des fractures
F1 : zone de fracturation dans la partie supérieure du roc	Bouclier canadien	Archéen et Précambrien	Roches intrusives et métamorphiques	Associées à la décompression isostatique. Dense à très dense, orientation et ouverture aléatoires
F2 : réseaux orthogonaux formés de jeux de diaclases et de paraclases	Basses-Terres-du-Saint-Laurent	Cambrien, Ordovicien, Silurien	Calcaire, grès, shale	Associées à la déformation régionale. Orthogonales
F3 : fractures induites par la mise en place des Montérégienennes	Montérégie	Cambrien, Ordovicien	Calcaire, grès, shale	Associées à la mise en place des intrusions. Très denses, orientations aléatoires
F4 : fractures variables dans la Formation de Cap-aux-Meules, îles-de-la-Madeleine	îles-de-la-Madeleine	Permo-carbonifère	Conglomérat rouge et vert	Associées à la montée des diapirs de sels. Très denses, orientations aléatoires
F5 : faille de chevauchement au contact entre les Basses-Terres-du-Saint-Laurent et les Appalaches	Appalaches	Cambro-ordovicien	Schistes argileux et, localement, grès et conglomérat	Associées aux failles de chevauchement
F6 : fractures associées aux plis et aux failles des roches compétentes	Appalaches	Cambro-ordovicien	Schiste argileux et ardoisier, mudstone, grès, conglomérat et lits de calcaire	Associées aux plis et aux failles

Le tableau 3.2 rassemble tous les types d'aquifère constitué de dépôts meubles et donne des caractéristiques propres à chacun. Comme le tableau 3.1, il peut servir d'outil lors de l'identification du type d'aquifère exploité.

Tableau 3.2 : Caractéristiques générales des types d'aquifère constitué de dépôts meubles du Québec

Type d'aquifère	Morphologie de surface	Séquence granulométrique	Couche argileuse	Épaisseur du dépôt	Continuité latérale
P1 : moraine d'ablation	Suivant la topographie du roc	Till	Si présente → sus-jacente au dépôt	Quelques mètres	Grande continuité latérale
P2 : moraine frontale	Cordon perpendiculaire au sens d'écoulement du glacier	Till	Si présente → en appui latéral sur le dépôt	Plusieurs mètres à quelques dizaines de mètres	Peut s'étendre jusqu'à des centaines de kilomètres
P3 : esker	Cordon plutôt parallèle à la direction d'écoulement du glacier	Sable et gravier plus en profondeur	Présente ou non, recouvre parfois les bordures de l'esker	Quelques mètres à quelques dizaines de mètres	Peut s'étendre jusqu'à des centaines de kilomètres
P4.1 : épandage sub-aquatique	Plutôt plane	Alternance de couches de sable et de couches de gravier avec strates intercalées de fines	Peut recouvrir la partie distale	Une à quelques dizaines de mètres	Grande étendue sur des centaines de mètres, voire des kilomètres
P4.2 : épandage sub-aérien	Plutôt plane mais souvent présence de kettles	Alternance de sable et de gravier	Peut être sus-jacente ou intercalée à la partie distale du dépôt	Une à quelques dizaines de mètres	Grande étendue sur des centaines de mètres, voire des kilomètres
P5 : dépôts alluviaux	Plane en bordure de cours d'eau	Lentilles de sable et gravier avec des strates fines	Si présente → intercalées entre les lentilles et couches de sable et gravier	Quelques mètres à quelques dizaines de mètres	Suivant la vallée fluviatile autant en largeur qu'en longueur
P6 : Delta post-glaciaire	En éventail	Couches de sable et de gravier	Généralement absente	Une à quelques dizaines de mètres	Quelques dizaines à quelques centaines de mètres

Cette typologie englobe plusieurs aquifères, autant en milieu fracturé que ceux constitués de dépôts meubles. Chacun de ces types se définit par un milieu géologique particulier qui se distingue des autres par sa forme, sa dimension, l'agencement de ses corps géologiques qui influencent les paramètres hydrogéologiques. Chaque type est traité de façon indépendante par rapport aux autres mais en réalité plusieurs types peuvent se superposer et se juxtaposer. Dans ces cas, la direction et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine sont influencées par l'interaction de différents types d'aquifères. Par conséquent, le type d'aquifère exploité doit être identifié en tenant compte du contexte géologique régional dans lequel il se trouve. L'identification du type d'aquifère exploité permet ensuite de déterminer les faciès hydrogéologiques et le modèle conceptuel caractérisant l'aquifère, ceci est traité au chapitre suivant.

CHAPITRE 4 : FACIÈS HYDROGÉOLOGIQUES ET MODÈLES CONCEPTUELS

Ce chapitre décrit les faciès hydrogéologiques des aquifères exploités au Québec en milieu fracturé et dans les dépôts meubles pour ensuite définir les modèles conceptuels leur correspondant.

4.1 Faciès sédimentaire, hydrostratigraphique et hydrogéologique

Avant de procéder à l'identification des faciès hydrogéologiques, il est nécessaire de définir et de distinguer les trois types de faciès traités dans cette étude : 1) faciès sédimentaire, 2) faciès hydrostratigraphique et 3) faciès hydrogéologique.

Premièrement, le terme faciès est utilisé pour définir une unité qui possède des propriétés physico-chimiques propres. Le faciès définit cette unité de façon descriptive ou interprétative (Miall, 1984; Reading, 1986).

Le faciès sédimentaire se caractérise par sa texture et sa structure tel que défini à la section 1.1. Les caractéristiques d'un faciès sédimentaire incluent la granulométrie, les propriétés granulométriques, la couleur, la fabrique et la structure (Miall, 1984; Reading, 1986). Les faciès sédimentaires sont des divisions informelles d'unité stratigraphique. Une unité stratigraphique donne de l'information sur le mode de mise en place du dépôt.

Le faciès hydrogéologique se distingue sur la base de ses propriétés hydrogéologiques, notamment la conductivité hydraulique et la porosité. La superposition et la juxtaposition des faciès hydrogéologiques permettent d'identifier un aquifère sur la base de ses caractéristiques hydrostratigraphiques. Les types d'aquifère constitué de dépôts meubles du chapitre 3 correspondent tous à un modèle hydrostratigraphique particulier.

C'est particulièrement du faciès hydrogéologique dont il est question dans ce chapitre et il est décrit plus en détail. Selon Anderson (1989), un faciès hydrogéologique se définit comme un milieu homogène, isotrope ou anisotrope. Il se caractérise par sa dimension, sa géométrie et ses propriétés hydrogéologiques,

principalement la conductivité hydraulique dont la valeur peut varier de plusieurs ordres de grandeur contrairement à la porosité ou l'emmagasinement (Banton et Bangoy, 1999; Anderson, 1989). Selon Eaton (2006), un faciès hydrogéologique peut être défini par un volume élémentaire représentatif dans lequel les propriétés hydrogéologiques sont contrôlées par les caractéristiques des faciès lithologiques et par d'autres éléments telles les fractures. Par exemple, lorsqu'un aquifère est constitué d'un massif rocheux fracturé, cet aquifère comprend au moins deux faciès hydrogéologiques selon la définition de Eaton (2006), soit le massif rocheux et le réseau de fractures.

Dans un milieu fracturé, la conductivité hydraulique d'un horizon dépend d'une combinaison de facteurs influençant l'écoulement, soit la densité, l'ouverture et l'intersection des fractures (Bradbury et Muldoon, 1994). Dans les dépôts meubles, la conductivité hydraulique d'un aquifère est fonction de l'environnement de dépôt qui contrôle la distribution de la granulométrie, de la texture et des agencements de faciès sédimentaires (Anderson, 1989; Aigner et al., 1999; Heinz et al., 2003). La valeur de conductivité hydraulique peut varier d'un faciès à un autre.

Une fois les faciès hydrogéologiques identifiés pour un aquifère donné, le modèle conceptuel de l'aquifère peut être construit. Les modèles conceptuels sont le reflet simplifié de la réalité. Pour pouvoir faire la modélisation numérique d'un

aquifère dans le but de visualiser et d'estimer la direction et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine, il est nécessaire de conceptualiser l'aquifère à travers un modèle bien défini. Chaque modèle conceptuel est paramétré selon les faciès hydrogéologiques qui lui sont propres et, de la même façon que les faciès hydrogéologiques, le modèle conceptuel se caractérise par sa dimension, sa géométrie et l'agencement de ses faciès.

4.2 Faciès hydrogéologiques présents dans les aquifères fracturés exploités au Québec

Les six types d'aquifère exploités en milieu fracturé au Québec et identifiés au chapitre précédent sont repris au tableau 4.1 et leurs faciès hydrogéologiques sont identifiés. Les faciès hydrogéologiques sont décrits selon leur dimension et leur géométrie, ainsi que d'après la combinaison de la densité, de l'ouverture et de l'intersection des fractures. Ce tableau résulte directement d'informations disponibles dans les rapports gouvernementaux et municipaux résumés aux annexes III et IV. Il est important de noter que les types d'aquifère en milieu fracturé définis au chapitre III présentent tous une bonne conductivité hydraulique.

Tableau 4.1: Description des faciès hydrogéologiques en milieu fracturé.

Type d'aquifère fracturé (selon chapitre III)	Description des faciès hydrogéologiques	Dimension et géométrie
	Combinaison entre densité, ouverture et intersection des fractures	
Type F1 : zone de fracturation dans la partie supérieure du roc	La densité et l'ouverture diminuent considérablement à l'intérieur des premières dizaines de mètres de profondeur.	Aucune information n'est disponible.
Type F2 : réseaux orthogonaux formés de jeux de diaclases et de paraclases	Plusieurs de ces milieux sont riches en carbonates et dolomites, c'est principalement l'ouverture des fractures (causées par la dissolution des carbonates) qui peut varier dans ces faciès.	Ces faciès prennent la forme de feuillet dont l'extension peut atteindre des kilomètres de largeur et longueur par quelques mètres à quelques dizaines de mètres d'épaisseur.
Type F3 : fractures induites par la mise en place des Montéréggiennes	La densité de fractures diminue en s'éloignant de l'intrusion.	Un anneau autour de l'intrusion. Les informations disponibles ne permettent pas de déterminer quelles largeur, longueur et épaisseur peuvent avoir ces faciès.
Type F4 : fractures variables dans la Formation de Cap-aux-Meules aux îles-de-la-Madeleine	Très peu d'informations sont disponibles mais c'est peut-être grâce à la densité et l'intersection des fractures que cet horizon constitue un bon faciès hydrogéologique. Comme cette formation est constituée de grès, il est possible que la porosité primaire s'élève entre 10 et 20% (Banton et Bangoy, 1999).	Cette formation se retrouve un peu partout aux îles-de-la-Madeleine.
Type F5 : failles de chevauchement au contact entre les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches	Ce faciès hydrogéologique est principalement contrôlé par l'ouverture des failles et l'intersection des écailles de chevauchement. Ces failles contrôlent l'écoulement à une échelle régionale.	Ce sont de grandes failles régionales qui peuvent avoir entre quelques centaines de mètres à quelques kilomètres de profondeur.

Type d'aquifère fracturé (selon chapitre III)	Description des faciès hydrogéologiques	
	Combinaison entre densité, ouverture et intersection des fractures	Dimension et géométrie
Type F6 : fractures associées aux plis et aux failles des roches compétentes	<p>Lorsque les fractures sont associées aux plis, l'ouverture des fractures peut correspondre à un bon réservoir pour emmagasiner l'eau.</p> <p>Dans les zones de faille, c'est probablement l'ouverture et l'intersection des fractures entre elles qui contrôlent l'écoulement.</p>	Ces caractéristiques dépendent de la dimension des plis et des failles.

4.3 Identification des faciès hydrogéologiques des aquifères constitués de dépôts meubles

Dans les aquifères constitués de dépôts meubles, les propriétés hydrogéologiques dépendent principalement de la distribution granulométrique, du tri, de la fabrique et de la texture des dépôts composant l'aquifère (Anderson, 1989; Koltermann et Gorelick, 1996).

Pour identifier ces faciès une marche à suivre simple et efficace a été démontrée par plusieurs auteurs, entre autres Klingbeil et al. (1999), Bersezio et al. (1999) et Heinz et al. (2003). La démarche consiste à faire l'identification des faciès sédimentaires à partir de codes qui varient d'un auteur à l'autre, selon les besoins et les caractéristiques jugées nécessaires à l'identification des faciès hydrogéologiques. Lorsque les faciès sédimentaires sont bien identifiés, les

valeurs des caractéristiques hydrogéologiques telles les conductivités hydrauliques horizontale et verticale et la porosité sont mesurées. En corrélant et regroupant les faciès sédimentaires qui présentent des caractéristiques hydrogéologiques semblables, les faciès hydrogéologiques sont identifiés.

Les types d'aquifères identifiés correspondent tous à des environnements de dépôt sédimentaire définis par un ensemble de faciès sédimentaires qui leur sont propres et qui possèdent des propriétés hydrogéologiques différentes d'un faciès à l'autre. Cette section distingue près d'une trentaine de faciès sédimentaires (Miall, 1977, 1984, 1992; Klingbeil et al., 1999).

4.3.1 Faciès sédimentaires de Miall (1977, 1984, 1992)

Un faciès sédimentaire est communément identifié par une série de lettres appartenant à un code. Le code le plus utilisé, sans doute celui de Miall (1977), a été élaboré sur la base des différents faciès identifiés dans un dépôt fluvial. Le code de Miall a été amélioré par Keller (1996; cité dans Klingbeil et al., 1999) qui l'a adapté à des environnements de dépôts glaciaires. Finalement, Klingbeil et al. (1999) ont ajouté deux codes qui portent à vingt-trois le nombre de faciès sédimentaires identifiés (Tableaux 4.2 et 4.3).

Le tableau 4.2 présente les codes que Klingbeil et al. (1999) attribuent à la granulométrie, la relation avec la matrice, la structure et la dispersion granulométrique. La matrice est constituée de grains plus petits qui englobent des grains de plus grande taille. L'étude de Klingbeil et al. (1999) se limitent aux granulométries sableuses et graveleuses, tandis que Miall (1977, 1984, 1992) considère également les granulométries plus fines (Tableau 4.4). Les faciès définis par Miall se basent sur un environnement de dépôt fluvial tandis que ceux définis par Klingbeil se basent sur des sédiments fluvio-glaciaires. L'identification des faciès sédimentaires de Klingbeil et al. (1999; tableau 4.3) ne respecte pas l'ordre prescrit par Miall dans la façon de constituer les codes. Miall place d'abord la granulométrie suivie de la structure principale et de la texture. Quant à Klingbeil et al. (1999), ils construisent les codes en débutant par la granulométrie mais inversent la texture et la structure.

Tableau 4.2: Codes utilisés pour identifier les faciès sédimentaires (Klingbeil et al., 1999)

Caractéristique du faciès	Codes	Définition
Granulométrie	G	Gravier
	S	Sable
Relation avec la matrice (s'applique seulement aux graviers)	m*	Non-jointif (supporté par la matrice)
	c	Jointif
Structure	p	Laminations entrecroisées planaires
	t	Laminations entrecroisées en auge
	h	Laminations horizontales
	m*	Massif
	g	Granoclassé
Dispersion granulométrique (s'applique seulement aux graviers)	b	Bimodal
	o	Sans matrice ni ciment

* N.B. La lettre « m » représente deux codes distincts mais les faciès nommés au tableau 4.3 sont identifiés suivant l'ordre de présentation dans ce tableau.

Tableau 4.3: Noms et définitions des vingt-trois faciès sédimentaires identifiés à partir des codes définis au tableau précédent (Klingbeil et al., 1999)

Nom du faciès	Définition du faciès sédimentaire
Gmp	gravier non-jointif à laminations entrecroisées planaires
Gmpb	gravier non-jointif bimodal à laminations entrecroisées planaires
Gcp	gravier jointif à laminations entrecroisées planaires
Gcpb	gravier jointif bimodal à laminations entrecroisées planaires
Gcpo	gravier jointif sans matrice ni ciment à laminations entrecroisées planaires

Nom du faciès	Définition du faciès sédimentaire
Gmh	gravier non-jointif à laminations horizontales
Gmhb	gravier non-jointif bimodal à laminations horizontales
Gch	gravier jointif à laminations horizontales
Gchb	gravier jointif bimodal à laminations horizontales
Gcho	gravier jointif sans matrice ni ciment à laminations horizontales
Gg	gravier granoclassé
Gmt	gravier non jointif à laminations entrecroisées en auge
Gmtb	gravier non-jointif bimodal à laminations entrecroisées en auge
Gct	gravier jointif à laminations entrecroisées en auge
Gctb	gravier jointif bimodal à laminations entrecroisées en auge
Gcto	gravier jointif sans matrice ni ciment à laminations entrecroisées en auge
Gmm	gravier non-jointif massif
Gcm	gravier jointif massif
Sp	sable à laminations entrecroisées planaires
St	sable à laminations entrecroisées en auge
Sh	sable à laminations horizontales
Sm	sable massif
Sg	sable granoclassé

Tableau 4.4: Classification des faciès sédimentaires selon Miall (1977, 1984, 1992)

Codes	Faciès et structures sédimentaires	Interprétation
Gms	Gravier massif non jointif, il y a une abondante matrice composée de sable, de silt ou d'argile. Généralement mal trié et mal classé.	Dépôts de coulée de débris ou d'écoulement torrentiel.
Gm	Gravier massif, il y a peu ou pas de matrice composée de sable, de silt ou d'argile. Tri et classement mauvais.	Dépôt de barres longitudinales.
Gt	Gravier, laminations entrecroisées en auge.	Dépôt produit par la migration de dunes à crêtes sinuiseuses.
Gp	Gravier, laminations entrecroisées planaires.	Dépôt produit par la migration de dunes à crêtes sinuiseuses (vue oblique) à parallèles et par l'accumulation sur une surface inclinée.
St	Sable, laminations entrecroisées en auge. Peut contenir un peu de gravier.	Dépôt produit par la migration de dunes à crêtes sinuiseuses.
Sp	Sable, laminations entrecroisées planaires. Peut contenir un peu de gravier.	Dépôt produit par la migration de dunes à crêtes sinuiseuses (vue oblique) à parallèles et par l'accumulation sur une surface inclinée.
Sr	Sable, laminations entrecroisées en auge. Lamines entrecroisées de plus faibles dimensions (inférieur à 5 cm d'amplitude). Généralement composé de sable moyen à très fin.	Dépôt produit par la migration de rides.
Sh	Sable à laminations horizontales.	Dépôt produit en régime d'écoulement supérieur.
Fl	Silt et / ou argile laminé. Fines laminations.	Dépôt produit par un courant de faible puissance, en marge d'un chenal ou sur une plaine d'inondation en fin de crue.
Fm	Silt et / ou argile massif. Fentes de dessiccation possibles.	Dépôt en milieu calme (sans courant) en plaine d'inondation ou dépôts de coulée de débris boueuse.

Afin d'appliquer ces nomenclatures aux différents aquifères exploités au Québec, des descriptions de terrain détaillées des différents faciès sédimentaires sont nécessaires. Comme les données disponibles pour la présente étude ne permettent que d'interpréter les environnements de dépôt, les faciès sédimentaires qui les constituent sont identifiés d'après la granulométrie et l'étalement granulométrique théoriques constituant les faciès correspondant aux différents environnements de dépôt exploités au Québec. Cette méthode limite l'identification des faciès notamment lorsqu'ils sont minces (moins de un ou deux mètres d'épaisseur).

4.3.2 Exemple montrant la relation entre faciès sédimentaires et faciès hydrogéologiques

Une fois les faciès sédimentaires identifiés, une démarche doit être suivie afin d'identifier les faciès hydrogéologiques correspondants. Les faciès sédimentaires possédant des caractéristiques hydrogéologiques semblables sont regroupés et chaque groupe constitue un faciès hydrogéologique (Klingbeil et al., 1999). Parmi les faciès définis par Klingbleil et al. (1999) se retrouvent notamment les graviers bimodaux et les graviers sans matrice ni ciment. Les graviers bimodaux se distinguent par l'absence de la granulométrie moyenne qui peut être représenté sur une courbe granulométrique par un vide observé entre les granulométries fine et grossière. Les graviers sans matrice ni ciment se composent

de gravier fin à grossier normalement bien trié. Ces deux catégories constituent deux types de faciès hydrogéologiques possédant des valeurs de conductivités hydrauliques et de porosité qui leur sont propres (tableau 4.5)

Le tableau 4.5 présente les faciès hydrogéologiques définis par Klingbeil et al. (1999) à partir de vingt-trois faciès sédimentaires pouvant être identifiés dans des dépôts graveleux quaternaires provenant principalement de rivière tressée, de coulée de débris et de delta lacustre. La classification des faciès sédimentaires de Klingbeil et al. (1999) est adaptée à l'hydrogéologie par l'ajout de codes aux faciès résultant de systèmes fluviaux (Miall, 1977; 1978; 1996) et de dépôts glaciaires (Keller, 1996). À partir de ces faciès sédimentaires, les propriétés hydrogéologiques telles les conductivités hydrauliques horizontale et verticale et la porosité ont été quantifiées. Les valeurs de conductivité hydraulique ont été comparées à celles de Jussel (1992) cité dans Klingbeil et al. (1999) qui a mesuré la conductivité hydraulique pour chacun de ces mêmes faciès. En comparant les valeurs de conductivité hydraulique pour chacun des faciès sédimentaires et en rassemblant celles qui sont semblables, cinq catégories de faciès hydrogéologique sont définis (voir tableau 4.5).

Dans le chapitre précédent, huit types d'aquifères exploités dans les dépôts meubles au Québec ont été définis et décrits et leurs faciès sédimentaires ont été identifiés d'après la classification de Klingbeil et al. (1999). Ces types sont

énumérés dans le tableau 4.6. Pour chacun de ces types sont attribués les codes correspondant aux faciès sédimentaires et hydrogéologiques identifiés au tableau 4.5.

Le tableau 4.6 présente dans les deux colonnes de droites l'ensemble des faciès sédimentaires et des faciès hydrogéologiques pouvant être identifiés dans chaque type d'aquifère constitué de dépôts meubles. Un grand nombre de faciès sédimentaires et hydrogéologiques sont attribués à chacun des types. Ceci démontre qu'il est difficile de discriminer chaque type d'aquifère sur la seule base des faciès constituant le dépôt. Il est donc très important d'identifier les assemblages de faciès et de connaître la géométrie et les dimensions du dépôt. Par conséquent, chaque aquifère doit être modélisé de façon conceptuelle en intégrant l'ensemble des caractéristiques qui lui sont propres.

Tableau 4.5: Conductivités hydrauliques et porosité des faciès hydrogéologiques (d'après Klingbeil et al., 1999)

Faciès hydrogéologiques (selon Klingbeil)	K_h (m/s)	K_v (m/s)	n	Faciès sédimentaires correspondants
BM: gravier bimodal	1.16×10^{-4}	1.16×10^{-4}	0.27	Gmpb: gravier bimodal supporté par la matrice, litage entrecroisé planaire Gcpb: gravier bimodal jointif, litage entrecroisé planaire Gmtb: gravier bimodal supporté par la matrice, litage entrecroisé en auge Gctb: gravier bimodal jointif, litage entrecroisé en auge Gmhb: gravier bimodal supporté par la matrice, litage horizontal Gchb: gravier bimodal jointif, litage horizontal
OW: gravier sans matrice ni ciment	2.52×10^{-1}	1.39×10^{-1}	0.36	Gcpo: gravier sans matrice ni ciment supporté par la matrice, litage entrecroisé planaire Gcto: gravier sans matrice ni ciment jointif, litage entrecroisé en auge Gcho: gravier sans matrice ni ciment jointif, litage horizontal Gg: gravier sans matrice ni ciment jointif et granoclassé
P/T/H: gravier planaire, en auge (<i>trough</i>) et horizontal	3.96×10^{-3}	6.61×10^{-5}	0.27	Gmp: gravier supporté par la matrice, litage entrecroisé planaire Gcp: gravier jointif, litage entrecroisé planaire Gmt: gravier supporté par la matrice, litage entrecroisé en auge Gct: gravier jointif, litage entrecroisé en auge Gmh: gravier supporté par la matrice, litage horizontal Gch: gravier jointif, litage horizontal

Faciès hydrogéologiques (selon Klingbeil)	K_h (m/s)	K_v (m/s)	n	Faciès sédimentaires correspondants
M: gravier massif	5.37×10^{-4}	2.99×10^{-4}	0.27	Gmm: gravier massif supporté par la matrice Gcm: gravier massif jointif
S: sable	1.10×10^{-3}	1.10×10^{-3}	0.42	Sp: sable, litage entrecroisé planaire St: sable, litage entrecroisé en auge Sh: sable, litage horizontal Sm: sable massif Sg: sable granoclassé

Tableau 4.6: Faciès hydrogéologiques définis à partir des faciès sédimentaires

Types d'aquifère constitué de dépôts meubles (selon chapitre III)	Description des faciès sédimentaires	Faciès sédimentaires (selon Klingbeil et al., 1999)	Faciès hydrogéologiques
Type P1 : moraine d'ablation	Granulométrie variable dans l'intervalle des sables fins jusqu'aux blocs inclusivement. Sans litage, massif.	Gmm, Gcm + cailloux et blocs	M + cailloux et blocs
Type P2 : moraine frontale	Variable dans l'intervalle des sables fins allant aux blocs inclusivement. Sans litage, massif.	Gmm, Gcm + cailloux et blocs	M + cailloux et blocs
Type P3 : esker	Stratification de sable et gravier (Eyles et Eyles, 1992; Roy et al., 2006).	Gmh, Gch, Sh	P/T/H et S

Types d'aquifère constitué de dépôts meubles (selon chapitre III)	Description des faciès sédimentaires	Faciès sédimentaires (selon Klingbeil et al., 1999)	Faciès hydro-géologiques
Type P4 : dépôts fluvio-glaciaires indifférenciés	Les mêmes faciès que pour les dépôts d'épandage sub-aquatique et sub-aérien	Gmp, Gmpb, Gcp, Gcpb, Gcpo, Gmh, Gmhb, Gch, Gchb, Gcho, Gmm, Gcm, Sp, St, Sh, Sm, Sg	BM, OW, P/T/H, M et S
Type P4.1 : dépôt d'épandage sub-aquatique	Barres graveleuses surmontées de gravier massif surmonté de stratifications entrecroisées sablonneuse et de chenaux sablonneux (Eyles et Eyles, 1992).	Gmp, Gmpb, Gcp, Gcpb, Gcpo, Gmh, Gmhb, Gch, Gchb, Gcho, Gmm, Gcm, Sp, St, Sh, Sm, Sg	BM, OW, P/T/H, M et S
Type P4.2 : dépôt d'épandage sub-aérien	Dépôts de barres et de lits graveleux communément interstratifiés de lits sablonneux (Miall, 1992). Les barres graveleuses résultent d'une accumulation de feuillets de gravier massifs en période de crue et de la migration de ces dépôts.	Gmm, Gcm, Gmp, Gmpb, Gcp, Gcpb, Gcpo, Gmh, Gmhb, Gch, Gchb, Gcho, Sp, St, Sh, Sm, Sg	BM, OW, P/T/H, M et S
Type P5 : dépôts alluviaux	Miall (1978, 1985, 1992) a identifié plusieurs faciès constituant les dépôts alluviaux. Les graviers et les sables sont présents et toutes les textures sont observées, donc tous les types de faciès sont présents en plus de matériaux fins.	Gmm, Gcm, Gmp, Gmpb, Gcp, Gcpb, Gcpo, Gmh, Gmhb, Gch, Gchb, Gcho, Gg, Gmt, Gmtb, Gct, Gctb, Gcto, Sp, St, Sh, Sm, Sg + matériaux fins (aquitards)	BM, OW, P/T/H, M et S + matériaux fins (aquitards)
Type P6 : delta	Succession de corps sablonneux intercalés de couches de matériaux fins. Les couches de sable sont stratifiées horizontalement, à laminations entrecroisées ou massives granoclassées (Bhattacharya et Walker, 1992).	Sp, St, Sh, Sm, Sg + matériaux fins	S + matériaux fins (aquitards)

4.4 Construction des modèles conceptuels

Un modèle conceptuel d'aquifère correspond à un modèle intégrant les particularités géologiques simplifiées propres à un aquifère réel. Les différents milieux géologiques permettent d'estimer les valeurs de conductivité hydraulique relative en identifiant les directions préférentielles d'écoulement ainsi que la géométrie et l'agencement des faciès hydrogéologiques (Anderson, 1989). La conductivité hydraulique relative permet de prédire quels faciès présentent des conductivités hydrauliques plus élevées ou plus faibles. De plus, dans le cas des aquifères constitués de dépôts meubles et tel que démontré par Anderson (1989), les corrélations entre différents faciès hydrogéologiques sont meilleures horizontalement que verticalement. Comme dans l'étude réalisée par Klingbeil et al. (1999), les valeurs des propriétés hydrogéologiques doivent être quantifiées à partir de tests sur le terrain et en laboratoire pour chaque cas particulier. La construction d'un modèle conceptuel doit être réalisée avec une grande rigueur, principalement lorsqu'il sera traduit en modèle mathématique servant à faire une simulation numérique de l'écoulement souterrain ou de la migration de contaminants.

Un modèle conceptuel se construit selon les caractéristiques géométriques, géologiques et hydrogéologiques du système aquifère. Pour un aquifère fracturé, c'est la porosité primaire de la roche et la porosité secondaire (densité, orientation,

intersection et ouverture des fractures) qui caractérisent le modèle conceptuel. Dans le cas d'un aquifère constitué de dépôts meubles, les caractéristiques géométriques correspondent à l'enveloppe externe de l'aquifère et ses dimensions en longueur, largeur et hauteur. Les caractéristiques géologiques déterminent essentiellement l'architecture interne de l'aquifère avec l'agencement de faciès qui compose l'aquifère. En plus des particularités propres à chaque faciès, les dimensions doivent également être déterminées ou du moins estimées. Quant aux caractéristiques hydrogéologiques, elles sont mesurées sur le terrain et/ou en laboratoire par des essais hydrauliques; leurs variations sont plus importantes verticalement qu'horizontalement (Freeze et Cherry, 1979).

Plusieurs études de cas réalisées par différents auteurs (Anderson, 1989; Heinz et al., 2003; Klingbeil et al., 1999) ont comme objectif premier ou secondaire de construire un ou des modèles conceptuels d'aquifère, entre autres lorsqu'une simulation numérique de l'écoulement ou de la migration des contaminants est en cause. Cette partie du chapitre démontre la méthode de construction d'un modèle conceptuel par une étude de cas.

4.5 Élaboration d'un modèle conceptuel d'aquifère : exemple de l'aquifère exploité à Laterrière au Saguenay – Lac-Saint-Jean

Cette section décrit les étapes à suivre pour faire l'identification rigoureuse et soignée d'un modèle conceptuel d'aquifère par un exemple tiré de Tremblay et al. (2003).

4.5.1 Description du site à l'étude

L'aquifère de Laterrière, situé à une quinzaine de kilomètres au sud de Chicoutimi, Québec, est exploité à des fins municipale et industrielle. Il s'étend sur près de quatre kilomètres entre les rivières Chicoutimi au nord-ouest et du Moulin au sud-est. Au sud-ouest, le dépôt s'appuie au pied des montagnes marquant la limite sud du Graben du Saguenay. La limite nord-est de l'aquifère n'est pas bien identifiée. Les dépôts, présents sur plusieurs kilomètres, reposent sur des roches appartenant à la province géologique du Grenville (Laurin et Sharma, 1975).

4.5.2 Identification du contexte géologique

L'aquifère de Laterrière fait partie d'une plaine d'épandage formée entre une langue de glace résiduelle sur le plancher du graben du Saguenay et la ligne d'escarpements marquant la limite sud de ce dernier (position de retrait glaciaire 3 à la Figure 4.1). Il s'agit d'un dépôt de sable et gravier ponctué de plusieurs kettles. Ce dépôt est partiellement couvert de sable fossilifère de la mer Laflamme qui montrent aussi des éléments de plage (Lasalle et Tremblay, 1978). Il date du Wisconsin, époque du dernier épisode glaciaire au Québec.

La partie ouest de cette bande correspond à la partie proximale d'un dépôt d'épandage caractérisé par des barres graveleuses et des chenaux graveleux et sablonneux (Duchesne, 2001). La direction d'écoulement lors du dépôt était dirigée du nord-ouest vers le sud-est. Des dépôts de sable avec un peu de gravier et de silt en représentent une partie plus distale vers le sud-est. Le puits de Laterrière se situe dans cette partie. Aucune trace de fossile n'a été observée dans cette zone peut-être parce que l'environnement de dépôt est subaérien ou parce que le milieu n'a pas favorisé leur préservation ou leur existence ou parce qu'il est impossible d'en trouver.

Par contre, l'extrémité est de la bande de dépôts identifiée par Lasalle et Tremblay (1978) correspond à un delta d'épandage sous marin au contact avec les

eaux marines, qui venaient de libérer de glace le sillon du fjord du Saguenay jusqu'au fond de la Baie des Ha! Ha! (Paradis et Parent, 2002). Cette partie est de la bande est vraisemblablement précoce par rapport à la partie ouest où se situe la présente étude.

A) Données géologiques expérimentales

L'interprétation de dépôt d'épandage est basée sur des observations de surface. À Laterrière, la stratigraphie de l'aquifère montre une alternance de couches de sable fin à grossier et de couches de gravier dans le forage utilisé pour faire un essai de pompage (Denis, 1997). La séquence stratigraphique est décrite seulement en fonction des variations granulométriques. Ces observations ne permettent pas une description détaillée des faciès sédimentaires car les structures et les textures n'ont pas été conservées par le mode d'échantillonnage effectué. L'essai de pompage effectué suite au forage a permis d'estimer les paramètres hydrogéologiques du secteur.

B) Modèles géologiques théoriques

La plaine d'épandage proglaciaire théorique (Edwards, 1986) est composée de faciès de sable et gravier stratifiés, déposés de façon adjacente au glacier. Ainsi, les processus de dépôt qui sont actifs lors de la formation d'une plaine d'épandage proglaciaire sont similaires à ceux des réseaux tressés des cônes alluviaux. La dominance des réseaux tressés dans les dépôts de plaine

d'épandage résulte de l'écoulement variable, des débris variables et de l'absence de végétation dû au climat trop froid. Les caractéristiques typiques des dépôts de contact glaciaire stratifiés, conservées dans les dépôts de plaine d'épandage proglaciaire, s'atténuent en s'éloignant de la marge du contact glaciaire.

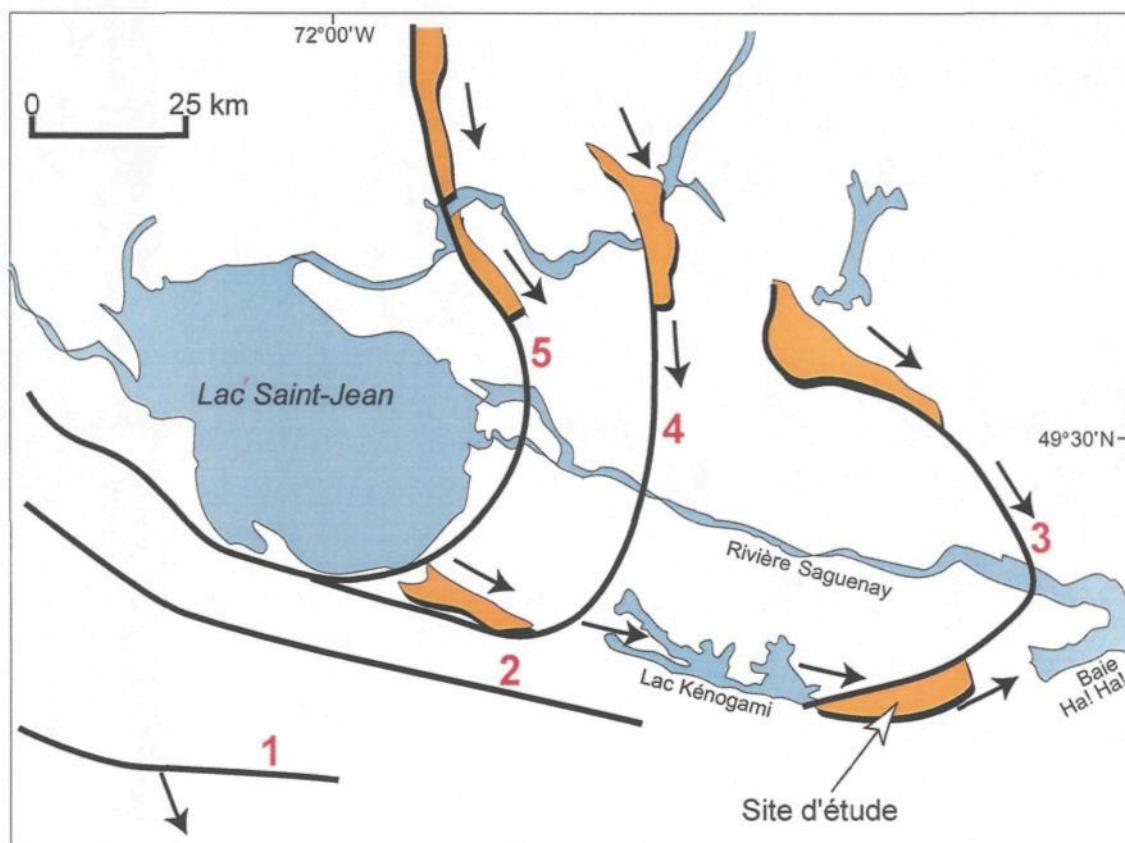


Figure 4.1: Dépôts d'épandage au Saguenay – Lac Saint-Jean (colorés). Les nombres 1 à 5 représentent les positions successives du front glaciaire. Les flèches donnent le sens de l'écoulement de l'eau (d'après Lasalle et Tremblay 1978).

C) *Combinaison des données*

La description de forage correspond à la description de faciès de dépôts de plaine d'épandage décrite par Lasalle et Tremblay (1978) et Duchesne (2001). Les observations de terrain correspondent à la description théorique (Edwards, 1986) du modèle de plaine d'épandage proglaciaire.

4.5.3 Identification du type d'aquifère exploité à Laterrière

L'aquifère de Laterrière est constitué d'un dépôt d'épandage sub-aérien qui correspond au type P4.1. Les sédiments graveleux se déposent sous forme de lentilles et de cordons et les sédiments plus sablonneux se déposent entre les chenaux et dans ces derniers à la fin de leur comblement. Les faciès hydrogéologiques identifiés selon Klingbeil et al. (1999) sont les suivants (Tableau 4.6) : BM, OW, P/T/H, M et S.

4.5.4 Modèle conceptuel

Suite à l'identification du type d'aquifère, le modèle conceptuel peut être établi en intégrant les particularités géologiques propres à la plaine d'épandage de Laterrière comme, par exemple, les dimensions des différents faciès. Les barres graveleuses observées se trouvent dans une matrice composée d'un mélange de sable et de gravier et provenant de dépôt de chenaux (Duchesne, 2001).

L'épaisseur des barres varie de 0,5 à 2 m et leur longueur peut dépasser la dizaine de mètres. Les dépôts de chenaux, de grande étendue latérale, ont une épaisseur variant de 0.5 à 1.5 m.

La granulométrie et le tri distincts de ces deux matériaux aquifères entraînent l'attribution de caractéristiques hydrogéologiques différentes: les barres graveleuses ont une plus grande conductivité hydraulique que les dépôts de chenaux sablonneux. Ainsi, les barres graveleuses présentent un plus fort potentiel aquifère que la matrice sablonneuse.

Cet exemple démontre bien qu'il existe autant de modèle conceptuel que d'aquifère. Lorsque le type d'aquifère et ses caractéristiques géologiques particulières sont bien identifiés, leur dimension et leur orientation doivent être paramétrées. Les paramètres hydrogéologiques peuvent être mesurés pour chaque milieu géologique. Le modèle conceptuel doit être mis en contexte et ses limites physiques et hydrogéologiques doivent également être établies. Les limites hydrogéologiques correspondent notamment à des charges hydrauliques, des formations imperméables, des cours d'eau, etc. Le modèle conceptuel doit être construit en intégrant la totalité de ces éléments.

Dans l'optique d'estimer l'aire d'alimentation, l'utilité de créer un modèle conceptuel consiste à le transformer en modèle numérique dans le but d'effectuer

des simulations numériques. L'utilité de la simulation numérique se traduit notamment par l'estimation de la direction et de la vitesse d'écoulement à l'intérieur de l'aquifère. Une dizaine d'estimations d'aire d'alimentation par des simulations numériques simples sont présentées au chapitre suivant.

CHAPITRE 5 : INFLUENCE D'UN CORPS PLUS PERMÉABLE LORS DE L'ESTIMATION DE L'AIRE D'ALIMENTATION

La simulation numérique, un outil très efficace et de plus en plus perfectionné, est fréquemment utilisée pour déterminer les vecteurs d'écoulement de l'eau souterraine ainsi que le cheminement de panaches de contamination dans les aquifères, et ce, autant dans les milieux fracturés que dans les dépôts meubles.

La réalisation d'une simulation numérique commence par la définition de la géométrie du modèle ou le dimensionnement de la zone à l'étude. Le modèle conceptuel doit ensuite être établi en considérant les caractéristiques qui lui sont spécifiques pour déterminer son architecture interne et ses relations avec les eaux de surface (infiltration ou résurgence). Les paramètres hydrogéologiques tels la porosité, la conductivité hydraulique et l'emmagasinement sont des données

indispensables. En plus du modèle conceptuel, les conditions aux limites traduisent les relations hydrauliques entre le domaine simulé et le milieu environnant. Finalement, ces éléments sont traduits en langage numérique et traités par un modèle mathématique basé sur une équation différentielle. Généralement, les simulations numériques correspondent à des cas réels plus ou moins simplifiés.

Ce chapitre présente d'abord une brève description du logiciel de simulation numérique utilisé, les caractéristiques du modèle conceptuel et les résultats de plusieurs cas simples de simulation numérique. Les simulations sont réalisées avec pour commun objectif de démontrer que l'aire d'alimentation représentée par les lignes d'écoulement de l'eau souterraine varie avec la diversité des corps géologiques qui composent l'aquifère.

5.1 Brève description du logiciel de simulation numérique MODFLOW

L'équation de l'écoulement utilisée est celle de l'écoulement transitoire en milieu poreux (McDonald et Harbaugh, 1988):

$$\frac{\partial \left(K_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(K_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(K_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right)}{\partial z} - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

où :

- K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} sont les valeurs de conductivité hydraulique selon les axes x, y et z, lesquels sont considérés parallèles aux axes principaux de conductivité hydraulique ($L t^{-1}$);
- h est la charge hydraulique (L);
- W représente la recharge et/ou les sorties d'eau (t^{-1});
- S_s est l'emmagasinement spécifique du matériel poreux (L^{-1});
- t est le temps (t).

Ce logiciel est conçu pour simuler l'écoulement dans des aquifères constitués de dépôts meubles et s'applique difficilement lorsque l'aquifère est de type fracturé. D'autres logiciels de simulation numérique sont conçus pour simuler l'écoulement dans un aquifère en milieu fracturé, ils se basent généralement sur des méthodes d'interpolation en éléments finis. Parmi ces logiciels, il faut notamment mentionner FRAC3DVS et FRACTRAN commercialisés par Waterloo Hydrogeologic Inc. ainsi que le logiciel développé par Rouleau et Gale (1987; Rouleau, 1988).

5.2 Résultats de simulations numériques

Les simulations numériques réalisées dans le cadre de cette étude sont toutes exécutées à l'aide du logiciel Visual Modflow commercialisé par Waterloo Hydrogeologic Inc. Seuls des modèles conceptuels d'aquifères constitués de

dépôts meubles sont simulés, et ce, dans le but de demeurer à l'intérieur des limites d'application du logiciel. Au total, dix cas comparatifs démontrent la complexité de l'estimation de l'aire d'alimentation de captage dans un aquifère hétérogène. Le premier cas représente un aquifère sablonneux homogène et isotrope avec des particularités géométriques, géologiques et hydrogéologiques propres. Quant aux neuf autres cas, ils sont construits à partir des mêmes propriétés que le premier mais un ou plusieurs rubans plus perméables y sont introduits.

Ce modèle conceptuel peut s'apparenter à certains types d'aquifère définis au chapitre 3, notamment un dépôt fluvioglaciaire, un esker enfoui, un dépôt alluvial ou un dépôt d'épandage subaérien.

5.2.1 Cas 1 : aquifère homogène et isotrope

Le premier cas correspond à un aquifère constitué de dépôts meubles, homogène et isotrope dont la granulométrie correspond à celle d'un sable moyen. La recharge annuelle est de 550 mm/année en considérant que le ruissellement est nul ou négligeable. Cette hypothèse est valide pour un aquifère constitué de sable perméable comme pour le présent cas. La conductivité hydraulique est la même dans toutes les directions, $k_x=k_y=k_z=0,0003$ m/s; cette valeur est basée sur les résultats des travaux de Tremblay P. (2005). Les dimensions de la zone

analysée sont de 1 000 m x 1 000 m x 20 m (largeur x longueur x hauteur). Quant aux mailles du modèle numérique, elles mesurent toutes 10m x 10m x 1m (largeur x longueur x hauteur) sauf à proximité de l'ouvrage de captage où elles sont divisées par deux. L'ouvrage de captage soutire l'eau de l'aquifère à un débit moyen de 400 m³/jour et la crête se trouve dans l'intervalle de profondeur de 14 à 17 m. L'aquifère est bordé de deux limites à charge constante, l'une borde la limite droite du modèle (Figure 5.1) par une charge de 19 m et l'autre borde la limite gauche du modèle par une charge constante de 16 m. Ces limites correspondent à l'élévation du toit de la nappe phréatique; cette dernière s'écoule donc vers l'ouest. Pour visualiser le cheminement de l'eau dans l'aquifère en bordure du puits, dix particules virtuelles sont distribuées en cercle autour du puits et le logiciel simule le cheminement qu'elles ont suivi avant d'arriver au puits de pompage. Ceci permet de visualiser dix lignes d'écoulement situées en bordure du puits. De cette façon, l'aire d'alimentation du puits est facile à estimer. La valeur utilisée pour le coefficient d'emmagasinement spécifique est de 0,00125 m⁻¹ et le coefficient d'emmagasinement total est de 0,25. La porosité totale est de 0,3 et la porosité efficace de 0,25 (Banton et Bangoy, 1999). Le coefficient d'emmagasinement total et la porosité efficace ont la même valeur; cette correspondance est raisonnable pour un aquifère à nappe libre (Banton et Bangoy, 1999).

Pour comparer l'aire d'alimentation estimée à partir de la simulation numérique et celle estimée avec les équations analytiques présentées au chapitre 2, les deux aires d'alimentation sont représentées sur chaque figure. Pour les cas 2 à 10, un corps géologique plus perméable est introduit dans la matrice. Lorsque la crête se situe dans la matrice, l'aire d'alimentation est calculée avec la valeur de conductivité hydraulique de la matrice. Tandis que lorsque la crête est introduite dans le corps plus perméable, l'aire d'alimentation est calculée avec la valeur de conductivité hydraulique du corps plus perméable. Les valeurs paramétrant l'aire d'alimentation calculée avec les équations analytiques sont données au tableau 5.1.

Tableau 5.1: Dimensions de l'aire d'alimentation calculée par les équations analytiques de Bear et Jacobs (1966) données à la section 1.1, pour le sable et les corps graveleux plus perméables qui seront introduits dans les cas 2 à 10. A : distance à la limite aval de la zone d'appel au puits de pompage; L : largeur maximale de la zone de captage en amont par rapport à la direction d'écoulement des eaux; B : largeur de la zone de captage au niveau du puits.

Matériel	Conductivité hydraulique (K) (m/s)	A (m)	L (m)	B (m)
Sable	0,000 3	55	345	173
Gravier	0,004 5	4	25	12

Pour le premier cas, les lignes d'écoulement résultant de la simulation numérique (Figure 5.1) tracent le contour de l'aire d'alimentation qui est de forme

parabolique, conforme à celle obtenue par la méthode analytique (Bear et Jacobs, 1965).

Le débit total soutiré par l'ouvrage de captage correspond à $Q_{\text{puits}} = 400 \text{ m}^3/\text{jour} \times 365 \text{ jour/an} = 146\,000 \text{ m}^3/\text{an}$. Le débit de recharge verticale correspond au produit du flux de la recharge verticale et de la superficie de l'aire d'alimentation estimée par simulation numérique, soit $Q_{\text{recharge}} = 139\,653 \text{ m}^2 \times 0,55 \text{ m/an} = 76\,809 \text{ m}^3/\text{an}$. Par conséquent, 53% du débit total capté provient de la recharge naturelle et 47% provient de la limite à charge constante située en amont de l'ouvrage de captage.

Les aires de protection virologique et bactériologique sont également obtenues par simulation numérique en considérant les temps de parcours respectifs de 550 et 200 jours de l'eau souterraine dans le milieu aquifère. Ces aires de protection sont ovoïdes et, bien entendu, se situent à l'intérieur de l'aire d'alimentation.

Ce résultat sert de base de comparaison pour l'interprétation des résultats des simulations subséquentes dans lesquelles des éléments susceptibles de modifier les lignes d'écoulement ont été introduits.

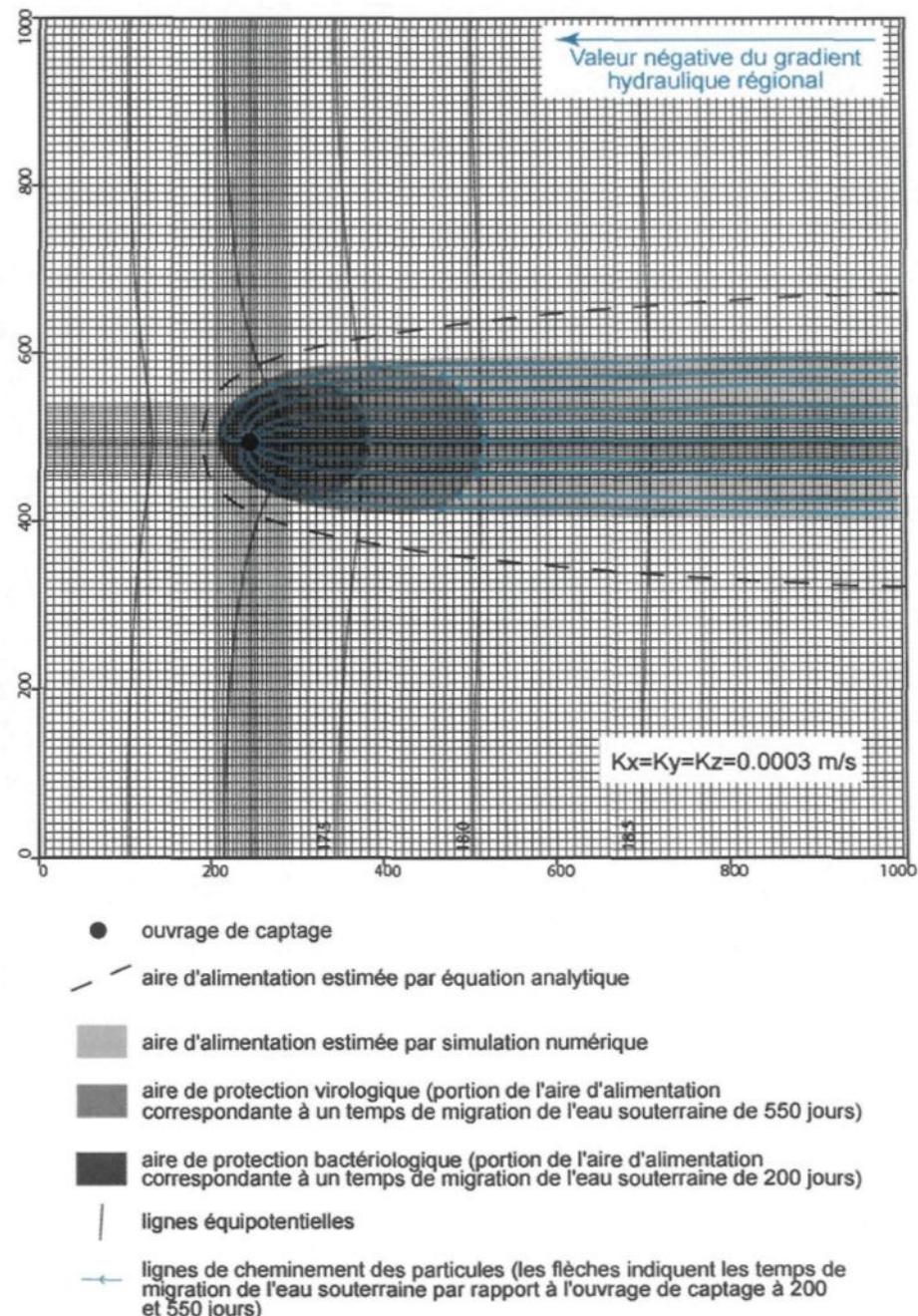


Figure 5.1: Vue en plan du premier cas illustrant l'aire d'alimentation d'un captage dans un aquifère constitué de dépôts meubles, homogène et isotrope constitué de sable.

La figure 5.2 montre une vue en coupe du résultat de la simulation avec les lignes d'écoulement de l'eau souterraine qui se dirigent toutes vers le puits. Les lignes d'écoulement situées sous le niveau de la crête se dirigent vers le puits mais l'eau ne semble pas être captée. Le captage induit un faible rabattement, ce qui veut dire qu'il y a une grande quantité d'eau dans le système qui provient de la recharge annuelle et des limites à charge constante amont et en aval.

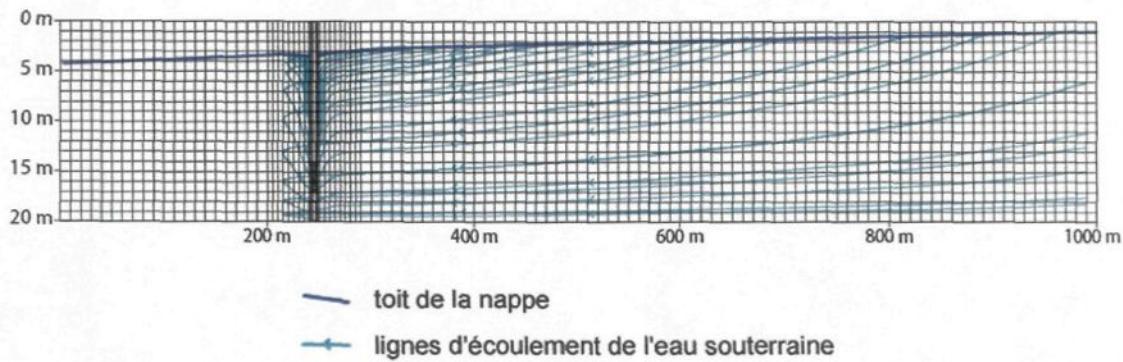


Figure 5.2: Vue en coupe du premier cas illustrant l'aire d'alimentation d'un captage dans un aquifère constitué de sable.

5.2.2 Cas 2 : introduction d'un cordon plus perméable parallèle à l'écoulement régional

Le modèle conserve les mêmes caractéristiques que celui présenté au cas 1, mais un cordon plus perméable ($k_x=k_y=k_z=0,0045 \text{ m/s}$; basé sur les données de Tremblay P., 2005) est introduit dans le modèle (Figure 5.3). Ce cordon a 3 m

d'épaisseur et il est placé dans l'intervalle de profondeur où se trouve la crête, soit entre 14 et 17 m; il n'affleure donc pas en surface. Lorsque la crête de l'ouvrage de captage se situe dans un cordon de gravier, l'aire d'alimentation calculée diffère étant donné la valeur plus élevée de la conductivité hydraulique. Toujours selon la méthode analytique, l'aire d'alimentation possède alors les dimensions données au tableau 5.1.

Sur la figure 5.3, deux aires d'alimentation calculées sont tracées en plus de celle estimée par simulation numérique. La plus vaste aire d'alimentation estimée à partir des équations analytiques correspond à celle calculée avec la valeur de conductivité hydraulique du sable tandis que la plus étroite correspond à celle calculée avec la valeur de conductivité hydraulique du gravier. Pour ce qui est des aires de protection obtenues par simulation numérique, elles se situent à mi-chemin entre celles calculées. Cependant, les aires de protection virologique et bactériologique sont très étirées suivant le cordon graveleux. Il est donc fort probable qu'avec un modèle de plus grande dimension, l'aire d'alimentation réelle soit très élancée, suivant le cordon plus perméable de même que les aires de protections virologique et bactériologique.

5.2.3 Cas 3 : introduction d'un cordon plus perméable à 30° par rapport à la direction de l'écoulement régional

Ce cas se base sur les mêmes caractéristiques que le cas précédent à l'exception que le cordon de gravier est pivoté de 30° suivant un sens horaire, il est donc également à 30° de la direction d'écoulement régional, et que la crête se situe dans la matrice sablonneuse et non à l'intérieur du cordon graveleux (figure 5.4).

Ce cas montre bien que l'aire d'alimentation estimée par simulation se pince et se décale à l'intérieur du cordon graveleux et les aires de protections virologique et bactériologique se décalent également et s'allongent. Ceci s'explique par la vitesse d'écoulement qui est plus rapide dans le corps plus perméable. À cause de l'angle de 30° du corps par rapport à l'écoulement régional, les lignes d'écoulement qui le traversent se décalent de 30° et y migrent sur une distance plus longue que dans la matrice sablonneuse.

Comme le cordon de gravier se trouve dans l'intervalle de profondeur entre 14 et 17 mètres et qu'il n'affleure pas en surface, il est possible qu'il ne soit pas détecté lors d'une campagne de terrain. Lorsqu'une telle situation se présente, il est difficile pour l'interprète de considérer cet élément perturbateur des lignes d'écoulement. Une bonne connaissance du type d'aquifère exploité peut servir de

guide pour présumer la présence de ces éléments perturbateurs induits par un changement de faciès hydrogéologique.

5.2.4 Cas 4 : introduction d'un cordon plus perméable à 45° par rapport à la direction de l'écoulement régional

Ce cas se base sur les mêmes caractéristiques que le cas précédent à l'exception que le cordon de gravier est pivoté de 45° suivant un sens horaire par rapport au premier cas et il est également à 45° de la direction d'écoulement régional. La crête se situe dans la matrice sablonneuse et non à l'intérieur du cordon graveleux (Figure 5.5), comme le cas précédent.

Presque semblable au cas précédent, l'écoulement est décalé et modifie la forme de l'aire d'alimentation estimée par simulation par rapport à celle calculée. En effet, les aires de protection obtenues par simulation se décalent et s'étirent lorsque les lignes d'écoulement traversent le cordon plus perméable, sauf pour l'aire de protection bactériologique dont les dimensions n'atteignent pas le cordon graveleux.

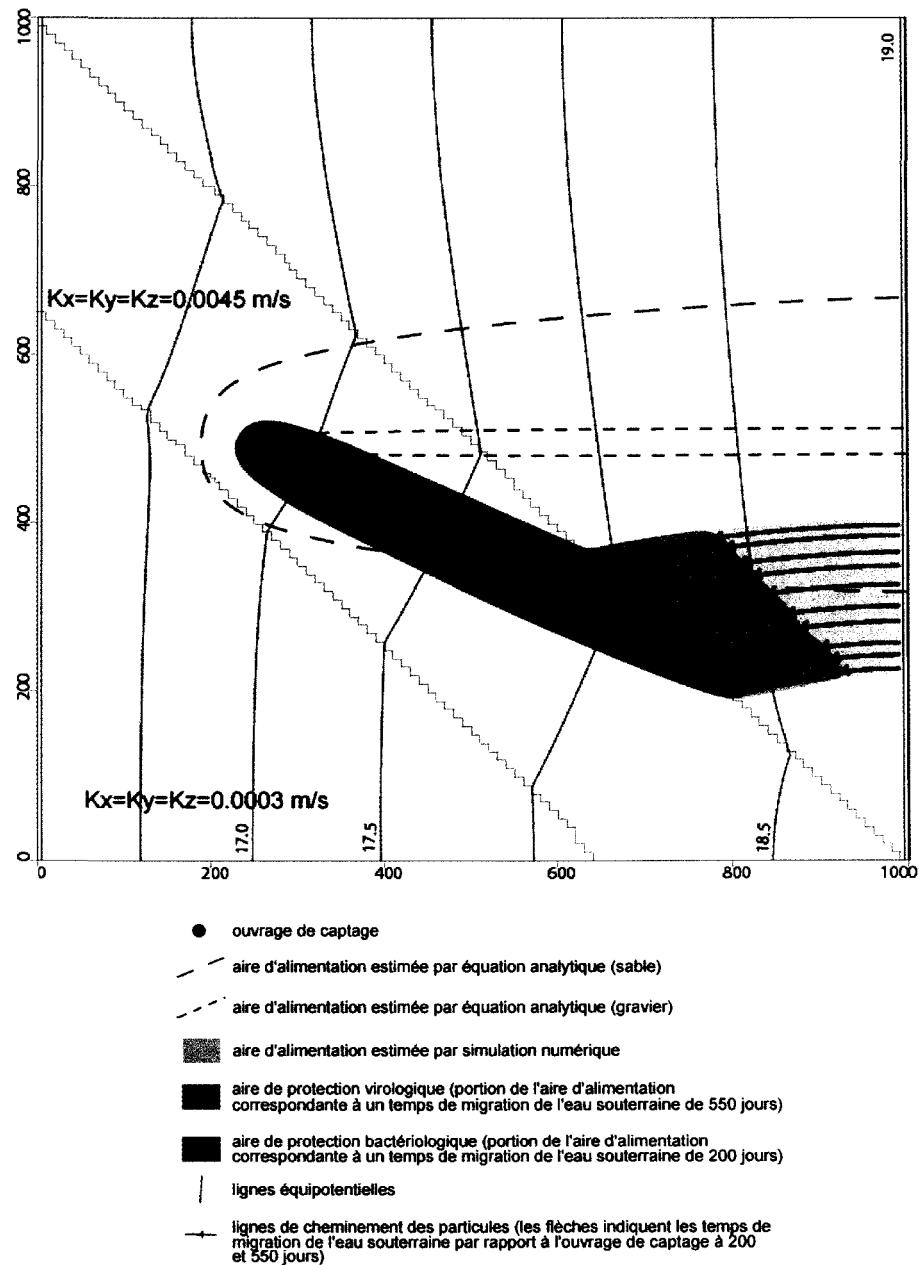


Figure 5.3: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du deuxième cas. Il est important de noter que pour alléger la figure le maillage n'apparaît pas sur cette figure ni sur celles représentant les cas subséquents mais qu'il est toujours le même que pour le premier cas.

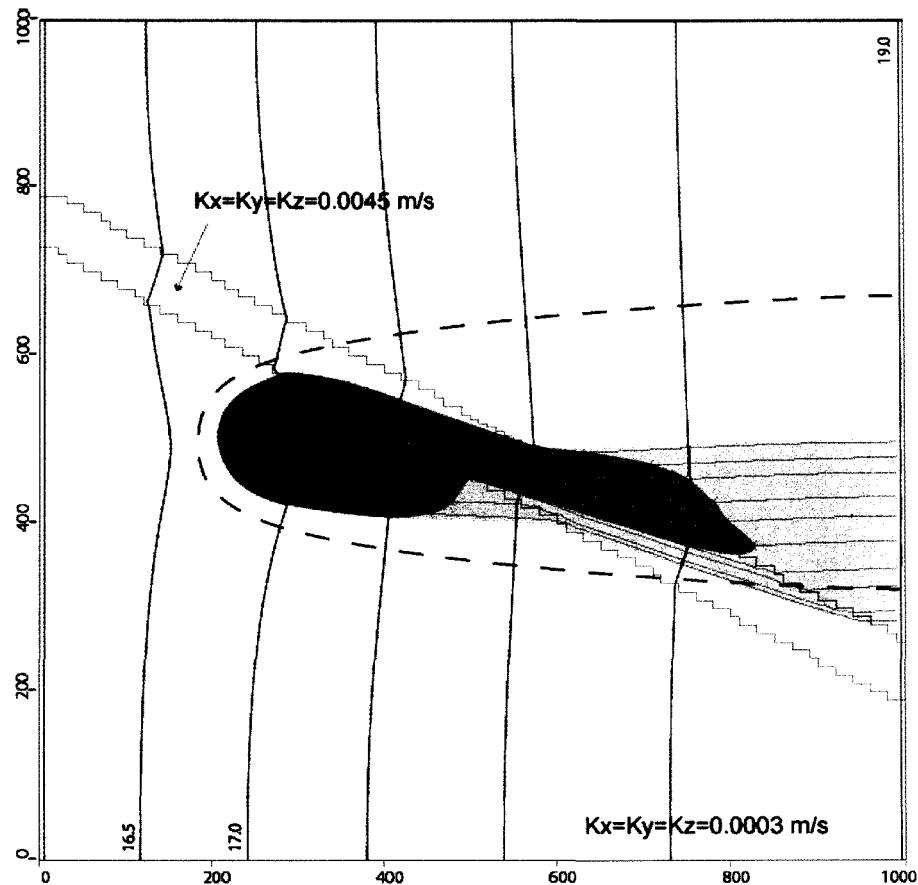


Figure 5.4: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du troisième cas. La légende est la même que celle de la figure 5.3.

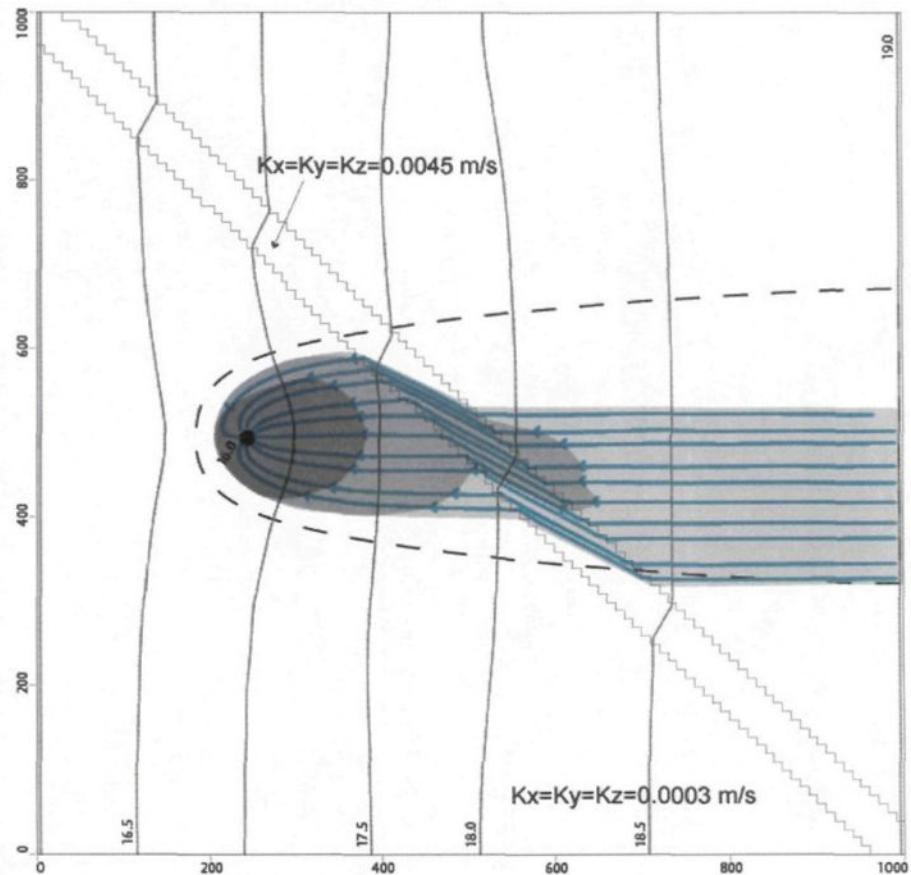


Figure 5.5: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du quatrième cas. La légende est la même que celle de la figure 5.3.

5.2.5 Cas 5 : introduction d'un cordon plus perméable à 60° par rapport à la direction de l'écoulement régional

Ce cas se base sur les mêmes caractéristiques que le cas précédent à l'exception que le cordon de gravier est pivoté de 60° suivant un sens horaire, il est donc également à 60° de la direction d'écoulement régional. La crête se situe dans la matrice sablonneuse et non à l'intérieur du cordon graveleux (Figure 5.6), comme les cas 3 et 4.

Le décalage et l'allongement des aires de protection sont ici un peu moins prononcé que pour les cas 3 et 4. Comme pour le cas 4, l'aire de protection bactériologique se situe entièrement en dehors de la zone de perturbation, elle n'est donc pas modifiée par le cordon plus perméable.

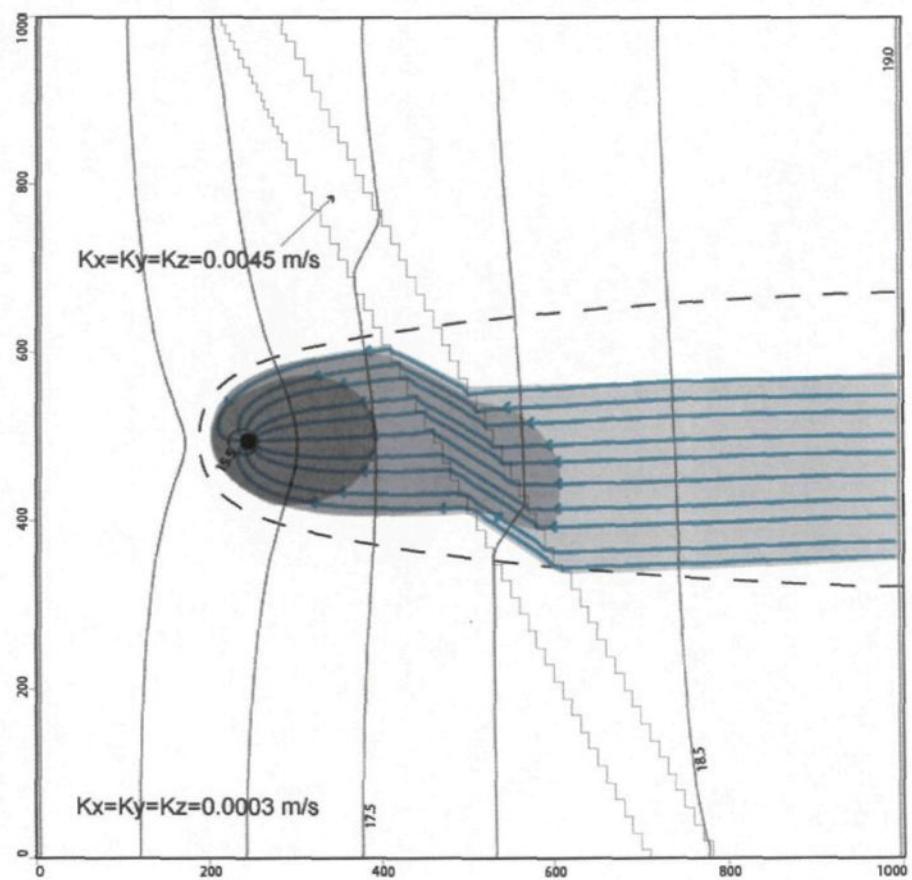


Figure 5.6: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du cinquième cas. La légende est la même que celle de la figure 5.3.

5.2.6 Cas 6 : introduction d'un cordon plus perméable perpendiculaire à la direction de l'écoulement régional

Ce cas se base sur les mêmes caractéristiques que les cas 2 à 5 à la différence que le cordon plus perméable est perpendiculaire à la direction de l'écoulement régional (Figure 5.7). La crépine se situe dans le cordon plus perméable.

Le corps graveleux induit un élargissement au droit de l'ouvrage de captage de l'aire d'alimentation simulée. Cette aire d'alimentation se rapproche davantage de celle calculée avec la valeur de conductivité hydraulique du sable que de celle du gravier qui est très étroite.

5.2.7 Cas 7 : introduction de trois cordons plus perméables à 45° de la direction de l'écoulement régional

Ce cas se base sur les mêmes caractéristiques que le cas 4 mais le nombre de cordons plus perméables est élevé à 3. La crépine se situe dans la matrice sablonneuse (Figure 5.8).

Ce cas, comparé au cas 4, démontre que trois cordons plus perméables accentuent le décalage de l'aire d'alimentation puisque l'écoulement de l'eau est plus rapide à l'intérieur des corps plus perméables.

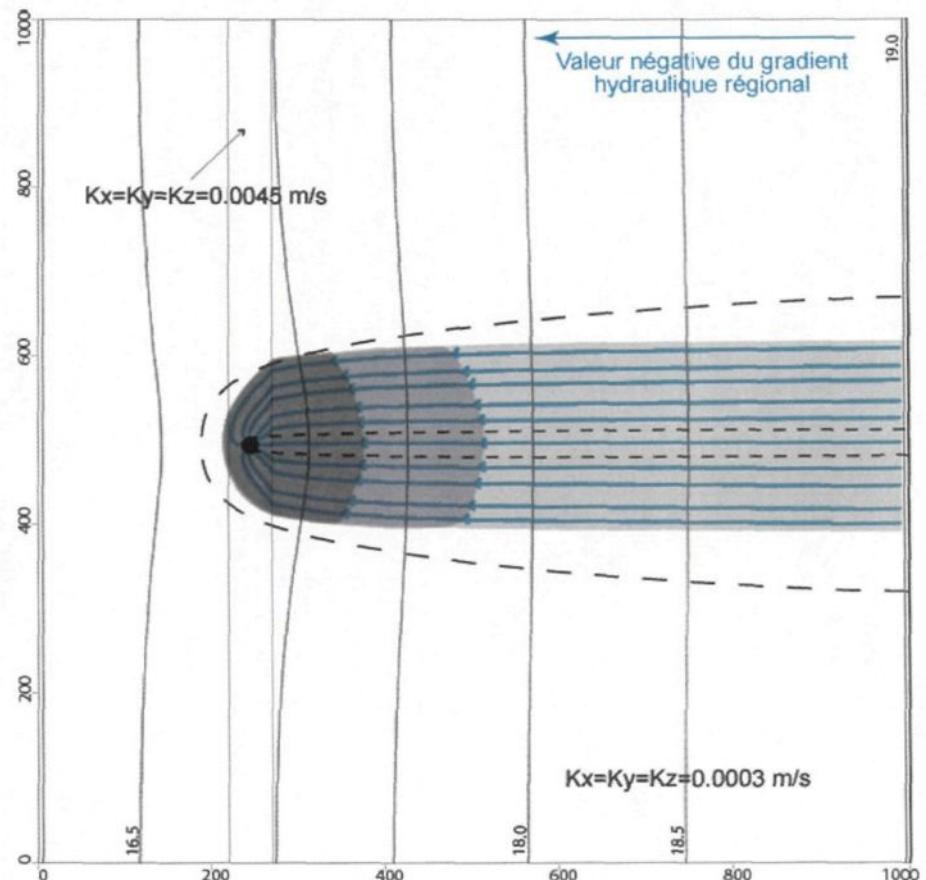


Figure 5.7: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du sixième cas. La légende est la même que celle de la figure 5.3.

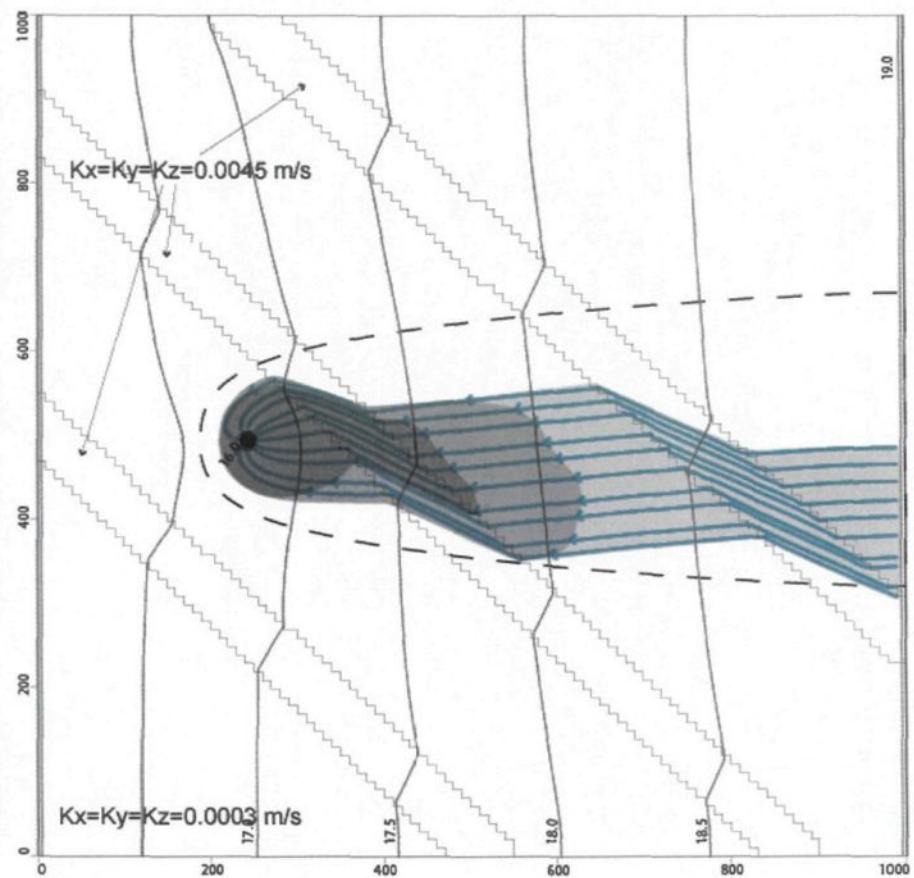


Figure 5.8: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du septième cas. La légende est la même que celle de la figure 5.3.

5.2.8 Cas 8 : introduction d'une succession de cordons plus perméables à 45° de la direction de l'écoulement régional

Ce cas se base sur les mêmes caractéristiques que le cas précédent mais plusieurs autres cordons plus perméables ont été ajoutés. La crête se situe dans la matrice sablonneuse (Figure 5.9).

Les cordons plus perméables sont plus rapprochés que pour le cas précédent et les lignes équipotentielles sont également plus rapprochées. Les décalages successifs des aires de protection sont marqués lors de la migration de l'eau souterraine à travers les corps plus perméables.

En comparant les cas 4, 7 et 8, nous remarquons que c'est principalement l'angle avec lequel les corps plus perméables recoupent l'écoulement régional qui modifie les aires de protection.

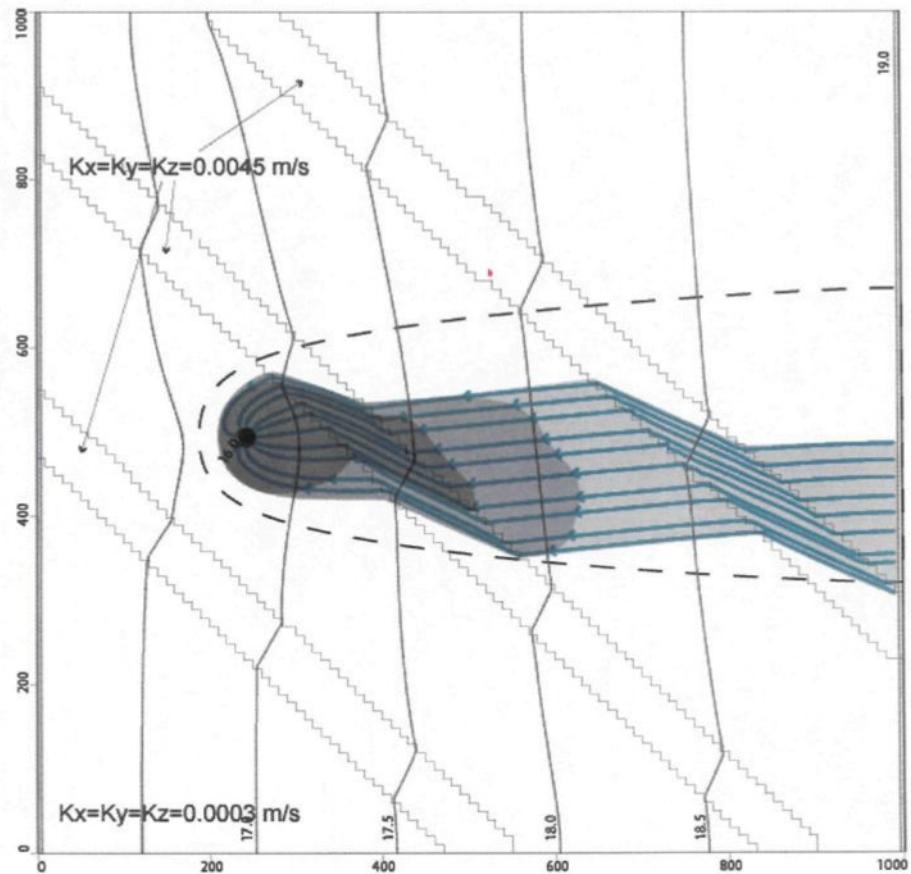


Figure 5.9: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du huitième cas. La légende est la même que celle de la figure 5.3.

5.2.9 Cas 9 : introduction d'un large cordon plus perméable à 45° de la direction de l'écoulement régional situé à côté de l'ouvrage de captage

Ce cas se base sur les mêmes caractéristiques que le cas 4 mais le cordon plus perméable est près de 3 fois plus large (Figure 5.10). La crête se situe dans la matrice sablonneuse.

Le corps plus perméable étant plus large, l'eau souterraine prend plus de temps à le traverser, ce qui modifie beaucoup les aires de protection. Elles sont toutes décalées et les aires de protection bactériologique et virologique sont très étirées à l'intérieur du cordon.

5.2.10 Cas 10 : introduction d'un large cordon plus perméable à 45° de la direction de l'écoulement régional situé à la même hauteur que l'ouvrage de captage

Ce cas est semblable au précédent à l'exception que la crête se situe à l'intérieur du cordon plus perméable (Figure 5.11).

Ce cas illustre l'allongement et le décalage des aires de protection dans le sens du cordon plus perméable. Elles sont également plus étroites à l'intérieur du cordon plus perméable que dans la matrice moins perméable.

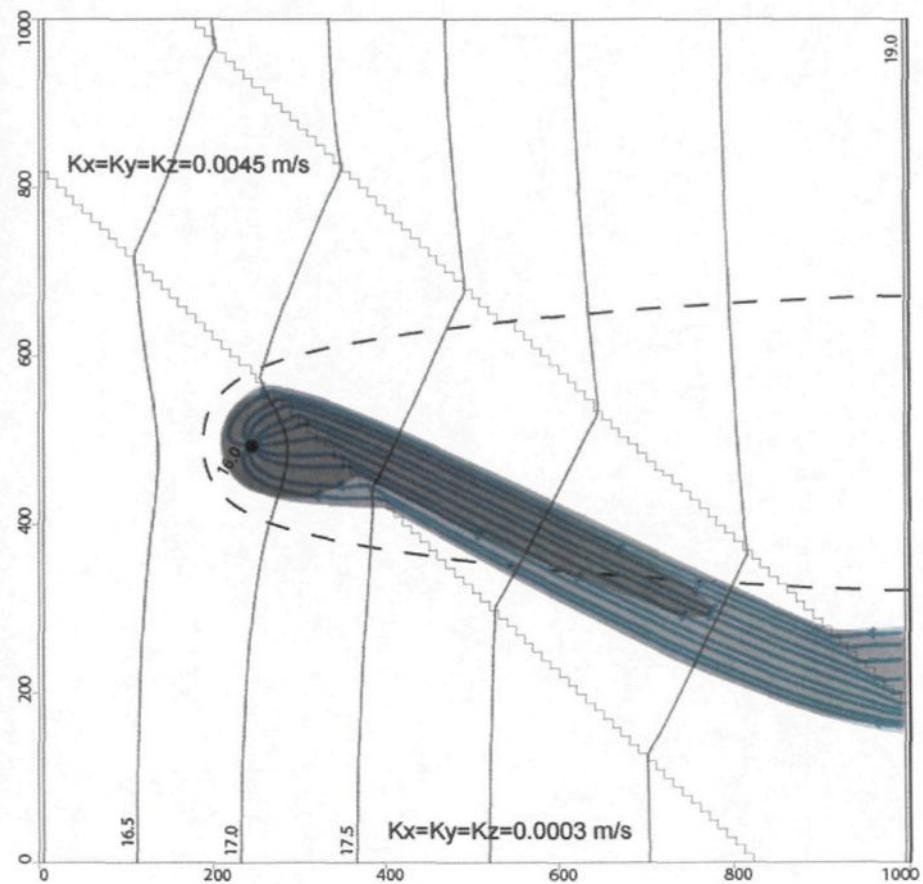


Figure 5.10: Vue en plan montrant le résultat de la simulation du neuvième cas. La légende est la même que celle de la figure 5.3.

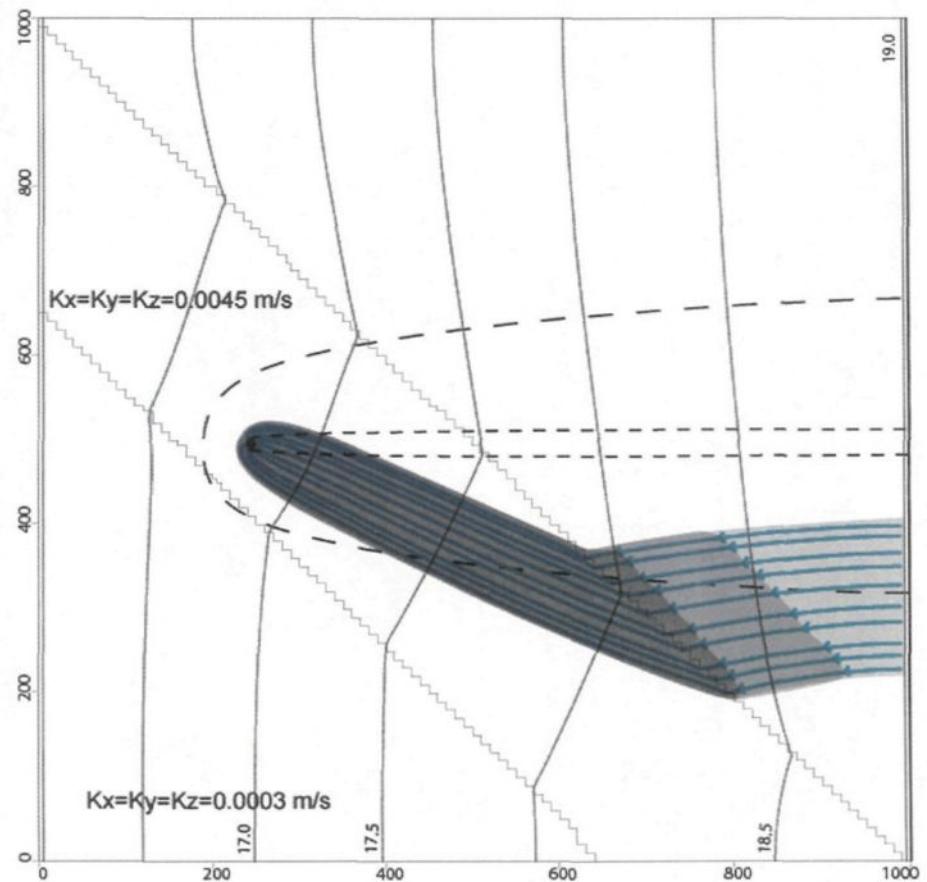


Figure 5.11: Vue en plan du résultat de la simulation du dixième cas. La légende est la même que celle de la figure 5.3.

5.3 Discussion sur les résultats des simulations

Plusieurs facteurs pouvant influencer la forme et l'étendue de l'aire d'alimentation sont investigues dans ce chapitre, notamment l'introduction d'un corps plus perméable dans une matrice perméable, son orientation, sa grandeur, le nombre de corps plus perméables et l'introduction de la crépine à l'extérieur ou à l'intérieur du corps plus perméable.

Pour l'ensemble des cas l'aire d'alimentation est estimée par deux méthodes, par simulation numérique et par la méthode analytique de Bear et Jacobs (1965). Pour aucun des cas les méthodes donnent la même estimation de l'aire d'alimentation. Le premier cas, soit le cas de référence, a une aire d'alimentation estimée par simulation numérique dont la forme est semblable à celle estimée par la méthode analytique mais l'étendue est différente. L'aire d'alimentation estimée par simulation numérique protège un territoire plus petit que celle estimée par la méthode analytique. Cette dernière suppose que l'aquifère possède certaines caractéristiques, notamment il doit être confiné et homogène, son extension latérale est infinie et la crépine le recoupe sur toute son épaisseur. Les dix cas simulés ne respectent pas tous ces critères, entre autres ils ne sont jamais confinés, plus d'un faciès constitue l'aquifère sauf pour le premier cas et le puits n'est crépiné que sur 3 mètres sur une possibilité de 20. Par conséquent,

l'aire d'alimentation estimée par simulation pour chacun des cas est certainement plus exacte que celle obtenue par la méthode analytique.

Les cas 2 à 6 permettent de vérifier l'influence de l'orientation d'un ruban graveleux introduit dans la matrice sablonneuse. Lorsque le ruban est orienté parallèlement à l'écoulement souterrain et que la crête est dans le ruban, l'aire d'alimentation estimée par simulation est plus étroite et les aires de protection bactériologique et virologique sont étirées suivant le ruban graveleux. En pivotant le ruban à partir de l'orientation parallèle vers la perpendiculaire, l'aire d'alimentation estimée par simulation est décalée suivant l'orientation du ruban. Plus l'orientation du ruban tend vers la perpendiculaire, moins l'aire d'alimentation est décalée. Les aires de protection bactériologiques et virologiques suivent également cette observation. Lorsque le ruban est complètement perpendiculaire à la direction d'écoulement régional, l'aire d'alimentation s'étend plus en largeur et reprend une forme parabolique, semblable à celle représentée au cas 2 lorsque le ruban est parallèle à la direction d'écoulement régional. La comparaison de ces cinq cas permet d'affirmer que l'orientation d'un corps plus perméable influence la forme et l'étendue des aires d'alimentation et de protection bactériologique et virologique.

Les cas 7 et 8 permettent d'évaluer l'influence du nombre de ruban graveleux. Dans les deux cas, l'aire d'alimentation a une forme en escalier et elle

ne présente pas de décalage global par rapport à l'aire d'alimentation estimée au premier cas. Un grand nombre de rubans graveleux induit un changement de direction de l'écoulement régional, c'est ce qui explique que l'aire d'alimentation n'est pas globalement décalée.

Les cas 9 et 10 démontrent l'influence à la fois d'un ruban plus perméable large et de l'implantation d'un puits à l'intérieur ou à l'extérieur du ruban. Le ruban plus perméable est orienté à 45° par rapport à la direction d'écoulement régional. Plus il est large plus il décale l'aire d'alimentation et en modifie la forme. Plus le ruban est large, plus l'aire d'alimentation estimée par simulation numérique est décalée par rapport à celle du cas 1. Si le puits est implanté dans le ruban graveleux plus large, alors le décalage s'applique également à la partie aval de l'aire d'alimentation.

Pour les cas 1, 3, 4, 5, 7, 8 et 9, la crête est introduite dans le sable. Parmi ces cas, l'aire d'alimentation estimée par simulation numérique est incluse à l'intérieur de l'aire d'alimentation estimée par la méthode analytique (Bear et Jacobs, 1965). Cette dernière protège donc l'aquifère sur un plus grand territoire sauf pour le cas 9 où, vers l'amont, l'aire d'alimentation estimée par simulation sort de l'aire d'alimentation estimée par la méthode analytique.

Quant aux cas 2, 6 et 10, la crépine est introduite dans le gravier. Pour estimer l'aire d'alimentation par la méthode analytique, la valeur de la conductivité hydraulique doit correspondre au matériel dans lequel est introduit la crépine. Ainsi, cette aire d'alimentation est beaucoup plus étroite que celle résultant des équations analytiques calculées avec la conductivité hydraulique du sable. Pour ces trois cas, l'aire d'alimentation estimée à partir de simulation numérique protège un plus grand territoire que celle estimée par la méthode analytique.

L'ensemble des simulations présentées dans ce chapitre démontre l'importance de connaître les caractéristiques géologiques de l'aquifère pour estimer l'aire d'alimentation. Bien entendu, une multitude d'autres cas auraient pu illustrer l'importance des caractéristiques géologiques dans l'estimation de l'aire d'alimentation. Voici quelques-uns des facteurs pouvant influencer l'écoulement de l'eau souterraine qui n'ont pas été traités dans la présente étude : aquifère fracturé, formation imperméable dans l'aquifère, nappe confinée, profondeur de la crépine, débit de pompage, etc.

CHAPITRE 6 : DISCUSSION

Pour intégrer l'information géologique lors de l'estimation d'aires d'alimentation de captage d'eau souterraine, une démarche doit être appliquée. Les principales étapes de cette démarche sont décrites aux chapitres 3, 4 et 5.

Pour estimer l'aire d'alimentation, il faut tracer les lignes d'écoulement de l'eau souterraine de façon exacte. Les lignes d'écoulement menant à l'ouvrage de captage permettent d'estimer l'aire d'alimentation. Pour en arriver là, le type d'aquifère doit être bien déterminé au départ pour permettre d'identifier le plus précisément possible l'hétérogénéité et l'anisotropie caractérisant différents types d'aquifère. Une fois le type identifié, le modèle conceptuel doit être construit, c'est lui qui traduit réellement les caractéristiques de l'aquifère exploité. Le modèle conceptuel est traduit en langage numérique et l'aire d'alimentation peut être estimée par simulation.

6.1 Identification du type d'aquifère exploité

Pour identifier efficacement le type d'aquifère, les données doivent être suffisantes et de bonne qualité. En d'autres mots, la quantité et la qualité des données contrôlent le degré d'exactitude avec lequel le type d'aquifère est identifié. Lorsque la quantité de données disponibles ne permet pas d'identifier le type d'aquifère présent, il faut procéder à l'acquisition de nouvelles données jusqu'à ce que le type d'aquifère puisse être identifié. Même si la quantité de données est suffisante, ces dernières doivent être d'assez bonne qualité pour que le type d'aquifère soit identifié. Ainsi, la qualité des données disponibles doit être contrôlée. La qualité des données se vérifie de plusieurs façons, notamment s'il y a une corrélation ou un recouplement de l'information compilée par différents auteurs.

Il y a également une différence entre les données brutes et les données interprétées. Lorsque les données brutes sont disponibles, elles peuvent être interprétées par la personne qui mène l'étude hydrogéologique. Cependant, si les données disponibles sont déjà interprétées, alors les données sont biaisées par les connaissances et l'expérience de l'interprète.

Une fois toutes les données compilées, le type d'aquifère peut être identifié parmi ceux appartenant à la typologie élaborée au chapitre 3.

6.2 Utilisation de la typologie élaborée au chapitre 3

Pour que l'utilisateur de la typologie établie au chapitre 3 puisse l'employer adéquatement, il doit connaître les limites de celle-ci. Cette typologie a été élaborée dans le cadre de cette étude avec les données disponibles et elle dresse une liste des aquifères exploités au Québec en milieu fracturé et dans les dépôts meubles. Les données utilisées consistent essentiellement en des rapports hydrogéologiques appartenant aux municipalités participantes à l'étude, à des rapports hydrogéologiques effectués dans le cadre de travaux gouvernementaux ainsi qu'à des cartes géologiques diverses. Bien entendu, chaque auteur utilise une nomenclature qui lui est familière. Par conséquent, les termes utilisés varient d'un auteur à l'autre et ne sont pas standardisés. Notamment, certains auteurs distinguent des dépôts « fluvio-glaciaires » sans mentionner s'il s'agit d'épandage, d'esker ou autre. Tandis que d'autres auteurs identifient chacun des types de dépôt fluvio-glaciaire.

Bien que la typologie élaborée au chapitre 3 distingue six types d'aquifère en milieu fracturé et six constitués de dépôts meubles, elle peut être raffinée par l'ajout d'autres aquifères exploités au Québec. Elle peut également être adaptée à d'autres territoires. Aussi, il se peut que par l'ajout d'autres cas, il devienne nécessaire d'ajouter des types supplémentaires.

6.3 Application de la typologie à des cas réels

La typologie permet de traiter d'un seul type d'aquifère à la fois. Toutefois, dans la réalité, il est commun d'observer plus d'un type d'aquifère dans lesquels l'eau souterraine circule avant d'aboutir à l'ouvrage de captage. La typologie considère chaque type comme indépendant et ne donne pas d'outil pour traiter une possible interaction de l'écoulement de l'eau souterraine d'un type à l'autre. C'est plutôt lors de la construction du modèle conceptuel que cet aspect doit être considéré.

6.3.1 Identification des faciès hydrogéologiques

Pour identifier les faciès constituant l'aquifère, certains éléments doivent être précisément relevés. Pour les aquifères en milieu fracturé, deux faciès doivent être identifiés. Le premier correspond au massif rocheux lui-même sur lequel les paramètres hydrogéologiques telle la perméabilité devront être mesurés. Le second correspond aux paramètres des fractures. La qualité des données dépend de la compréhension par l'interprète du système de fracturation qualifié par l'orientation, la densité et l'ouverture des fractures. Pour ce faire, des affleurements rocheux doivent être accessibles dans le secteur d'implantation de l'ouvrage de captage. Ces données peuvent également être compilées à partir de carottes de forage orientées et de test in situ à l'intérieur de trou de forage. Cependant, la

méthode en forage ne garantit pas la même qualité de données et est beaucoup plus coûteuse que le relevé par affleurements.

Pour les aquifères constitués de dépôts meubles, c'est la méthode de Klingbeil et al. (1999) qui est préconisée pour identifier les différents faciès hydrogéologiques, c'est-à-dire que les faciès sédimentaires doivent préalablement être identifiés. La valeur de paramètres hydrogéologiques tel que la porosité et la conductivité hydraulique doivent être déterminés pour chaque faciès afin d'identifier les faciès hydrogéologiques. Toutefois, il peut s'avérer long, difficile et coûteux d'analyser d'un point de vue hydrogéologique tous les faciès. Par conséquent, les valeurs de Klingbeil et al. (1999) peuvent être utilisés en première estimation.

6.3.2 Construction d'un modèle conceptuel et conversion en modèle numérique

Pour que le modèle conceptuel puisse être converti en modèle numérique, il doit correspondre à une représentation simplifiée de l'aquifère en incluant les différents types d'aquifère qui se juxtaposent et se superposent. Tout le modèle repose sur l'interprétation de la personne qui le construit. Donc, d'une personne à l'autre le modèle peut se modifier. Toutefois, le résultat de la simulation numérique dont dérive l'aire d'alimentation doit être semblable d'un modèle à un autre.

Le modèle conceptuel doit couvrir au moins de 3 à 10 fois la superficie présumée de l'aire d'alimentation dans le but d'éviter l'influence du choix des conditions aux limites.

La conversion du modèle conceptuel en modèle numérique se limite aux paramètres et aux outils disponibles dans le logiciel de simulation numérique utilisé. Particulièrement, le logiciel Visual Modflow s'utilise facilement lorsque la topographie du modèle conceptuel est faiblement variable sur l'ensemble du modèle et ne présente pas de pente abrupte.

Le calage du modèle est une étape clé qui demande une grande rigueur à la personne qui fait l'analyse. Les entrées et les sorties d'eau doivent se balancer dans le modèle numérique. Les mesures de précipitation, de niveau d'eau et de débit dans les cours d'eau doivent être précises et validées sur une période assez longue pour qu'elles soient représentatives du bilan de masse de l'aquifère. La hauteur de nappe obtenue par simulation numérique doit correspondre à celles mesurées.

6.4 Influence de l'introduction d'un faciès plus perméable sur l'estimation de l'aire d'alimentation

Le chapitre 5 démontre que l'introduction d'un faciès plus perméable à l'intérieur d'un faciès perméable influence l'estimation de l'aire d'alimentation. À la fin du chapitre 5, une discussion comparative fait déjà le point sur chaque cas. Les paragraphes suivant présentent plutôt une discussion globale sur l'ensemble de l'étude.

Le chapitre 5 présente une série d'aquifères hétérogènes simples pour lesquels les résultats de simulation numérique sont présentés. En connaissant l'orientation, la dimension et la quantité de faciès plus perméables, il est possible de prédire quel sera l'effet de ce ou ces faciès sur la forme et l'étendue de l'aire d'alimentation estimée. Ces cas simples servent de référence pour les cas complexes qui sont plus représentatifs des cas réels.

Lors de l'estimation de l'aire d'alimentation d'un cas complexe, une forme et une étendue très approximatives peuvent être estimées. Cependant plusieurs autres facteurs influencent l'aire d'alimentation, notamment le débit de pompage, la quantité d'eau dans le modèle, les conditions aux limites, les paramètres hydrogéologiques, etc.

Toutefois, si les cas simples du chapitre 5 influencent l'aire d'alimentation, il faut considérer que l'aire d'alimentation estimée dans un aquifère complexe aura une forme et une étendue bien différente de la forme parabolique obtenue avec la méthode analytique de Bear et Jacobs (1965). Il est donc nécessaire de tracer les lignes d'écoulement de l'eau souterraine à l'intérieur d'un aquifère pour obtenir l'estimation la plus juste possible de l'aire d'alimentation.

CHAPITRE 7 : CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet consiste à présenter une démarche pratique pour estimer le plus exactement possible l'aire d'alimentation de captages d'eau souterraine. Il faut d'abord savoir que l'aire d'alimentation correspond au territoire sur lequel toute l'eau qui s'infiltra aboutit tôt ou tard à l'ouvrage de captage. Les lignes d'écoulement empruntées par l'eau souterraine sont autant d'outils à partir desquels l'aire d'alimentation peut être estimée. Le milieu géologique dans lequel s'écoule l'eau souterraine contrôle la direction et la vitesse de l'écoulement de l'eau souterraine, d'où l'importance de bien connaître le milieu géologique aquifère. Pour mettre sur pied une démarche permettant d'intégrer les connaissances géologiques certains outils doivent être disponibles, notamment une typologie des aquifères exploités au Québec et des résultats de simulations numériques simples.

La typologie des aquifères exploités au Québec a été élaborée à partir d'un inventaire compilant 30 aquifères exploités en milieu fracturé et 49 constitués de

dépôts meubles. Les aquifères fracturés ont été regroupés suivant leur type de fracture (orientation, densité, ouverture), leur lithologie et, dans certains cas, leur lieu géographique. Au total, six types d'aquifères en milieu fracturé constituent la typologie. Quant aux aquifères constitués de dépôts meubles, ils se distinguent par leur forme, leur étendue et l'agencement des faciès internes. La typologie comporte six types d'aquifère constitué de dépôts meubles. Cette typologie constitue un outil pour prédire des particularités géologiques qui contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine de chaque aquifère particulier. Ces particularités géologiques doivent ensuite être paramétrées afin qu'elles soient représentatives des paramètres réels de l'aquifère.

Parmi ces particularités géologiques qui contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine, il faut noter l'intégration d'un corps géologique plus perméable que la matrice et orienté à différents angles par rapport à la direction du gradient hydraulique régional. Ce corps plus perméable peut également être plus ou moins large et plus d'un corps plus perméable peut être intégré. L'influence de ces particularités géologiques a été vérifiée par simulation numérique.

Les résultats de simulation numérique permettent d'apprécier le comportement de l'écoulement de l'eau souterraine lorsque l'aquifère se compose d'un ou plusieurs faciès hydrogéologiques distincts. Ces résultats démontrent que les lignes d'écoulement de l'eau souterraine sont contrôlées par les différents

milieux géologiques. Par conséquent, l'aire d'alimentation estimée est contrôlée par les particularités géologiques de l'aquifère.

Les simulations numériques démontrent que les particularités géologiques de l'aquifère contribuent à dimensionner, paramétrier et estimer l'aire d'alimentation. Ces particularités géologiques peuvent être déduites en identifiant le type d'aquifère applicable à chaque aquifère particulier. Par conséquent, il est nécessaire d'intégrer les connaissances géologiques de l'aquifère afin d'estimer le plus exactement possible l'aire d'alimentation.

Pour aller plus loin, il serait intéressant d'analyser la possibilité de prédire de façon intuitive la forme approximative de l'aire d'alimentation en connaissant le type d'aquifère exploité.

RÉFÉRENCES

- Aigner, T., Teutsch, G. et Huggenberger, P. 1999. Aquifer Sedimentology. *Sedimentary Geology*, **129** : 177-366.
- Anderson, M.P. 1989. Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments. *Geological Society of America Bulletin*, **110** : 501-511.
- Back, W., Herman, J.S. et Paloc, H., éditeurs, 1992. Hydrogeology of Selected Karst Regions. *International Contributions to Hydrogeology*, International Association of Hydrogeologists, vol. 13, 493 pages.
- Back, W., Rosenschein, J.S. et Seaber, P.R., éditeurs, 1988. Hydrogeology. Geological Society America, *The Geology of North America*, Vol. O-2, 524 p.
- Banton, O. et Bangoy, L.M. 1999. Hydrogéologie : multiscience environnementale des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec, 460 p.
- Bear, J. et Jacobs, M. 1965. On the movement of the water bodies injected into aquifers. *Journal of Hydrology*, **3** : 37-57.
- Benhouhou, Y. et Dessureault, R., 1991. Recherche en eau à Saint-Augustin (2), phase II, réalisation d'un puits d'essai. Foratek Inc., 15 p.
- Bersezio, R., Bini, A. et Giudici, M. 1999. Effects of sedimentary heterogeneity on groundwater flow in a Quaternary pro-glacial delta environment : joining facies analysis and numerical modelling. *Sedimentary Geology*, **129** : 327-344.
- Bhattacharya, J.P. et Walker, R.G. 1992. Deltas. *Dans Facies models : response to sea level change*. Éditeurs: R.G. Walker et N.P. James, Geological Association of Canada, 157-177.
- Bilodeau, C. 1979. Levé hydrogéologique à Saint-Stanislas, comté de Lac Saint-Jean Ouest. Province de Québec, Ministère des Richesses Naturelles, Service des Eaux, Gaz et Pétrole, 4 p.

- Bilodeau, C. 1980. Levé hydrogéologique à Saint-Barnabé-Nord comté de Saint-Maurice. Service des eaux souterraines, Ministère de l'Environnement du Québec, 6 p.
- Bilodeau, D. 1991. Recherche en eau souterraine, aménagement et essai d'un puits de production d'eau potable à Sainte-Hénédine. Brossard, Québec, 8 p.
- Bourgeois, P.O. et Jolicoeur, M. 1981. Étude d'alimentation en eau souterraine pour la ville de Rimouski. Compagnie internationale de conseillers en hydrogéologie Québec Ltée, 22 p.
- Bradbury, K.R. et Muldoon, M.A. 1994. Effects of fracture density and anisotropy on delineation of wellhead-protection areas in fractured-rock aquifers. *Applied Hydrogeology*, 2/3 :17-23.
- Caron, M.R. 1986. Recherche en eau souterraine, étude hydrogéologique, municipalité de Champlain. Les Consultants H.G.E. Inc., 17 p.
- Champagne, R. 1988. Évaluation du potentiel aquicole de la région de l'Abitibi à partir des sources d'eau gravitaire émergeant des eskers, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec; rapport, 49 p.
- Consultants H.G.E. Inc. 1992. Étude hydrogéologique relative à l'inventaire et à la gestion de l'aquifère et du service d'eau de Saint-Louis-de-France. 31 p.
- Corbel, J. 1958. Les karsts de l'Est canadien. *Cahiers de géographie du Québec*, 4/5 : pp. 193-216.
- Crépault, J. 1987. Approvisionnement en eau potable, municipalité de Shipshaw (1). 21 p.
- Croteau, D. 1985. Forage d'un puits et essais de pompage, municipalité de Sainte-Hélène, Comté Kamouraska. Geohydrotek inc., Saint-Nicolas, 13 p.
- Denis, C. 1997. Projet de captage d'eau souterraine sur la propriété ALCAN par la municipalité de Laterrière (1). Experts-Conseils Hydrogéo-Sol Inc., 29 p.

- Denis, C. 1998. Recherche en eau à Sainte-Hedwidge (1). Experts-Conseils Hydrogéo-Sol Inc., 98 p.
- Denis, C. 1999. Impact de l'ancien dépotoir municipal et de la sablière sur la nappe d'eau souterraine, municipalité de Sainte-Hedwidge (2). Experts-Conseils Hydrogéo-Sol Inc., 37 p.
- Denis, C. 2000. Réhabilitation des puits de captage P-1 et P-3, municipalité de L'Ascension (4). Experts-Conseils Hydrogéo-Sol Inc., 22 p.
- Desgagné, V.J. 1991. Nouvelle prise d'eau, municipalité de Saint-Augustin (3). Groupe Génie Inc., 17 p.
- Dessureault, R. 1980. Construction de 4 puits filtrants à Ville de La Baie. N/Projet : FFHG 80001, N/Rapport : 406, 20 p.
- Dessureault, R. et Simard, G. 1970. Hydrogéologie des îles-de-la-Madeleine. Service de l'Hydrogéologie, ministère des Richesses naturelles, rapport H.G.-1, 95 p.
- Des Rosiers, R. 1980. Étude préliminaire, Alimentation en eau souterraine, municipalité de Sainte-Hélène. Roche associés Itée, Québec, 17 p.
- Des Rosiers, R. et Delisle, R. 1994a. Recherche en eau souterraine, municipalité de Sainte-Hénédine. Arrakis Consultants, Sainte-Foy, Québec, rapport A017-1, 15 p.
- Des Rosiers, R. et Delisle, R. 1994b. Recherche en eau souterraine, municipalité de Sainte-Hénédine. Arrakis Consultants, Sainte-Foy, Québec, rapport A017-2, 7 p.
- Duchesne, M. 2001. Sédimentologie de dépôts quaternaires graveleux dans le bassin versant de la rivière Chicoutimi à Laterrière, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.
- Eaton, T.T. 2006. On the importance of geological heterogeneity for flow simulation. *Sedimentary Geology*, **184** : 187-201.
- Edwards, M. 1986. Glacial environments. *Dans* *Sedimentary Environments and Facies*. *Éditeur* : H. G. Reading, Blackwell Scientific Publications, 445-470.

- Eyles, N. et Eyles, C.H. 1992. Glacial Depositional Systems. *Dans Facies models : response to sea level change*. Éditeurs: R.G Walker et N.P. James, Geological Association of Canada, 73-100.
- Fetter, C.W., 1994. Applied Hydrogeology, third edition. Prentice Hall, 691 p.
- Fréchette, P. et Sarrailh, J. 1996. Exploration hydrogéologique et aménagement d'un puits d'essai, municipalité de Ferland-et-Boilleau (1). SNC-LAVALIN Environnement inc., 14 p.
- Fréchette, P. et Sarrailh, J. 1997. Essais de pompage effectués sur le puits de l'Hôtel de Ville, municipalité de Ferland-et-Boilleau (2). SNC-LAVALIN Environnement inc., 21 p.
- Freeze, R.A. et Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall Inc., New-Jersey, Etats-Unis, 604 p.
- Fulton, R.J. 1989. Le Quaternaire du Canada et du Groenland. Sous la direction de R.J. Fulton, Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, vol. 1. Aussi *in* : The Geology of North America, vol. K-1, Geological Society of America.
- Gélinas, P.J. 1999. Évaluation des ressources en eau souterraine – Régie d'aqueduc de Grand-Pré. 66 p.
- Grenier, C. et McCormack, R. 1987. Principaux aquifères du Québec. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction des Eaux Souterraines et de Consommation; carte.
- Grenon, J.J. 1998. Étude géotechnique, alimentation en eau souterraine, ville de Métabetchouan (3). Les Laboratoires S.L. (1981) Inc., 4 p.
- Heinz, J., Kleineidam, S., Teutsch, G. et Aigner, T. 2003. Heterogeneity patterns of Quaternary glaciofluvial gravel bodies (SW-Germany): application to hydrogeology. *Sedimentary Geology*, **158** : 1-23.
- Hernandez, P. et Juneau, R. 1990. Puits municipal Ville de Matane, puits n°2. Laboratoires d'expertises de Québec Itée, 7 p.
- Hocq, M., coordonnateur, 1994. Géologie du Québec. Les Publications du Québec, 154 p.

- Hocq, M. et Martineau, G. 1994. Le quaternaire. *Dans Géologie du Québec.* Éditeur : M. Hocq. Les Publications du Québec, pp.121-128.
- Huard, N. 1997. Projet d'alimentation en eau souterraine de la municipalité, recherche en eau souterraine (rapport final), municipalité de New-Carlisle. Technisol inc., 23 p.
- Jolicoeur, M. 1984. Étude hydrogéologique, municipalité de L'Ascension (1). Les Forages LBM Inc., 25 p.
- Jolicoeur, M. 1986a. Recherche en eau souterraine, Saint-Ambroise (1). Les Forages LBM Inc., 16 p.
- Jolicoeur, M. 1986b. Recherche en eau souterraine, Saint-Ambroise (2). Les Forages LBM Inc., 16 p.
- Jolicoeur, M. 1990. Rapport d'étude hydrogéologique sur le puits de production 1/90, municipalité de L'Ascension (2). Les Forages LBM Inc., 17 p.
- Jolicoeur, M. 1996. Rapport de construction du puits P.P. 1/96, municipalité de Kamouraska. Sogesteau Ltée, 8 p.
- Jolicoeur, M. 1997a. Recherche en eau souterraine, municipalité de Métabetchouan (2). 12 p.
- Jolicoeur, M. 1997b. Détermination des périmètres de protection autour du puits NO 2/95, municipalité de Grandes-Piles. Compagnie internationale des Eaux Québec Ltée, 15 p.
- Jolicoeur, M. 1999a. Rapport hydrogéologique; Évaluation de la capacité de production d'un puits déjà existant. Corporation municipale du village de Honfleur, Québec, 22 p.
- Jolicoeur, M. 1999b. Rapport de construction du puits P.P. 1/99, évaluation de la capacité de production de puits et de la nappe d'eau souterraine, corporation municipale de Saint-Gédéon (2). Services d'ingénierie Génivel-BPR Inc., 12 p.

- Jolicoeur, M. 1999c. Rapport d'étude hydrogéologique, recherche en eau souterraine et évaluation de la capacité de production au site P.E. 1/99, corporation municipale du village de Saint-Jean-de-Dieu. BPR Ingénieurs-Conseils, 26 p.
- Jolicoeur, M. 2001a. Étude hydrogéologique, recherche en eau souterraine, évaluation de la capacité de production d'une nappe aquifère, municipalité du Village de Marsoui. 14 p.
- Jolicoeur, M. 2001b. Rapport d'étude hydrogéologique, recherche en eau souterraine pour un débit de 50 GUSPM, municipalité de Saint-Vianney. 15 p.
- Jolicoeur, M. et Bourgeois, P.O. 1977. Étude hydrogéologique pour l'alimentation en eau – Ville d'Amos. Compagnie Internationale des Eaux Ltée, Montréal, 32 p.
- Jussel, P. 1992. Modellienerung des Transports gelöster Stoffe in inhomogenen Grundwasserleitern. Dissertation, Institute for Hydromechanics and Water Resources, ETH Zürich.
- Keller, B. 1996. Lithofazies-Codes für die Klassifikation von Lockergesteinen. Mitt. Schweiz. Ges. Boden Felsmech. **132** : 1-8.
- Klingbeil, R., Kleineidam, S., Asprion, U., Aigner, T. et Teutsch, G. 1999. Relating lithofacies to hydrofacies: outcrop-based hydrogeological characterisation of Quaternary gravel deposits. *Sedimentary Geology*, **129** : 299-310.
- Koltermann, C.E. et Gorelick, S.M. 1996. Heterogeneity in sedimentary deposits: A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. *Water Resources Research*, **32** : 2617-2658.
- Laforest, A. 2001. Étude hydrogéologique pour l'adoption d'un règlement de protection d'une source d'eau souterraine, municipalité de Saint-Germain-de-Kamouraska. Experts conseils André Laforest inc. – Groupe Hydrogéo-Sol, Cap-Rouge, 11 p.

- Lallemand-Barrès, A. et Roux, J.-C. 1999. Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine : guide méthodologique et réglementaire. Éditions du BRGM, Orléans, France. 334 p.
- Lamontagne, R., Grenier, C. et Caron, M.R. 1998. Recherche en eau à Saint-Barnabé, construction du puits P-6. 37 p.
- Lasalle, P. et Tremblay, G. 1978. Dépôts meubles du Saguenay Lac Saint-Jean. Rapport géologique 191, ministère des Richesses naturelles du Québec, Canada.
- Laurin, A.F. et Sharma, K.N.M. 1975. Région des rivières Mistassini, Péribonka et Saguenay. Rapport géologique 161, ministère des Richesses naturelles du Québec, Canada.
- Liard, A. 1989. Étude de recherche et analyse de sites hydrogéologiques en Gaspésie, volume 1, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 70 p.
- McCormack, R. 1973. Levé hydrogéologique, Rivière-du-Loup. Service des eaux souterraines, Ministère des Richesses naturelles, 40 p.
- McCormack, R. 1978. Hydrogéologie de Rivière-du-Loup – Trois-Pistoles. Service des Eaux souterraines, Ministère des Richesses naturelles, 49 p.
- McCormack, R. 1981a. Étude hydrogéologique : bassin versant de la Châteauguay. Service des Eaux souterraines, Ministère de l'Environnement du Québec, 175 p.
- McCormack, R. 1981b. Étude hydrogéologique : bassin versant de la rivière Richelieu. Service des Eaux souterraines, Ministère de l'Environnement du Québec, rapport E.E.-4, 210 p.
- McCormack, R. 1982. Étude hydrogéologique du bassin de la Chaudière. Service des Eaux souterraines, ministère de l'Environnement du Québec, rapport E.1-1, 205 p.
- McDonald, M.G. et Harbaugh, A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Technique of Water-Ressources Investigations, United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1.

- MDDEP 2003. Règlement sur le captage des eaux souterraines, d'après la loi sur la qualité de l'environnement. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 20 p.
- MENV 1995. Guide pour la détermination de périmètre de protection autour de captage d'eau souterraine. Ministère de l'Environnement du Québec, 54 p.
- Miall, A.D. 1977. A review of the braided river depositional environment. *Earth Sciences Reviews*, **13** : 1-62.
- Miall, A.D. 1978. Lithofacies types and vertical profile models in braided rivers: a summary. *Dans Fluvial Sedimentology*. *Éditeur: A.D. Miall. Memoir – Canadian Society of Petroleum Geologists*, **5** : 605-625.
- Miall, A.D. 1984. Variations in fluvial style in the lower Cenozoic synorogenic sediments of the Canadian arctic islands. *Sedimentary Geology*, **38** : 499-523.
- Miall, A.D. 1992. Alluvial deposits. *Dans Facies models : reponse to sea level change*. Geological Association of Canada. *Éditeurs : R.G. Walker et N.P. James*, pp. 119-142.
- Miall, A.D. 1996. The geology of fluvial deposits; sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology. Berlin, Springer-Verlag, Federal Republic of Germany. 582 p.
- Michaud, G. 1992. Étude hydrogéologique, municipalité de Champlain. Les Consultants H.G.E. Inc., 36 p.
- Monerval 1990. Identification et caractérisation de secteurs potentiels en eau souterraine pour l'aquiculture, région Outaouais – Témiscamingue. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, 67 p.
- Pagé P. 1992. L'environnement glaciaire. Guérin éditeurs, Montréal, Canada, 368 p.
- Paradis, S.J. et Parent, M. 2002. Géologie des formations en surface: Bagotville, Québec. Commission géologique du Canada, Ottawa.
- Paré, D. 1981. Étude hydrogéologique du bassin versant de la rivière Nicolet. Service des eaux souterraines, Ministère de l'Environnement du Québec, rapport E.G.-1, 106 p.

- Prévot, J.M. 1973. Inventaire des eaux souterraines, comtés de Saint-Hyacinthe et de Rouville. Service des eaux souterraines, Ministère des Richesses naturelles, 71 p.
- Proulx, D. 2002. Recherche en eau, site de la défense, ville de Saint-Raymond. Arrakis consultants inc., 22 p.
- Proulx, D. et Mailhot, M. 1982. Aménagement du puits de pompage pour la municipalité de Lac-Bouchette. Tek Eau Inc., 17 p.
- Ramsay, J.G. 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw Hill, 568 p.
- Rasmussen H., Rouleau A. et Chevalier, S. (éditeurs scientifiques) 2006. *Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine*. 311 pages. Document diffusé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protec/index.htm>
- Reading, H.G. 1986. *Sedimentary environments and facies*, edition 2. First edition 1978. Oxford, Blackwell Sci. Publ., United Kingdom. 615 p.
- Rouleau, A. 1988. Simulateur numérique de l'écoulement et du transfert de masse dans des réseaux stochastiques de fractures. Rapport technique no. 155, Direction des eaux intérieures, Ottawa, 206 p.
- Rouleau, A. et Gale, J.E. 1987. Stochastic discrete fracture simulation of groundwater flow into an underground excavation in granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **24/2** : 99-112.
- Roy, D.W., Tremblay, M.-L. et Cousineau, P. 2006. Les différents types d'aquifères au Québec. Section 4 dans *Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine*. Rasmussen, H., Rouleau, A. et Chevalier, S. (éditeurs scientifiques). 43 pages. Document diffusé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protec/index.htm>
- Roy, R. 1962. Levé hydrogéologique à Saint-Stanislas (1), comté de Lac Saint-Jean Ouest. Province de Québec, Ministère des Richesses Naturelles, Service des Eaux, Gaz et Pétrole, 7 p.

- Sansfaçon, M. 1993. Rapport de construction sur le puits de production 3/93, municipalité de L'Ascension (3). Les Forages LBM Inc., N/Dossier : F-80-9293, 13 p.
- Simard, G. et Des Rosiers, R. 1979. Qualité des eaux souterraines du Québec. Service des eaux souterraines, ministère de l'Environnement du Québec, rapport H.G.-13, 161 p.
- Sylvestre, M. 1981. Perméabilité dans les milieux fracturés. Service des eaux souterraines, Ministère de l'environnement du Québec, rapport H.G.-14, 89 p.
- Todd, D.K. 1980. Groundwater Hydrology, second edition. John Wiley and sons, New York, 535 p.
- Tremblay, D. 1995. Étude hydrogéologique, partie sud-ouest, parc industriel II, Ville de La Baie (5). Les Laboratoires S.L. (1981) Inc., 23 p.
- Tremblay, D. 1997a. Recherche en eau, usine Uniboard, Ville de La Baie (rapport 1) (6). Les Laboratoires S.L. (1981) Inc., 10 p.
- Tremblay, D. 1997b. Recherche en eau, usine Uniboard, Ville de La Baie (rapport 2) (7). Les Laboratoires S.L. (1981) Inc., 29 p.
- Tremblay, D. 1999. Puits d'alimentation en eau, Laterrière (2). Les Laboratoires S.L. (1981) Inc., 30 p.
- Tremblay, D. 2000. Ouvrage de captage, municipalité de Shipshaw (3), Baie des Deux-Îles. Les Laboratoires S.L. (1981) Inc., 21 p.
- Tremblay, D. et Torresan, P. 1996. Recherche en eau, Saint-Edmond-les-Plaines (1). Les Laboratoires S.L. (1981) Inc., 22 p.
- Tremblay, F. 1981. Recherche en eau pour la municipalité de Saint-Augustin (1). Foratek International Inc., 17 p.
- Tremblay, F. 1989. Aménagement du puits No 17, alimentation en eau potable, municipalité de Ville de La Baie (3). Techmat (1983) Inc. pour Les Puisatiers Samson et Frères, 14 p.

- Tremblay, F. et Dessureault, R. 1988. Construction d'un puits crépiné de production, rapport hydrogéologique, municipalité de Shipshaw (secteur nord) (2). Foratek Inc., 18 p.
- Tremblay, J.J., Kadula, J. et D'Cruz, J. 1971. Étude hydrogéologique de la région du Cap-de-la-Madeleine. 139 p.
- Tremblay, M.-L., Roy, D.W. et Cousineau, P.A. 2006. Paramètres influençant les propriétés hydrogéologiques d'un aquifère. Section 3 dans *Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine*. Rasmussen, H., Rouleau, A. et Chevalier, S. (éditeurs scientifiques). 43 pages. Document diffusé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protoc/index.htm>
- Tremblay, M.-L., Roy, D.W., Rouleau, A. et Rasmussen, H. 2003. Démarche d'estimation d'aires d'alimentation d'ouvrages de captage intégrant l'information géologique. Dans Résumé de conférences, 56^e Conférence canadienne de géotechnique et 4^e Conférence conjointe AIH-CCN/SCG, Winnipeg.
- Tremblay, P. 2005. Étude hydrogéologique de l'aquifère de Saint-Honoré avec emphase sur son bilan hydrique. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, 188 p.
- Tremblay, R. 1994. Offre de services, étude complémentaire, réseau d'aqueduc, municipalité de Saint-Gédéon (1). Hydro-Ressources Inc. pour Services d'ingénierie Génivel BPR Inc., 29 p.
- Tremblay, R. et Lapierre, C. 1998. Rapport de l'étude de recherche en eau souterraine pour la municipalité de Métabetchouan (1). Génivel-BPR Inc., 5 p.
- Trenhaile, A.S. 1998. *Geomorphology: A Canadian Perspective*. Oxford University Press, Canada, 340 p.
- Verreault, M. 2003. Étude méthodologique pour l'estimation de l'aire d'alimentation de captage d'eau souterraine en milieu complexe. Mémoire, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, 131 p.

Verreault, M., Rouleau, A. et Tremblay, M.-L. 2006. Notions d'hydrogéologie. Section 2 dans *Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine*. Rasmussen, H., Rouleau, A. et Chevalier, S. (éditeurs scientifiques). 43 pages. Document diffusé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protec/index.htm>

Annexe I: Classification des aquifères en milieu fracturé
(modifiée de Roy et al., 2006)

Potentiel aquifère des réseaux de paraclases et de diaclases.

Type de joint	Caractéristiques des joints	Dimension	Potentiel aquifère	Anisotropie de l'écoulement
Paraclase	Parallèle aux couches. Généralement régulier et continu.	Grande extension. Maille décimétrique à métrique selon l'épaisseur des lits.	Proportionnel à la quantité de paraclases et de diaclases. Bon lorsque les diaclases intersectent bien les paraclases.	Direction d'écoulement horizontale dominante Réseaux enroulés (paraclases courbées selon l'axe du pli) : direction d'écoulement préférentielle horizontale, parallèle à l'axe du pli
Dioclase	Perpendiculaires aux couches. Intersection rectangulaire ou rhomboédrique.	Extension verticale souvent limitée à un seul lit (entre deux paraclases).	Plus élevé si la porosité primaire est effective. Mauvais pour les roches à grains fins (paraclases bien développées mais diaclases peu développées)	Réseaux enroulés : diaclases rectangulaires : deux directions d'écoulement préférentielles, parallèle et perpendiculaire à l'axe des plis. diaclases conjuguées : direction d'écoulement perpendiculaire ou fortement oblique à l'axe du pli.

Potentiel aquifère des réseaux de fractures associés aux plis

Caractéristiques associées aux plis	Types de fracture	Dimension	Potentiel aquifère	Anisotropie de l'écoulement
<i>Réseaux de fractures formés lors d'un plissement dans des plis isopaques (classe 1 selon Ramsay, 1967)</i>				
Plis à déformation de charnière : <u>partie externe de la charnière</u> (caractéristique des roches sédimentaires massives)	Fractures d'extension radiales par rapport à l'axe du pli et ouvertes ou déplacées suivant une composante normale. Joints AC perpendiculaires à l'axe du pli.	Centimétrique à décimétrique pour un pli de longueur d'onde métrique à décamétrique	Limité par le remplissage possible des fractures par différents minéraux. <u>Peut être bon, principalement dans la partie externe de la charnière ou dans les plis à déformations de flancs lorsque absence de matériaux de remplissage.</u>	Forte anisotropie parallèle à l'axe des plis
Plis à déformation de charnière : <u>au cœur du pli</u> (caractéristique des roches sédimentaires massives).	Petites failles inverses à pendage modéré, dues à la compression horizontale. Parfois des fentes de traction sub-horizontales parallèles à la stratification.			
Plis à déformation de flanc (caractéristiques des roches sédimentaires feuilletées).	Fentes de traction sub-horizontales Failles inverses inter-couches puis conjuguées et transverses aux couches Joints AC.	Décimétrique à métrique pour les failles inverses		Si joints AC présents, principalement perpendiculaire à l'axe de pli. Si joints AC absents, parallèle à l'axe du pli en suivants les failles inverses conjuguées et les fentes de traction.
<i>Réseaux de fractures formés lors d'un plissement dans les roches ductiles (classes 2 et 3 selon Ramsay, 1967)</i>				
Schistosités de flux (schistosité de crénulation, « flow cleavage », « slaty cleavage »)	Fissilité parallèle au plan axial S_1 du pli.		Bon si ouverture des fractures suite à des évènements tectoniques postérieurs à la formation des plis.	Si formation de fractures parallèles au plan axial du pli.
Schistosités de fracture (« fracture cleavage », « slip cleavage »)	Fractures co-axiales à l'axe L_1 du pli et d'inclinaison intermédiaire entre la normale locale à la stratification S_0 et celle du plan axial S_1 dans les plis de type 1B et 1C	Décimétrique	Proportionnel à la quantité de fractures et à la dimension du pli.	Parallèle à l'axe de pli, aux directions des schistosités et des paraclases enroulées si présentes. Parallèle aux joints AC si présents.

Potentiel aquifère des réseaux de fractures associés aux failles

Type de fracture	Caractéristiques des fractures	Potentiel aquifère	Anisotropie de l'écoulement
Failles normales	<p>Souvent en bordure des blocs déplacés en écailles multiples.</p> <p>Parfois disposées en échelons délimitant les rampes de relais.</p> <p>Combinaison possible des écailles et des relais.</p>	Très bon potentiel à l'intérieur de la faille si ouverte.	Suivant la zone de faille aquifère, anisotropie d'écoulement horizontal parallèle à l'allongement de la faille.
Réseaux de fractures associés aux failles	Failles et fractures secondaires parallèles et conjuguées à la faille principale.	Bon lien hydraulique entre des formations aquifères déplacées.	<p>Écoulement horizontal difficile à cause des fractures conjuguées verticales.</p> <p>Écoulement parallèle au plan de la faille principale favorisé par failles et fractures secondaires.</p>
Zone de cisaillement fragile : réseau de Riedel. (typique des failles en décrochement)	<p>Principales orientations nommées par des lettres :</p> <ul style="list-style-type: none"> orientation de la faille principale, D ; deux orientations conjuguées, R (mouvement synthétique) et R' (mouvement antithétique) ; deux autres orientations, P (mouvement synthétique) et T (fracture d'extension dont l'orientation bissecte l'angle aigu de petites failles conjuguées). <p>R, R' et P sont de petites failles secondaires.</p>	Bon potentiel si réseau bien développé et si bon recouplement des fractures.	<p>Écoulement vertical parallèle aux intersections entre les fractures.</p> <p>Écoulement horizontal favorisé par les orientations de D, parallèle à l'allongement de la zone, et de R et P suivant à peu près l'allongement de la zone.</p>
Failles en décrochement	Fractures verticales.	Très bon potentiel à l'intérieur de la faille si ouverte.	Écoulement vertical favorisé.
Failles en chevauchement	Nombreuses écailles de chevauchement en surface rejoignes en une seule faille en profondeur.	Recharge favorisée par bonne perméabilité des écailles.	Écoulement horizontal favorisé en profondeur dans le sens du pendage de la faille.
Zones de cisaillement ductile	Si déformation fragile tardive, possibilité de développer une fracturation interne suivant l'orientation de certaines structures internes (schistosité, foliations, "shear bands", fentes de traction, etc.).	Bon potentiel si fracturation tardive.	Suivant les orientations décrites précédemment pour les différents types de fracturation fragile.

Potentiel aquifère des fractures associées aux roches ignées et métamorphiques

Type de fracture	Caractéristiques des fractures	Dimension	Potentiel aquifère	Anisotropie de l'écoulement.
Fractures de refroidissement en forme de prisme.	Joints verticaux et joints basaux présents entre autres dans les colonnades et certains dykes et filons-couches.	Colonnades : joints verticaux à maille décimétrique et basaux à maille métrique.	Bon si fractures ouvertes.	Écoulement préférentiel parallèle à l'allongement des prismes. Écoulement parallèle aux joints basaux.
Joints de refroidissement	Joints parallèles aux contacts des roches plutoniques.	Maille métrique.		
Fractures associées à la fluidité interne du massif plutonique.	Fractures parallèles aux contacts et parallèles à la foliation d'écoulement. Fractures perpendiculaires aux contacts et parallèles à la linéation d'écoulement. Fractures obliques aux contacts ($\pm 30^\circ$) en position de chevauchement local.	Maille métrique.	Zone décimétrique à proximité du contact peut être aquifère si présence de joints ouverts.	Écoulement parallèle au contact favorisé particulièrement dans la direction de la linéation d'écoulement magmatique.
« Sheeting » (dans les roches plutoniques du Bouclier canadien et des Appalaches).	Présent dans quelques centaines de mètres près de la surface. Forme des fractures correspondant globalement à la forme de la topographie locale.	Maille métrique (en surface) à décimétrique (en profondeur).	Bon potentiel aquifère.	Écoulement sub-horizontale (parallèle aux fractures), sans direction préférentielle.
Réseau de fractures similaire aux paraclases et diaclases dans les couches mécaniquement fragiles des roches métamorphiques.	Fractures dues à des événements tectoniques postérieurs au métamorphisme dans les couches mécaniquement plus fragiles. Paraclases (parallèles au rubanement métamorphique) et diaclases (perpendiculaires au rubanement métamorphique et symétriques par rapport aux linéations métamorphiques).	Maille métrique à décimétrique	Localement bon potentiel mais généralement mauvaises intersections entre les fractures.	
Linéaments recoupant le Bouclier canadien à une échelle de dizaines de kilomètres.	Zones fracturées formant des vallées ou lignes d'escarpement rectilignes au profil modelé par les mouvements glaciaires.	Des centaines de mètres à quelques kilomètres de large à leur base et des dizaines de kilomètres de longueur.	Principales zones aquifères du Bouclier canadien.	Parallèle à l'allongement de la vallée.

Annexe II: Classification des aquifères constitués de dépôts meubles
(modifiée de Roy et al., 2006)

Forme externe (géométrie)	Caractéristique de surface	Type de dépôt meuble	Architecture interne	Dimension	Matériel constitutif et arrangement	Qualité et continuité de l'aquifère
Feuillet	Bosses et crêtes dispersées	Moraine d'ablation	Massive	Longueur et largeur plurikilométrique et épaisseur plurimétrique	Till lessivé.	Bon aquifère sur l'ensemble du dépôt Zone aquifère continue
	Régulière superposée de bosses dispersées (dépôt de kame)	Terrasse ou succession de terrasses de Kame	Stratifiée à massif	Longueur plurikilométrique, largeur pluridécamétrique et épaisseur plurimétrique.	Succession de feuillets constitués de gravier, sable et silt pouvant être séparés par une mince couche d'argile. Stratification perturbée localement par des mouvements de masse.	Parfois plus riche en particules fines et très peu perméable
	Régulière et de faible pente vers la partie distale du dépôt	Dépôts d'épandage subaquatiques	Stratifiée	Longueur plurikilométrique, largeur hectométrique et épaisseur décimétrique	Succession de strates composées de gravier, de sable et de fines (granulométrie décroissante vers la partie distale).	Meilleure dans la partie proximale La continuité peut être perturbée par des strates de fines
	Dépressions +/- circulaires dispersées sur surface régulière	Deltas	Stratifiée avec lentilles et chenaux	Longueur et largeur kilométrique et épaisseur décimétrique	Strates de sable contenant des lentilles, feuillets ou rubans de gravier de dimension variable et quelques strates de fines peuvent être distribuées entre elles.	Bon aquifère dans les strates de sable et gravier et la distribution des strates de fines contrôle l'écoulement Bonne continuité entre les strates de fines
Ruban	Ridée (perpendiculaire à la direction de retrait du glacier)	Moraine de retrait	Massive	Longueur plurikilométrique, largeur hectométrique à plurikilométrique et épaisseur métrique	Fond de till surplombé de crêtes de till lessivé contenant des amas de till dispersés	Aquifère moyen à bon. Continuité dépend de la disposition des amas de till
	Régulière	Crête de plage	Massive	Longueur hectométrique à kilométrique, largeur décimétrique et épaisseur plurimétrique	Dépôt de sable	Bon aquifère Continu sur l'ensemble du dépôt Dimension petite et faible quantité d'eau
		Cours d'eau tressé	Stratifiée avec lentilles et chenaux	Longueur plurikilométrique, largeur hectométrique à kilométrique et épaisseur décimétrique	Dépôt sablonneux bien stratifié supportant des lentilles et des cordons de gravier	Très bon potentiel aquifère dans tout le dépôt et principalement dans le gravier Bonne continuité dans tout le dépôt sauf si une couche d'argile sépare les strates du dépôt tressé
		Cours d'eau méandrique (dépôts alluviaux)	Croissants et chenaux	Longueur plurikilométrique, largeur hectométrique à kilométrique et épaisseur décimétrique	Barres et bandes sinuées superposées entre elles et composées de sable et de gravier Proportions variables de boues.	Des feuillets de particules fines séparent verticalement les feuillets Zone aquifère continue
Cordon	Ridée (perpendiculaire à la direction d'écoulement du glacier)	Moraine frontale	Massive	Longueur variant de dizaines à centaines de kilomètres, largeur hectométrique et épaisseur décimétrique	Till lessivé contenant des amas de till lessivé dispersés aléatoirement	Aquifère plus ou moins continu à l'intérieur d'une même crête dépendamment de la disposition des amas de till.
	Régulière	Esker	Stratifiée	Longueur plurikilométrique, largeur décimétrique à hectométrique et épaisseur pluridécimétrique	Strates constituées de gravier et de sable	Très forte perméabilité qui donne d'excellents aquifères. Aquifère continu.

Forme externe (géométrie)	Caractéristique de surface	Type de dépôt meuble	Architecture interne	Dimension	Matériel constitutif et arrangement	Qualité et continuité de l'aquifère
Buttes et cônes	Pentes assez stables	Butte de Kame	Massive	Largeur hectométrique et épaisseur décamétrique	Till lessivé ou non	Bon aquifère continu si le dépôt est composé de till lessivé mais la très petite dimension peut limiter l'exploitation d'un tel type d'aquifère
	Pentes +/- stables	Cônes et talus de roche et de débris	Massive	Cône dont le talus est de longueur hectométrique à kilométrique et la largeur et l'épaisseur décamétrique	Blocs, gravier et sable	Très forte perméabilité Bonne continuité aquifère sur l'ensemble du cône
		Cônes d'alluvion	Lentilles et chenaux		Dépôt sablonneux bien stratifié supportant des lentilles et des cordons de gravier	Très bon potentiel aquifère dans tout le dépôt et principalement dans le gravier
Série de buttes et de cônes	Crêtes suivant la même direction	Dunes	Stratifiée	Largeur décamétrique et épaisseur métrique à décamétrique	Strates de sable fin	Milieu plus aquiclude qu'aquifère, peut servir de réservoir pour un aquifère sous-jacent Bonne continuité

**Annexe III: Compilation des aquifères exploités en milieu fracturé
dans le Québec méridional**
(modifiée de Roy et al., 2006)

Unités hydrostratigraphiques ¹ (perméabilité)	Lithologies et âge des roches	Principales structures internes	Fracturation probable	Municipalités exploitant ces aquifères
Bouclier canadien (Supérieur et Grenville)				
1F (modérée à élevée) La plupart des parties du Bouclier canadien.	Zones linéaires de fracturation intense.	Lignes d'escarpement et vallées généralement rectilinéaires formant les linéaments.	Zone fracturée sous-jacente aux dépôts meubles perméables à semi-perméables qui favorisent la recharge de l'aquifère.	Outaouais (Monerval, 1990) : Mansfield-Pontefract : l'aquifère à considérer est soit la partie supérieure du roc qui est fracturé ou encore le contact du roc avec les dépôts meubles pouvant avoir jusqu'à 60 m d'épaisseur. Thorne : le roc local est affecté par une faille majeure EW et les vallées sont remplies de matériaux granulaires. Laurentides (Sylvestre, 1981) : Nord de Saint-Jérôme : Le débit en milieu fracturé est bon en surface et diminue très rapidement en profondeur. C'est principalement lorsque les dépôts meubles sont épais que le débit est le meilleur.
Basses-Terres du Saint-Laurent				
2A (élevée) Basses-Terres en bordure du Bouclier Canadien et dans le sud du Québec.	Calcaires ordoviciens du groupe de Trenton avec, à certains endroits, des interstratifications de shale.	Roches sédimentaires peu ou pas déformées; possibilité de plis ouverts au sud-ouest; failles normales à rejet important sur des plans rapprochés le long de la bordure du Bouclier canadien, et failles plus espacées à rejet moindre ailleurs.	Réseau orthogonal (paraclasses et diaclases) , avec, localement, des fractures associées aux failles normales ou aux plis ouverts (au sud-ouest); possibilité d'un élargissement karstiques des fractures; eau souvent ferrugineuse, à cause des surfaces qui contiennent de la pyrite.	Saguenay – Lac-Saint-Jean : Saint-Félicien (Verreault, 2003) : calcaire ordovicien fracturé, réseau orthogonal et conjugué. Montérégie (McCormack, 1981b) : bassin de la rivière Richelieu, municipalité de Napierville s'alimente dans les calcaires du Trenton.
2E (élevée) La moitié nord de l'Île d'Anticosti.	Calcaires siluriens avec des passages à shales calcaieux et calcaires argileux avec interlits de shale, sauf dans la formation supérieure composée de calcaire bioclastique.	Roches sédimentaires peu ou pas déformées, réseau karstique plus ou moins bien développé.	Réseau orthogonal , mais les fréquents interlits de shale limitent la perméabilité de ces unités.	Port-Menier (comm. pers. de Mme Guylaine Lamarre, MENV Côte-Nord, 2002)

¹ Les unités hydrostratigraphiques (Simard et Des Rosiers, 1979) décrites sont celles exploitées par une municipalité répertoriée dans le cadre de ce travail ou celles pour lesquelles de l'information hydrogéologique a été répertoriée. Ces informations sont intégrées dans la dernière colonne du tableau.

Unités hydrostratigraphiques ¹ (perméabilité)	Lithologies et âge des roches	Principales structures internes	Fracturation probable	Municipalités exploitant ces aquifères
2Z (élevée) Aux contacts avec les frontières américaines et ontariennes, l'unité se prolonge vers le nord entre le Bouclier canadien et l'unité 2A.	Grès du groupe de Postdam, dolomie du Beekmantown et calcaires du Chazy et du Black River. Ces lithologies datent respectivement du Cambrien et de l'Ordovicien.	Roches sédimentaires peu ou pas déformées; failles normales, généralement espacées mais plus fréquentes près de la bordure du Bouclier canadien.	Réseau orthogonal (paraclases et diaclases) , avec, localement, des fractures associées aux failles normales; possibilité de karstification.	Postdam : Montérégie (McCormack, 1981a) : Howick; Pincourt (Île Perrot); Saint-Chrysostome; Saint-Thimothée Montérégie (McCormack, 1981b) : bassin de la rivière Richelieu, bon potentiel. Beekmantown : Laurentides : Mirabel ; Saint-Antoine (Grenier et McCormack, 1987) Lanaudière : Saint-Charles-Borromée (Grenier et McCormack, 1987) Montérégie (McCormack, 1981a) : Hemmingford; Melocheville; Orsmtown; Saint-Rémi; Sainte-Martine Montérégie (McCormack, 1981b) : bassin de la rivière Richelieu, bon potentiel. <i>Aucune karstification n'a été répertoriée.</i>
3A (élevée) Coincée entre les rivières Yamaska et Richelieu, la région s'étend de La Présentation, au nord, jusqu'au Mont Saint-Grégoire, au sud. Synclinal des Basses-Terres du Saint-Laurent.	Shales argileux ordoviciens, quelques fois calcareux et grès des groupes Utica, Lorraine et Queenston.	Roches sédimentaires de plus en plus plissées (plis ouverts ou modérément serrés) et faillées (petits chevauchements vers l'est); failles normales dispersées.	Réseau orthogonal (paraclases et diaclases) , avec fractures fragiles associées aux failles normales et aux petits chevauchements.	Densité de fracturation élevée, probablement à cause de la mise en place des Montérégiennes (McCormack, 1981b).
3C (modérée) De Candiac à Farnham en passant par Saint-Jean d'Iberville	Shale argileux ordovicien du groupe Utica.	Roches sédimentaires de plus en plus plissées (ouverts à modérément serrés) et faillées (petits chevauchements) vers l'est; failles normales dispersées et quelques failles fragiles importantes.	Paraclases bien développées dans les niveaux calcaires, petits chevauchements associés aux plissements, fractures associées aux failles fragiles.	Eaux souterraines fortement minéralisées; pas de puits alimentant plus de 75 personnes n'ont été répertoriés sur ce territoire. (McCormack, 1981b).
4Z (modérée) Limite sud des Basses-Terres du Saint-Laurent.	Shales argileux et ardoisiers cambro-ordoviciens, siltstone cherteux et ardoise du Groupe de Laurier (Complexe de Saint-Germain)	Roches sédimentaires légèrement métamorphisées avec chevauchements imbriqués et plis ouverts à serrés.	Roches plus ou moins compétentes, perméabilité modérée permise par une fracturation associée principalement aux chevauchements imbriqués.	Bassin versant de la rivière Nicolet (Paré, 1981) : Roches cambro-ordoviciennes des Appalaches constituées de grès, de shale, de calcaire et de conglomérat (sont également associées des ardoises et des quartzites). Dans la partie des Basses-Terres du Saint-Laurent, le socle est principalement constitué de shale ordovicien interlit de grès et de calcaire.

Unités hydrostratigraphiques ¹ (perméabilité)	Lithologies et âge des roches	Principales structures internes	Fracturation probable	Municipalités exploitant ces aquifères
10A (élevée) Bordure de la côte sud de la péninsule de Gaspé et l'Île Bonaventure	Conglomérat et grès du Carbonifère en discordance sur des formations plus anciennes.	Aucun pli, sauf localement en bordure de certaines failles en décrochement (?).	Fracturation variable et orthogonale (probablement déterminée par le litage et les changements de faciès); cimentation calcaire variable, d'où une perméabilité élevée.	Municipalité de New-Carlisle (Huard, 1997) : micro-grès de couleur gris-verdâtre, parfois rouge, possédant des lits de calcaire gris foncé.
10Z (élevée) Golfe du Saint-Laurent et îles-de-la-Madeleine	Conglomérat et grès rouge et vert de la formation de Cap-aux-Meules. Permo-carbonifère	Forte déformation en raison des diapirs de sel.	Fracturation variable , contrôlée probablement par le litage, les changements de faciès, la présence de roches plus compétentes et les montées diapiriques de sel, d'où la perméabilité élevée.	La plupart des municipalités des îles-de-la-Madeleine sont alimentées à partir de puits captant cet aquifère. C'est la formation la plus perméable des îles-de-la-Madeleine (Dessureault et Simard, 1970).
Appalaches				
5Z (modérée) Limite nord des Appalaches québécoises, s'étend entre Farnham et Québec.	Zone de klippe cambro-ordovicien constituée de schiste argileux contenant des intercalations de grès feldspathique, de conglomérats et localement de lits de calcaire.	Plis ouverts à serrés avec des schistosités de flux et de fracture peu à bien développées. Plis et failles très variés, avec divers types de schistosité d'intensité variable.	Fracturation des nappes associée aux plis et aux failles de chevauchement qui les découpent en écailles, d'où une perméabilité modérée. Fracturation du mélange déplacé dans du matériel incompétent, globalement peu perméable, mais pouvant être localement aquifère.	Bassin versant de la rivière Nicolet (Paré, 1981) : Roches cambro-ordoviennes des Appalaches constituées de grès, de shale, de calcaire et de conglomérat (sont également associées des ardoises et des quartzites). Dans la partie des Basses-Terres du Saint-Laurent, le socle est principalement constitué de shale ordovicien interlit de grès et de calcaire.
7A (très faible) Sud du fleuve Saint-Laurent, cette unité s'étend de Québec à Percé.	Schiste argileux et ardoisier, mudstone, grès, conglomérat et lits de calcaire Séquences de flyschs allochtones d'âge cambro-ordovicien et les unités cambriennes reposent sur celles de l'Ordovicien	Plis : ouverts à modérément serrés à plongée faible à modérée; chevauchements taconiques restreints à l'intérieur de l'unité, qui est limitée au sud-est par des décrochements en Gaspésie; schistosité de flux et de fracture, modérée en général, mais intense dans les Chic-Chocs, qui explique la très faible perméabilité.	Fracturation associée aux plis et aux failles des roches compétentes; l'abondance de roches incompétentes explique la très faible perméabilité.	Bas-Saint-Laurent : Kamouraska (Jolicoeur, 1996); Saint-Germain-de-Kamouraska (Laforest, 2001); Saint-Jean-de-Dieu (Jolicoeur, 1999c); Saint-Simon (Comm. pers. de Mme Nancy Morin, sec.-très. adj. Municipalité de Saint-Simon, 2002). Chaudière-Appalaches : Honfleur (Jolicoeur, 1999a); Sainte-Hénédine (Bilodeau, 1991; Des Rosiers et Delisle, 1994a et 1994b) Gaspésie : Petite-Vallée (Liard, 1989)
7B (faible) Englobée par l'unité 7A, l'unité 7B s'étend de la région de Rimouski à celle de Matane	Schiste argileux et ardoisier, mudstone, grès, conglomérat et lits de calcaire Séquences de flyschs allochtones d'âge cambro-ordovicien et les unités cambriennes reposent sur celles de l'Ordovicien	Plis ouverts à modérément serrés à plongée faible à modérée; schistosité de flux et de fracture modérée; chevauchements taconiques rapprochés.	Fracturation associée aux plis et aux failles des roches compétentes; abondance de roches incompétentes, mais fréquence de failles plus importante, d'où perméabilité faible mais plus élevée que dans 7A.	Gaspésie : Saint-Vianney (Jolicoeur, 2001b)

Unités hydrostratigraphiques ¹ (perméabilité)	Lithologies et âge des roches	Principales structures internes	Fracturation probable	Municipalités exploitant ces aquifères
7Z (modérée) Sud-est de l'unité 5Z, l'unité 7Z s'étend de la frontière américaine jusqu'à Montmagny	Schiste argileux et ardoisier, mudstone, grès, conglomérat et lits de calcaire. Séquences de flyschs allochtones d'âge cambro-ordovicien et les unités cambriennes reposent sur celles de l'Ordovicien	<p>Métamorphisme faible (de schiste vert inf. à sup.).</p> <p>a, b, c) : (voir texte) <u>Schistes de Bennett</u> : plis polyphasés avec une phase de plis couchés, schistosité bien développée, parfois multiple et à angles variables, chevauchements taconiens replissés et chevauchements acadiens; Caldwell : plis serrés à plongée modérée à forte, schistosité de flux, de ségrégation et de fracture, chevauchements taconiens replissés et chevauchements acadiens qui découpent le groupe en écailles rapprochées; ophiolite; strates redressées, nombreuses failles de dimensions variables; mélanges : tout est possible.</p> <p>d) plis ouverts à modérés à plongée faible à modérée</p> <p>e) plis modérément serrés à plongée modérée, chevauchements souvent rapprochés, schistosité de flux prononcée</p> <p>f) plis ouverts à modérés à plongée faible à modérée, chevauchements souvent rapprochés, faible fissilité de litage, schistosité de flux</p>	<p>Type de fracturation variable, d'où perméabilité modérée (mais probablement variable).</p>	<p>Bassin versant de la rivière Nicolet (Paré, 1981) : débit plus faible que dans 4Z et 5Z.</p> <p>Bassin versant de la rivière Chaudière (McCormack, 1982) : alimente certaines municipalités et industrie, souvent par l'exploitation de plusieurs puits pour pouvoir répondre à la demande.</p>
8Z (modérée) Sud du Québec, limité au nord par l'unité 7Z et au sud par la frontière Canada – États-Unis.	Synclinorium de Gaspé-Connecticut Valley : grès, ardoise et calcaire impur et recoupé d'intrusions granitiques dévoniennes. Synclinorium Ordovicien de Saint-Victor et Anticlinorium Cambro-ordovicien de Boundary Moutain	<p>Plis à plongée faible à modérée, ouverts (loin des failles) à serrés (près des failles); schistosité : variant de faible à forte (schistosité de flux et de fracture, surtout à proximité des failles); chevauchements en Estrie, décrochement légèrement transpressionnel au nord-est; fréquence des failles plus importantes près du lac Mégantic.</p>	<p>Fracturation associée aux plis et aux failles des roches compétentes, d'où perméabilité modérée dans l'ensemble.</p>	<p>Bassin versant de la rivière Chaudière (McCormack, 1982) : alimente certaines municipalités et industrie, souvent par l'exploitation de plusieurs puits pour pouvoir répondre à la demande.</p>

Annexe IV: Compilation des aquifères exploités dans les dépôts meubles
dans le Québec méridional

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Ferland-et-Boilleau (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Couche de gravier de 1 à 2 m d'épaisseur reposant sur le roc et confinée sous environ 15 à 20 m d'argile (Fréchette et Sarraih, 1996; 1997)	Moraine d'ablation
Lamarche (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Moraine de fond et moraine d'ablation sur les hautes-terres (Lasalle et Tremblay, 1978).	Moraine d'ablation
Sainte-Hélène-de-Kamouraska (Bas Saint-Laurent)	Dépôt graveleux situé sous un niveau épais d'argile. La couche de gravier d'environ 10 m d'épaisseur se situe à 75 m de profondeur, entre l'argile et le roc. Aquifère en nappe captive (Des Rosiers, 1980; Croteau, 1985).	Moraine d'ablation
Rivière-du-Loup (Bas Saint-Laurent)	<p>1) Roc constitué de grès et de mudstones. Ce roc est recouvert par la moraine de Saint-Antonin qui se constitue de till au cœur et des sédiments proglaciaires (sables et graviers) recouvrent le secteur. Les sédiments proglaciaires ne sont pas homogènes et leur perméabilité varie de bonne à mauvaise d'un endroit à l'autre. L'aquifère de Saint-Modeste se trouve dans les sédiments proglaciaires et est limité au sud par un affleurement rocheux et au nord par la moraine (McCormack, 1973, 1978).</p> <p>2) Roc constitué à 75% de mudstones et le reste est constitué de grès et de congolomérats. La séquence de dépôts meubles commencent généralement par une base de till de fond mince ou absent sur les crêtes rocheuses qui devient plus épais dans les dépressions, une argile marine et, finalement, les sables des Hautes Terrasses caractéristiques d'une régression marine, qui coiffent l'argile marine sur une grande portion de la région. Les sédiments fluvio-glaciaires modifient cette séquence dans les secteurs de Saint-Éloi (immense delta se forma dans la mer de Goldthwait) et de Saint-Modeste (moraine frontale de Saint-Antonin). Les alluvions proglaciaires mises en place à partir de cette moraine constituent avec celle-ci l'aquifère de Saint-Modeste. La tourbe occupe une superficie importante dans la région sous étude (McCormack, 1978).</p>	Moraine frontale
Régie de Grand-Pré (Mauricie)	La régie de Grand-Pré exploite la moraine de Saint-Narcisse qui correspond à une moraine frontale et les dépôts qui y sont associés comme des dépôts d'épandage fluvio-glaciaire constitué de sables, graviers et cailloux et des dépôts deltaïques constitués de sables et graviers (Gélinas, 1999).	Moraine frontale

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Amos (Abitibi)	Esker de direction NW-SE de plusieurs dizaines de m d'épaisseur et composé de sable et gravier grossier stratifié, intercalé de lentilles d'argile (Jolicoeur et Bourgeois, 1977; Champagne, 1988).	Esker
Saint-Edmond-les-Plaines (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Argile en surface. Alternance de lits de sable fin et de sable grossier contenant du gravier et des cailloux. Les forages confirment la présence d'une bande de sable et gravier sur au moins 1,5 km de longueur, d'orientation NS (d'après la carte des dépôts meubles, > 2,5 km), 120 à 400 m de largeur et 10 à 20 m d'épaisseur (Tremblay et Torresan, 1996).	Esker enfoui
Saint-Barnabé (Mauricie)	Le territoire de la municipalité de Saint-Barnabé est constitué principalement d'argile tandis que les dépôts des municipalités de Charrette et de Saint-Élie se composent de sables et graviers de hautes terrasses ou d'origine glaciaire. Ce sont principalement les sables et graviers qui sont susceptibles de fournir de bons débits d'eau s'ils sont saturés, propres et d'étendue et d'épaisseur suffisantes (Bilodeau, 1980). Dépôt d'alluvions anciennes (Lamontagne et al., 1998).	Terrasse de Kame
Amqui, Causapscal et Vallée de la rivière Matapedia (Bas Saint-Laurent)	Importants dépôts alluviaux ou fluvio-glaciaires (Liard, 1989).	Épandage fluvio-glaciaire
Châteauguay (Montérégie)	Dépôts de sable et gravier surmonté d'une couche d'argile sablo-graveleuse (McCormack, 1981a).	Épandage fluvio-glaciaire
Comté de Rouville, Saint-Paul D'Abbotsford (Montérégie)	Dépôts fluvio-glaciaires non différenciés (Prévot, 1973)	Épandage fluvio-glaciaire
Lac-Bouchette (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Sable grossier et gravier sous environ 10 m de silt et d'argile (Proulx et Mailhot, 1982).	Épandage fluvio-glaciaire

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Nouvelle et Vallée de la rivière Nouvelle (Gaspésie)	Dépôts de sable et graviers fluvio-glaciaires et alluvions grossiers; l'aquifère en contact avec la rivière (Liard, 1989).	Épandage fluvio-glaciaire
Paspébiac (Gaspésie)	Dépôts de sable et gravier fluvio-glaciaires en bordure de la rivière Paspébiac (Liard, 1989).	Épandage fluvio-glaciaire
Port-Daniel-est (Gaspésie)	Dépôts fluvio-glaciaires et alluvions (Liard, 1989).	Épandage fluvio-glaciaire
Régie de Grand-Pré * (Mauricie)	La régie de Grand-Pré exploite la moraine de Saint-Narcisse qui correspond à une moraine frontale et les dépôts qui y sont associés comme des dépôts d'épandage fluvio-glaciaire constitué de sables, graviers et cailloux et des dépôts deltaïques constitués de sables et graviers (Gélinas, 1999).	Épandage fluvio-glaciaire
Rimouski (Bas Saint-Laurent)	Dépôt de sable et gravier de la vallée de Neigette (Liard, 1989). Quelques niveaux d'argile sont intercalés dans le dépôt. Ce dépôt est très épais (>150 pieds) et s'étend sur une grande distance (Bourgeois et Jolicoeur, 1981).	Épandage fluvio-glaciaire

* Cette municipalité est citée plus d'une fois parce que plus d'un type d'aquifère y est exploité.

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Rivière-du-Loup * (Bas Saint-Laurent)	<p>1) Roc constitué de grès et de mudstones. Ce roc est recouvert par la moraine de Saint-Antonin qui se constitue de till au cœur et des sédiments proglaciaires (sables et graviers) recouvrent le secteur. Les sédiments proglaciaires ne sont pas homogènes et leur perméabilité varie de bonne à mauvaise d'un endroit à l'autre. L'aquifère de Saint-Modeste se trouve dans les sédiments proglaciaires et est limité au sud par un affleurement rocheux et au nord par la moraine (McCormack, 1973, 1978).</p> <p>2) Roc constitué à 75% de mudstones et le reste est constitué de grès et de conglomérats. La séquence de dépôts meubles commencent généralement par une base de till de fond mince ou absent sur les crêtes rocheuses qui devient plus épais dans les dépressions, une argile marine et, finalement, les sables des Hautes Terrasses caractéristiques d'une régression marine, qui coiffent l'argile marine sur une grande portion de la région. Les sédiments fluvio-glaciaires modifient cette séquence dans les secteurs de Saint-Éloi (immense delta se forma dans la mer de Goldthwait) et de Saint-Modeste (moraine frontale de Saint-Antonin). Les alluvions proglaciaires mises en place à partir de cette moraine constituent avec celle-ci l'aquifère de Saint-Modeste. La tourbe occupe une superficie importante dans la région sous étude (McCormack, 1978).</p>	Épandage fluvio- glaciaire
Saint-Ambroise (Saguenay – Lac Saint-Jean)	<p>Dépôt de sable et gravier. 2 puits sont construits le long de la Rivière des Aulnaies dans des formations de sable et gravier (Jolicoeur, 1986a et 1986b).</p> <p>Sédiments deltaïques (sables apparemment non-fossilières avec du gravier à certains endroits) surmontés de sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).</p>	Épandage fluvio- glaciaire

* Cette municipalité est citée plus d'une fois parce que plus d'un type d'aquifère y est exploité.

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Saint-Augustin (Saguenay – Lac Saint-Jean)	<p>Couche de sable et gravier d'environ 3 m d'épaisseur à 30 à 60 m de profondeur sous une couche épaisse d'argile. Nappe confinée. 2 couches de gravier fluvio-glaciaire séparées par une couche d'argile (Tremblay F., 1981; Desgagné, 1991; Benhouhou et Dessureault, 1991).</p> <p>Sédiments deltaïques (principaux dépôts apparaissant en surface, composés de sables apparemment non-fossilifères avec du gravier à certains endroits). Un important esker se trouve au nord-ouest du village de Saint-Augustin, légèrement à l'est de la rivière Saint-Ludger (Lasalle et Tremblay, 1978).</p>	Épandage fluvio-glaciaire
Sainte-Blandine (Bas Saint-Laurent)	<p>Dépôt de sable et gravier de la vallée de la Neigette (Liard, 1989)</p>	Épandage fluvio-glaciaire (traînée de vallée)
Sainte-Hedwidge (Saguenay – Lac Saint-Jean)	<p>Sable fin à grossier avec un peu de gravier. Nappe libre et, localement, semi-captive (Denis, 1998; Denis, 1999).</p> <p>Sédiments de lacs proglaciaires (principaux dépôts de cette région, composés de sables bien triés, sable fin ou silt et argile stratifiés) surmontés de sédiments fluvioglaciaires (graviers et sables) (Lasalle et Tremblay, 1978).</p>	Épandage fluvio-glaciaire
Saint-Félicien (Saguenay – Lac Saint-Jean)	<p>Dépôt de gravier d'origine morainique surmonté d'un dépôt de sable et gravier dont une partie est captive sous un dépôt d'argile (Verreault, 2003).</p> <p>Sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).</p> <p>Selon Grenier et McCormack (1987) les sédiments proviennent d'un environnement de dépôt deltaïque.</p>	Épandage fluvio-glaciaire

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Saint-Léon Le Grand et Vallée de la rivière Humqui (Gaspésie)	Vallée comblée par des dépôts fluvio-glaciaires et des alluvions (Liard, 1989)	Épandage fluvio-glaciaire
Saint-Octave	Aquifères de sables et graviers (>40 m d'épaisseur) confinés sous les dépôts argileux du bas plateau de Price (Liard, 1989)	Épandage fluvio-glaciaire
Saint-Omer	Dépôts de sable et gravier fluvio-glaciaires situé au bas de la vallée de la rivière Stewart (Liard, 1989).	Épandage fluvio-glaciaire
Saint-Raymond-de-Portneuf (Québec)	Dépôts granulaires d'origine marine : sable deltaïque et sable et gravier fluvio-glaciaire (épaisseur allant jusqu'à 25 à 30 m). Il y a également un dépôt de sédiments marins d'eau profonde (silt et argile silteuse). Ces dépôts sont identifiés partout sur le territoire immédiatement sous les sables de surface. En plusieurs endroits du territoire, on retrouve au contact du socle un dépôt de matériaux fluvio-glaciaires d'épaisseur et de composition variables. Ces dépôts sont divisés en trois unités hydrostratigraphiques : 1) sables marins et deltaïques qui constituent une formation aquifère à nappe libre d'épaisseur relativement importante ainsi qu'une grande étendue, ces sables constituent l'unité exploitée à des fins d'alimentation en eau potable par les installations actuelles de la ville; 2) dépôts de sédiments marins d'eau profonde d'épaisseur atteignant plusieurs dizaines de mètres; 3) sédiments fluvio-glaciaires que l'on retrouve sous l'importante couche de sédiments marins d'eau profonde, cette couche granulaire forme un aquifère à nappe captive qui est cependant peu ou pas exploitée à l'heure actuelle (Proulx, 2002).	3) Épandage fluvio-glaciaire
Saint-Stanislas (Saguenay -- Lac Saint-Jean)	Matériel argileux percé en un endroit par une bande de sable et gravier, orientée NS. Ce dépôt plonge sous l'argile (Roy, 1962; Bilodeau, 1979)	Épandage fluvio-glaciaire

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Shipshaw (Saguenay – Lac Saint-Jean)	<p>Couche de sable de 5 à 20 m d'épaisseur déposée sur une couche d'argile qui repose sur le socle rocheux. Les formations aquifères de la région sont constituées de matériaux alluvionnaires sableux et silteux ou de matériaux fluvio-glaciaires.</p> <p>Le puits intercepte un aquifère de sable fin, propre et uniforme, l'épaisseur saturée est d'environ 12 m. Aquifère à nappe libre (Crépault, 1987; Tremblay et Dessureault, 1988; Tremblay D., 2000).</p> <p>Sédiments deltaïques (principaux dépôts apparaissant en surface, composés de sables apparemment non-fossilifères avec du gravier à certains endroits) surmontés de sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).</p>	Épandage fluvio-glaciaire
Sutton et Abercorn (Montérégie)	Aquifère confiné constitué d'une formation sablo-graveleuse reconnue dans le bassin de la rivière Richelieu (McCormack, 1981b).	Épandage fluvio-glaciaire
La Baie (Saguenay – Lac Saint-Jean)	<p>Sables et graviers d'origine fluvio-glaciaire sur au moins 30 m. Ces sédiments sont propres et uniformes. Aquifère à nappe libre. Plus à l'est, dans le secteur du parc industriel, les dépôts proviennent principalement de la mer Laflamme (sédiments de plaine d'inondation : sable avec gravier, silt et argile) (Dessureault, 1980; Tremblay F., 1989; Tremblay D., 1995; Tremblay D., 1997a et Tremblay D., 1997b; Paradis et Parent, 2002).</p> <p>Sédiments fluvio-glaciaires (graviers et sables déposés, dans ce cas, sous forme de plaine d'épandage) surmontés de sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).</p>	Épandage sub-aquatique
Laterrière (Saguenay – Lac Saint-Jean)	<p>Alternance de lits de sable et de gravier avec présence d'environ 10% de silt d'épaisseur variant environ entre 25 et 50 m. Aquifère à nappe libre (Denis, 1997; Tremblay D., 1999).</p> <p>Sédiments fluvio-glaciaires (graviers et sables déposés, dans ce cas, sous forme de plaine d'épandage) surmontés de sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).</p> <p>Plaine d'épandage (Duchesne, 2000).</p>	Épandage sub-aérien

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Métabetchouan (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Sables et graviers de 7 à 11 m d'épaisseur et quelques unités de sable fin et de silt (Jolicoeur, 1997a; Grenon, 1998; Tremblay et Lapierre, 1998). Sédiments fluvio-glaciaires (graviers et sables déposés, dans ce cas, sous forme de plaine d'épandage) surmontés de sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).	Épandage sub-aérien
Saint-Gédéon (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Présence de sable fin à travers les couches de sable et gravier. Deux types de recharge sont considérées : l'infiltration en fond de rivière et l'infiltration des eaux de précipitation autant dans la vallée de la rivière Couche paganiche qu'au pied des montagnes en direction EW (Jolicoeur, 1999b; Tremblay R., 1994). Sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).	Épandage sub-aérien
Amqui, Causapscal et Vallée de la rivière Matapédia * (Bas Saint-Laurent)	Importants dépôts alluviaux ou fluvio-glaciaires (Liard, 1989).	Dépôts alluviaux
Cap-Chat et Vallée de la rivière Cap-Chat (Gaspésie)	Dépôts comparables aux rivières Matane et Sainte-Anne, dépôts alluvionnaires (Liard, 1989).	Dépôts alluviaux
Grandes-Piles (Mauricie)	Aquifère constitué de sable, gravier et blocs limité au nord et à l'est par des affleurements rocheux et au sud par la rivière Saint-Maurice (à 100 m de distance) (Jolicoeur, 1997b).	Dépôts alluviaux
Grande-Vallée (Gaspésie)	Dépôts alluvionnaires qui se prolongent sur plusieurs km en amont du village de Grande-Vallée (Liard, 1989).	Dépôts alluviaux

* Cette municipalité est citée plus d'une fois parce que plus d'un type d'aquifère y est exploité.

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Matane (Bas Saint-Laurent)	Dépôt d'alluvions grossiers de 30 à 90 m d'épaisseur qui sont en contact avec la rivière Matane (Liard, 1989). Situé à proximité de la rivière Matane. Zone crépinée dans un dépôt de sable et gravier avec peu de silt. Ce dépôt est recouvert d'une couche de gravier silteux, d'une couche d'argile silteuse, d'autres couches de sable et gravier (Hernandez et Juneau, 1990).	Dépôts alluviaux
Marsoui (Gaspésie)	21 m de sable et gravier grossier dans une matrice de silt déposés sur un horizon épais de silt argileux (Jolicoeur, 2001a).	Dépôts alluviaux
Nouvelle et Vallée de la rivière Nouvelle (Gaspésie)	Dépôts de sable et graviers fluvio-glaciaires et alluvions grossiers; l'aquifère en contact avec la rivière (Liard, 1989).	Dépôts alluviaux
Port-Daniel-est * (Gaspésie)	Dépôts fluvio-glaciaires et alluvions (Liard, 1989).	Dépôts alluviaux
Sainte-Anne-des-Monts et Vallée de la rivière Sainte-Anne (Bas Saint-Laurent)	Importants dépôts alluviaux aquifères (Liard, 1989)	Dépôts alluviaux
Saint-Léon Le Grand et Vallée de la rivière Humqui * (Gaspésie)	Vallée comblée par des dépôts fluvio-glaciaires et des alluvions (Liard, 1989)	Dépôts alluviaux

* Cette municipalité est citée plus d'une fois parce que plus d'un type d'aquifère y est exploité.

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Shipshaw * (Saguenay – Lac Saint-Jean)	<p>Couche de sable de 5 à 20 m d'épaisseur déposée sur une couche d'argile qui repose sur le socle rocheux. Les formations aquifères de la région sont constituées de matériaux alluvionnaires sableux et silteux ou de matériaux fluvio-glaciaires.</p> <p>Le puits crépiné intercepte un aquifère de sable fin, propre et uniforme, l'épaisseur saturée est d'environ 12 m. Aquifère à nappe libre (Crépault, 1987; Tremblay et Dessureault, 1988; Tremblay D., 2000).</p> <p>Sédiments deltaïques (principaux dépôts apparaissant en surface, composés de sables apparemment non-fossilifères avec du gravier à certains endroits) surmontés de sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).</p>	Dépôts alluviaux
Cap-de-la-Madeleine – Saint-Louis-de-France (Mauricie)	Les dépôts des hautes terrasses se composent de sables fins à moyens avec, localement, des faciès silteux et à gravier (Tremblay et al., 1971; Consultants H.G.E. Inc., 1992).	Delta post-glaciaire
Champlain (Mauricie)	Sable de hautes et basses terrasses sus-jacentes à des argiles marines ou au roc. La stratigraphie varie d'un site de forage à l'autre mais la stratigraphie générale est composée de sable de granulométrie variable au-dessus d'argile qui elle-même surmonte des gravier et argile. L'unité de sable de granulométrie variable est la seule formation aquifère potentielle (Caron, 1986; Michaud, 1992).	Delta post-glaciaire
Labrecque (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Sédiments deltaïques (principaux dépôts apparaissant en surface, composés de sables apparemment non-fossilifères avec du gravier à certains endroits) (Lasalle et Tremblay, 1978).	Delta post-glaciaire
L'Ascension (Saguenay – Lac Saint-Jean)	<p>Sable fin à grossier contenant des lits de silt et d'argile; nappe libre reposant sur un dépôt d'argile. Puits 3/93 : crépiné majoritairement dans un dépôt de sable moyen sur 14 m d'épaisseur (Jolicoeur, 1984; Jolicoeur, 1990; Sansfaçon, 1993; Denis, 2000).</p> <p>Sédiments deltaïques (principaux dépôts apparaissant en surface, composés de sables apparemment non-fossilifères avec du gravier à certains endroits) surmontés de sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).</p>	Delta post-glaciaire

Municipalité	Caractéristiques géologiques aux environs du puits (rapports municipaux, gouvernementaux et autres)	Type de dépôt (Annexe II)
Saint-Honoré (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Sédiments deltaïques (sables apparemment non-fossilifères avec du gravier à certains endroits) (Lasalle et Tremblay, 1978).	Delta post-glaciaire
Saint-Ludger-de-Milot (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Sédiments deltaïques (principaux dépôts apparaissant en surface, composés de sables apparemment non-fossilifères avec du gravier à certains endroits) (Lasalle et Tremblay, 1978).	Delta post-glaciaire
Saint-Raymond-de-Portneuf* (Québec)	Dépôts granulaires d'origine marine : sable deltaïque et sable et gravier fluvio-glaciaire (épaisseur allant jusqu'à 25 à 30 m). Il y a également un dépôt de sédiments marins d'eau profonde (silt et argile silteuse). Ces dépôts sont identifiés partout sur le territoire immédiatement sous les sables de surface. En plusieurs endroits du territoire, on retrouve au contact du socle un dépôt de matériaux fluvio-glaciaires d'épaisseur et de composition variables. Ces dépôts sont divisés en trois unités hydrostratigraphiques : 1) sables marins et deltaïques qui constituent une formation aquifère à nappe libre d'épaisseur relativement importante ainsi qu'une grande étendue, ces sables constituent l'unité exploitée à des fins d'alimentation en eau potable par les installation actuelles de la ville ; 2) dépôts de sédiments marins d'eau profonde d'épaisseur atteignant plusieurs dizaines de mètres; 3) sédiments fluvio-glaciaires que l'on retrouve sous l'importante couche de sédiments marins d'eau profonde, cette couche granulaire forme un aquifère à nappe captive qui est cependant peu ou pas exploitée à l'heure actuelle (Proulx, 2002).	1) Delta post-glaciaire
Shipshaw * (Saguenay – Lac Saint-Jean)	Couche de sable de 5 à 20 m d'épaisseur déposée sur une couche d'argile qui repose sur le socle rocheux. Les formations aquifères de la région sont constituées de matériaux alluvionnaires sableux et silteux ou de matériaux fluvio-glaciaires. Le puits crépiné intercepte un aquifère de sable fin, propre et uniforme, l'épaisseur saturée est d'environ 12 m. Aquifère à nappe libre (Crépault, 1987; Tremblay et Dessureault, 1988; Tremblay D., 2000).	Delta post-glaciaire
	Sédiments deltaïques (principaux dépôts apparaissant en surface, composés de sables apparemment non-fossilifères avec du gravier à certains endroits) surmontés de sables et graviers de la mer Laflamme (Lasalle et Tremblay, 1978).	

* Cette municipalité est citée plus d'une fois parce que plus d'un type d'aquifère y est exploité.