

Révision de la numérotation des règlements

Veillez prendre note qu'un ou plusieurs numéros de règlements apparaissant dans ces pages ont été modifiés depuis la publication du présent document. En effet, à la suite de l'adoption de la Loi sur le Recueil des lois et des règlements du Québec (L.R.Q., c. R-2.2.0.0.2), le ministère de la Justice a entrepris, le 1^{er} janvier 2010, une révision de la numérotation de certains règlements, dont ceux liés à la Loi sur la qualité de l'environnement (L.R.Q., c. Q-2).

Pour avoir de plus amples renseignements au sujet de cette révision, visitez le http://www.mddep.gouv.qc.ca/publications/lois_reglem.htm.

Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



Université de Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre de la recherche en géologie

Canada

Québec

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Liste des figures	v
Liste des tableaux	xiv
1. Guide méthodologique pour la caractérisation hydrogéologique régionale des systèmes aquifères en roches sédimentaires fracturées	1
1.1 Vers un inventaire québécois des ressources en eau souterraine	1
1.2 Objectifs et utilités du guide méthodologique sur la caractérisation des aquifères rocheux fracturés	1
1.3 Approche et produits de la cartographie hydrogéologique régionale	2
2. Établissement du cadre hydrostratigraphique	7
2.1 Introduction	7
2.2 Les aquifères rocheux – cadre général	7
2.3 Compilation des données géologiques et hydrogéologiques existantes	8
2.3.1 Données requises et sources des données	9
2.3.2 Gestion des données et codification des unités hydrostratigraphiques	10
2.3.3 Cartes préliminaires, modèle conceptuel et identification des travaux de terrain prioritaires	11
2.4 Travaux de terrain	11
2.4.1 Visite d’affleurement, cartographie géologique et stratigraphie de la séquence rocheuse	12
2.4.2 Description des forages	14
2.4.3 Porosité des unités rocheuses	15
2.4.4 Cartographie des formations quaternaires	16
2.4.5 Validation des données géologiques	17
2.5 Présentation de l’information hydrostratigraphique	17
2.5.1 Coupes hydrostratigraphiques	18
2.5.2 Cartes des aquifères et des aquitards	18
2.5.3 Carte des contextes hydrogéologiques	20
2.6 Recommandations et produits attendus	20
3. Élaboration d’une carte piézométrique régionale	33
3.1 Traitement préliminaire	34
3.1.1 Collecte des données existantes	34
3.1.2 Sélection des points de mesure	34
3.1.3 Évaluation de l’erreur minimale acceptable (ErMinA)	36
3.1.4 Évaluation de l’erreur de mesure anticipée	36
3.2 Levés de terrain et validation des mesures	38
3.2.1 Localisation du point de mesure	38
3.2.2 Vérification du lien hydraulique	38
3.2.3 Mesure de la profondeur de la surface piézométrique	38
3.2.4 Mesure de l’élévation du point de référence	39
3.2.5 Validation des mesures	39
3.3 Procédure d’interpolation des mesures	40
3.4 Présentation – Mise en carte	40
3.5 Conclusion	41

4. Caractérisation des propriétés hydrauliques	53
4.1 Introduction	53
4.2 Compilation des données existantes	54
4.2.1 Définitions de base	54
4.2.2 Validation des données	56
4.3 Détermination des propriétés hydrauliques	56
4.3.1 Modèle conceptuel du site testé	57
4.3.2 Essai à l'aide d'obturateurs pneumatiques (essai Lugeon)	58
4.3.3 Essai de perméabilité in situ (slug test)	60
4.3.4 Essai de productivité d'un puits – capacité spécifique	60
4.3.5 Essai de pompage	62
4.3.6 Méthode graphique par réseau d'écoulement	62
4.3.7 Modélisation numérique	63
4.4 Intégration des données	63
4.4.1 Densité de points de contrôle	63
4.4.2 Considérations lors de la comparaison des données hydrauliques	64
4.4.3 Effet d'échelle et représentativité des données hydrauliques à l'échelle régionale	65
4.4.4 Quel type d'essai hydraulique utiliser?	66
4.4.5 Mise en forme des données	67
4.5 Recommandations sur les étapes à suivre	68
5. Caractérisation de la qualité de l'eau souterraine	83
5.1 Objectifs de l'évaluation de la qualité de l'eau souterraine	83
5.1.1 Mesurer les concentrations naturelles des constituants de l'eau souterraine	83
5.1.2 Évaluer la variabilité de la qualité de l'eau	83
5.1.3 Cerner les problématiques de la qualité de l'eau d'origine naturelle ou anthropique	83
5.2 Choix des paramètres à mesurer et à analyser	84
5.2.1 Paramètres microbiologiques	84
5.2.2 Paramètres physico-chimiques	84
5.3 Utilisation des données existantes	85
5.4 Paramètres à analyser pour des cas particuliers	85
5.4.1 Paramètres organiques et radiologiques	85
5.4.2 Paramètres isotopiques	85
5.5 Programme d'échantillonnage de l'eau souterraine	87
5.5.1 Objectifs du programme d'échantillonnage	87
5.5.2 Nombre d'échantillons à prélever	87
5.5.3 Sélection des puits à échantillonner	87
5.6 Protocole d'échantillonnage	88
5.6.1 Prélèvement et conservation des échantillons	88
5.6.2 Contrôle de la qualité de l'échantillonnage et des analyses	88
5.6.3 Informations à noter	88
5.7 Traitement des données géochimiques	88
5.7.1 Outils informatiques	89
5.7.2 Vérification de la qualité des résultats d'analyses chimiques	89
5.7.3 Traitement statistique des données	89
5.8 Évaluation de la qualité de l'eau	89
5.8.1 Dépassements des critères de qualité d'eau	89
5.8.2 Signalement des dépassements des critères de qualité d'eau	89
5.9 Représentation graphique et cartographique de la qualité de l'eau	89
5.9.1 Cartes à points	90
5.9.2 Statistiques présentées à l'aide de diagrammes en boîte (box plot)	90
5.9.3 Représentation cartographique des types d'eau relativement aux contextes hydrogéologiques	90

5.10 Représentation cartographique des types d'eau relativement aux contextes géologiques par les diagrammes radiaux et de Stiff	91
5.10.1 Présentation graphique des types d'eau à l'aide de diagrammes de Piper	91
5.11 Qualité de l'eau pour l'irrigation	92
5.11.1 Taux d'adsorption du sodium (TAS)	92
5.11.2 Diagramme de Wilcox	92
5.12 Recommandations relatives à la conservation de la ressource	92
6. Procédure de saisie des données hydrogéologiques	115
6.1 Introduction	115
6.2 Stratégie d'acquisition des données	115
6.2.1 Acquisition des données sur le terrain	116
6.2.2 Acquisition des données numériques	120
6.2.3 Transfert de données provenant de fichiers numériques	121
6.3 Conclusion et recommandations	122
7. Intégration des données générées et gestion des eaux souterraines	133
7.1 Suivi de la nappe	133
7.2 Vulnérabilité	134
7.2.1 Vulnérabilité intrinsèque	134
7.2.2 Vulnérabilité spécifique	136
7.2.3 Évaluation du risque de contamination de l'eau souterraine d'un territoire	136
7.3 Périmètres de protection	137
7.3.1 Formation d'un comité de protection	137
7.3.2 Détermination des périmètres de protection	137
7.3.3 Évaluation du risque de contamination dans les PDP	139
7.3.4 Gestion des PDP	139
7.3.5 Qualité, quantité et exploitabilité	140
7.4 Aménagement du territoire	141
8. BIBLIOGRAPHIE	149
ANNEXE A – Lexique	A-1
ANNEXE B – Prélèvement des échantillons et prévention de la contamination	B-1
ANNEXE C – Modèle conceptuel de données hydrogéologiques	C-1

Liste des figures

Figure 1.1	Schéma conceptuel de l'approche préconisée dans le présent guide méthodologique. Les étapes de la caractérisation hydrogéologique régionale décrites dans le présent ouvrage (cadres et flèches en trait plein). Les travaux qui ne sont possibles qu'après la cartographie systématique ne sont pas décrits ici (cadres et flèches en traits pointillés).	4
Figure 2.1	Écoulement de l'eau souterraine dans un système aquifère comprenant une nappe libre, une nappe perchée et une nappe confinée. Si le système aquifère cartographié comprend plusieurs aquifères d'intérêts (ex. : un aquifère à nappe libre et un aquifère confiné), les paramètres hydrogéologiques doivent être déterminés et présentés séparément (modifiée d'après Castany et Margat, 1977).	22
Figure 2.2	Classification hydrogéologique des aquifères présents dans les formations rocheuses (modifiée d'après Streltsova, 1976; Sharp, 1993). Les aquifères <i>purement fracturés</i> sont des milieux dans lesquels l'eau est emmagasinée dans les fractures et non pas dans la matrice de la roche (ex. : granite, roches cristallines). Dans les aquifères <i>fracturés</i> , la porosité de la matrice est faible, mais l'emmagasinement est plus élevé que dans les fractures (ex. : dolomies, calcaires). Finalement, dans certains contextes, il est possible de retrouver des formations rocheuses sans fractures mais avec une porosité de matrice élevée (ex. : grès des Îles-de-la-Madeleine). K_f est la conductivité hydraulique des fractures, K_m est la conductivité hydraulique de la matrice; S_f est l'emmagasinement des fractures et S_m est l'emmagasinement de la matrice.	23
Figure 2.3	Effet de l'orientation des surfaces sur la fréquence des joints exposés. La quantité des fractures mesurées pour la famille P sur la face X de la figure 2.3 ne sera pas représentative de la réalité, puisque l'orientation de la paroi est parallèle à la direction générale des fractures de la famille P.	24
Figure 2.4	Levé de terrain le long de deux traverses d'orientation différente et correction de Terzaghi, où $N = n/\sin(\Theta)$ soit le nombre réel de fractures d'une orientation donnée (N) qui est exprimé par le nombre de fractures mesurées le long de la traverse (n) divisé par le sinus de l'angle entre l'orientation de la traverse et l'orientation des fractures (Θ), toujours inférieur ou égal à 90° . Par exemple la fréquence des fractures de cette famille qui croisent la traverse 2 et l'on y apporte la correction de Terzaghi soit $N = 4/\sin 40^\circ$ ou $N = 5,37$.	24
Figure 2.5	Traitement des données de fracturation. Histogramme présentant l'espacement des fractures pour une famille donnée.	25
Figure 2.6	Carte géologique du socle rocheux (a) et coupe stratigraphique (b). La carte géologique est une mise-à-jour de la carte de Globensky (1987) par Rocher <i>et al.</i> , (2002). Cette mise-à-jour est basée sur la révision des affleurements et la description de nouvelles carottes de forage. La localisation des nouvelles visites, les nouveaux forages de même que les données antérieures et les éléments structuraux sont indiqués sur la carte par des symboles appropriés. Le système de codification des unités géologiques utilisé est celui présenté sur les cartes de Globensky (1987). La coupe stratigraphique présentée (Coupe A-A') montre une exagération verticale de 20 fois.	26
Figure 2.7	Carte d'élévation de la surface du socle rocheux. Cette carte correspond à l'élévation supérieure de l'aquifère rocheux. Tous les points de mesures utilisés pour l'interpolation sont présentés.	27
Figure 2.8	Carte d'épaisseur d'argile marine.	28
Figure 2.9	Carte des contextes hydrogéologiques.	29
Figure 2.10	Carte des principales zones de recharge de l'aquifère rocheux.	30

Figure 2.11	Modèle conceptuel préliminaire et modèle conceptuel final. L'analyse des données existantes a d'abord permis de définir une stratigraphie préliminaire schématisant le système aquifère cartographié (a). À la suite des campagnes de terrain, les différents travaux effectués (forages, essais de perméabilité, visites de carrières et d'affleurements, etc.) ont aidé à peaufiner le modèle conceptuel (b). Ainsi, l'aquifère régional n'est pas seulement composé de roches fracturées mais aussi par endroits, de sable et de gravier d'origine fluvio-glaciaire ou de till délavé de ses particules fines. Les différents essais de perméabilité montrent que la partie effective de l'aquifère se trouve à 100 mètres sous la surface du socle rocheux (Nastev <i>et al.</i> , 2002).	31
Figure 3.1	Schématisation de la mesure de l'élévation de la surface piézométrique. L'élévation de la surface piézométrique est donnée par :	42
Figure 3.2	Représentation schématique tridimensionnelle de la surface piézométrique d'un bassin d'écoulement et de ses composantes. Le concept de bassin d'écoulement est analogue à celui de bassin versant (ou hydrologique) utilisé en hydrologie (Liamas, 1985).	43
Figure 3.3	Délimitation des bassins d'écoulement et de leurs composantes à l'aide de la carte d'écoulement préliminaire.	44
Figure 3.4	Distribution optimale des points de mesure à l'intérieur d'un bassin d'écoulement hypothétique.	45
Figure 3.5	Distribution des points de mesure pour un bassin d'écoulement de forme hétérogène et calcul de l'erreur minimale de mesure pour chacune des composantes des bassins et des sous-bassins d'écoulement. L'erreur minimale (ErMIN) est donnée par l'équation 3.1. Notons que la distance minimale de séparation (DMIN) ne coïncide pas nécessairement avec le gradient minimal (GMIN). On observe dans cet exemple de calcul que l'exactitude nécessaire pour la ligne de convergence est beaucoup plus importante que pour les versants.	46
Figure 3.6	Effet de l'erreur de mesure sur la direction d'écoulement et la magnitude du gradient piézométrique : (a) erreur sur un point de mesure localisé parallèlement à l'écoulement; (b) erreur sur un point de mesure localisé perpendiculairement. L'erreur est de 100 % lorsque celle-ci est égale à la différence de niveau piézométrique entre deux mesures.	47
Figure 3.7	Graphique des mesures d'élévation estimées à l'aide des cartes topographiques en fonction des élévations mesurées par une méthode exacte. Les points de validation utilisés sont des puits nivelés à l'aide d'un niveau électronique. Ces puits sont répartis uniformément sur l'ensemble de la région d'étude. Le point de référence commun utilisé pour la comparaison est le sol. Dans cet exemple, l'erreur induite par les cartes topographiques est considérée inférieure à 1,06 m.	48
Figure 3.8	Exemple d'hydrogramme de puits. Un hydrogramme est la représentation graphique de la mesure de l'élévation de la surface piézométrique en fonction du temps. Cet outil est généralement utilisé pour connaître les fluctuations naturelles de la surface piézométrique. Pour ce faire, les mesures doivent être prises dans un puits d'observation non influencé par le pompage (mesures directes et indirectes).	49
Figure 3.9	Hydrogramme d'un puits domestique pour évaluer la représentativité des niveaux statiques.	50
Figure 3.10	Graphique des profondeurs de la surface piézométrique mesurées lors de l'aménagement des puits en fonction des mesures prises sur le terrain. On observe que l'écart entre les deux séries de mesure est parfois considérable. Une inspection approfondie montre que certains de ces points de mesure sont affectés par le pompage d'une carrière et d'un puits municipal. Cependant, d'autres écarts observés ne peuvent être expliqués avec certitude (puits domestiques influencés par le pompage ou erreur de mesure) et ces mesures seront alors retirées de la banque de données.	51

Figure 4.1	Exemple d'un modèle conceptuel pour le projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec (Nastev <i>et al.</i> , 2000).	69
Figure 4.2	Équipement pour les d'essais de perméabilité à l'aide d'obturateurs pneumatiques: a) équipement d'injection et d'acquisition des données, b) système de levier (Nastev <i>et al.</i> , 2000).	69
Figure 4.3	Essai d'injection à l'aide des obturateurs pneumatiques – relations entre la charge, h , et le taux d'injection, Q , en fonction du temps (figure modifiée de NRC, 1996).	70
Figure 4.4	Essai de perméabilité <i>in situ</i> – réponse oscillatoire mesurée et simulée par la méthode d'Uffink-van der Kamp. Puits de Rivière du Nord, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	70
Figure 4.5	Estimation de la transmissivité et de la capacité spécifique. Puits de la Montée Barrette à Sainte-Anne-des-Plaines, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	70
Figure 4.6	Méthode graphique par réseau d'écoulement pour le calcul de l'écoulement souterrain dans un aquifère. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	71
Figure 4.7	Valeurs de conductivité hydraulique pour la caractérisation du système aquifère par différentes méthodes. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	71
Figure 4.8	Corrélation entre la conductivité hydraulique et le volume cumulatif d'eau pompée/injectée. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	72
Figure 4.9	Effet d'échelle sur la valeur de la perméabilité mesurée.	72
Figure 4.10	Localisation des puits d'observation et de pompage utilisés lors de l'essai de pompage à Saint-Janvier (Karanta <i>et al.</i> , 2001).	73
Figure 4.11	Stratigraphie des unités géologiques interceptées par le puits STJA-1 à Saint-Janvier (Karanta <i>et al.</i> , 2001).	73
Figure 4.12	Rabattement mesuré en fonction du temps et courbe type de la méthode de Theis ajustée pour une réponse transitoire dans un milieu isotrope. Puits de la Montée Barrette, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	74
Figure 4.13	Variation de la transmissivité en fonction de la profondeur lors des essais d'injection à charge constante à l'aide des obturateurs pneumatiques. Puits PE-2, Côte Saint-Louis et RIA-99, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	74
Figure 4.14	Sud-ouest du Québec. Variation de la transmissivité en fonction de la longueur de la section ouverte du puits dans le roc lors d'essais à charge constante à l'aide d'obturateurs pneumatiques. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	75
Figure 4.15	Distribution normale des logarithmes de la conductivité hydraulique des formations rocheuses. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	75
Figure 4.16	Histogramme des observations des conductivités hydrauliques dans les formations rocheuses. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	76
Figure 4.17	Variogrammes pour le krigeage de la conductivité hydraulique des formations rocheuses. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	76
Figure 4.18	Présentation de la distribution spatiale de la conductivité hydraulique du roc fracturé du système aquifère du Sud-Ouest québécois. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	77
Figure 4.19	Contours des logarithmes de la conductivité hydraulique du roc fracturé et les types d'essais utilisés. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	77

Figure 4.20	Arbre décisionnel pour la caractérisation des propriétés hydrauliques.	78
Figure 5.1	Caractérisation d'eaux souterraines à l'aide des rapports isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$. À titre d'exemple, la droite faite de tirets représente les rapports isotopiques des précipitations locales et la droite pointillée, un mélange hypothétique avec des eaux fraîches et salines.	93
Figure 5.2	Caractérisation des nitrates dans l'environnement, à l'aide des rapports isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (modifiée de Kendall, 1998).	93
Figure 5.3	Distribution régionale des âges obtenus par datation ^3H et ^{14}C des eaux souterraines du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec.	94
Figure 5.4	Carte à points du taux d'adsorption du sodium (TAS) des eaux souterraines du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (modifiée de Savard et al. [sous presse]).	95
Figure 5.5	Diagramme des concentrations en fluorures et en strontium des eaux souterraines du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec pour différentes unités géologiques d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (modifié de Cloutier <i>et al.</i> , 2001).	96
Figure 5.6	Carte des types d'eau souterraine du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (modifiée de Savard <i>et al.</i> [sous presse]).	97
Figure 5.7	Diagrammes radiaux des types d'eau souterraine du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (figure modifiée de Savard <i>et al.</i> [sous presse]).	98
Figure 5.8	Exemple de diagrammes montrant les résultats pour l'échantillon JOSE11 : a) diagramme radial et b) diagramme de Stiff.	99
Figure 5.9	Symboles à utiliser pour représenter la localisation d'un point d'échantillonnage de l'eau sur une carte.	99
Figure 5.10	a) Diagramme de Piper et types d'eau, b) exemple d'utilisation du diagramme de Piper dans l'analyse des résultats de la caractérisation de seaux souterraines du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec (modifié de Savard <i>et al.</i> [sous presse]).	100
Figure 5.11	Diagramme de Wilcox des classes d'eau souterraine du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (figure modifiée de Savard <i>et al.</i> [sous presse]).	101
Figure 6.1	Exemple de champs remplis pour les blocs 1 et 2. Dans ce cas, la station est visitée dans le but de prendre un échantillon d'eau et de mesurer le niveau d'eau. Cette station a été visitée auparavant; sa localisation de référence a donc été ajoutée et il existe un rapport relatif à cette station dont le numéro de dossier est A-Bro-001.	123
Figure 6.2	Exemple de champs remplis pour le bloc 3. Dans ce cas, l'adresse du propriétaire n'est pas celle du puits/captage.	123
Figure 6.3	Exemple de champs remplis pour le bloc 4. Dans ce cas, le puits est privé et il sert à l'approvisionnement en eau potable domestique ainsi qu'à l'agriculture. De plus, il sert à alimenter 6 personnes et une ferme comprenant 60 vaches laitières. L'eau n'est pas traitée.	123
Figure 6.4	Exemple de champs remplis pour le bloc 5. Souvent le propriétaire du puits détient le rapport de forage et peut fournir la plupart des informations qui figurent dans ce bloc. Ces données appartiennent aussi à la base de données des puisatiers.	124
Figure 6.5	Exemple illustrant la relation entre les activités potentiellement polluantes et le puits, dans le schéma de gauche, et la stratigraphie du puits, dans le schéma de droite.	124
Figure 6.6	Exemple de champs remplis pour le bloc 8.	125

Figure 6.7	Exemple de champs remplis pour le bloc 10. Cet exemple présente les informations recueillies à la station 00EB-021 et indique que l'eau est dure et de qualité moyenne, et qu'un manque d'eau est survenu une fois dans le passé. Important : Le numéro de station est répété dans la partie supérieure droite.	125
Figure 6.8	Exemple de champs remplis pour le bloc 11. Cet exemple présenté ici montre les champs remplis lorsqu'un niveau d'eau est mesuré. Dans ce cas, il n'y a pas eu de pompage. La profondeur du niveau d'eau est toujours mesurée en mètres et ce niveau a été mesuré à partir du point de référence le plus bas, c'est-à-dire à 0,6 m au dessus du sol.	125
Figure 6.9	Exemple de champs remplis pour le bloc 12. Cette section présente un forage contenant 3 unités lithologiques, 2 unités quaternaires et une unité rocheuse. Les contacts lithologiques sont à 5 et 10 m. La première unité à la surface est un till contenant 10 % de fragments de calcaire. Le champ ID peut ne pas être unique mais la combinaison des champs INTERVAL et ID doit l'être. Certains préfèrent mettre des ID différents à chaque ligne. Le X dans le champ COMMENT indique qu'un commentaire sur les fragments de calcaire est noté dans le bloc 15 (figure 6.12).	126
Figure 6.10	Exemple de champs remplis pour le bloc 13. Cet exemple montre que deux intervalles de la section décrite précédemment ont été échantillonnés. Le premier, un échantillon de roche a été pris pour identification, un commentaire sur l'échantillon est noté comme Y dans le bloc 13. Une deuxième échantillon de sable a été pris dans le but de faire une analyse granulométrique. Le champ REF_ID indique que c'est la lithologie de l'intervalle mentionné dans le premier champ qui a été échantillonnée.	126
Figure 6.11	Exemple de champs remplis pour le bloc 14. Cette figure indique qu'une photo du till a été prise, c'est-à-dire la lithologie de l'intervalle (INTERVAL) « I01 » avec le ID « A ».	127
Figure 6.12	Exemple de champs remplis pour le bloc 15. Ce bloc permet de noter les commentaires sur les lithologies, les échantillons et les photos. Cet exemple renvoie aux commentaires des figures 6.9 et 6.10.	127
Figure 6.13	Exemple de champs remplis pour le bloc 16. Cette section montre qu'en plus de l'échantillon d'eau, un duplicata a été échantillonné.	127
Figure 6.14	Exemple de champs remplis pour le bloc 17. Ce bloc comprend les informations sur les standards utilisés pour faire le calibrage des appareils. Le calibrage a été fait par l'oxygène dissous en %, et la mesure a été vérifiée.	127
Figure 6.15	Exemple de champs remplis pour le bloc 18. Cette figure présente un exemple de saisie du bloc 18. Une librairie existe pour remplir le champ METHODE.	127
Figure 6.16	Exemple de champs remplis pour le bloc 19. Cet exemple montre qu'une analyse des composants inorganiques de l'échantillon d'eau sera effectuée, et que cet échantillon est réparti dans trois bouteilles.	128
Figure 6.17	Exemple de champs remplis pour le bloc 20. On indique si l'eau est traitée ainsi que sa provenance (profondeur) si elle est connue. Les informations sur son apparence, son odeur et son goût sont notées. Le bloc inclut aussi une section pour les valeurs mesurées. On indique les différentes mesures faites par paramètre avec la valeur retenue.	128
Figure 6.18	Formulaire d'entrée de la base de données. Les chiffres de 1 à 5 montrent les boutons qui permettent de faire apparaître les 5 formulaires principaux.	129
Figure 6.19	Formulaire de LOCALISATION. Ce formulaire permet de visualiser les informations d'une station déjà saisie en la sélectionnant dans le navigateur. Pour créer une nouvelle station, il faut appuyer sur le bouton Créer Station qui ouvre un formulaire de saisie pour la station. Les onglets <i>Station</i> , <i>Propriétaire</i> , et <i>Intérêt</i> permettent de saisir les informations des blocs 1 et 3 de la fiche de terrain. Il faut toutefois que le nom du propriétaire ait déjà été entré dans la table des propriétaires, sinon on peut l'ajouter en pesant sur le bouton Ajouter un proprio.	130

Figure 6.20	Exemple de page Internet créée lors du projet MGWI pour la saisie de données de terrain. Cette page permet de saisir les données du bloc de localisation. Lorsqu'on appuie sur le bouton <i>Soumettre la requête</i> , les données sont entrées dans la base numérique.	131
Figure 7.1	Hydrogramme de puits indiquant l'altitude de la surface piézométrique en fonction du temps (modifié de Thiboutot <i>et al.</i> , 2001).	142
Figure 7.2	Hydrogramme de puits indiquant la recharge de la nappe aquifère observée au printemps.	142
Figure 7.3	Paramètres utilisés pour évaluer la vulnérabilité avec la méthode DRASTIC.	143
Figure 7.4	Exemple d'application de la méthode DRASTIC dans la région du sud-ouest du Québec. (tirée de Savard <i>et al.</i> , 2003).	143
Figure 7.5	Représentation schématique de la conception du modèle géologique 3D et de l'application de la méthode de vulnérabilité utilisant ce modèle et le temps de transport (Modifié de Ross <i>et al.</i> , 2002).	144
Figure 7.6	Représentation schématique d'un périmètre de protection à la surface du sol ainsi que sa projection à la surface de la nappe et à la base de l'aquifère.	145
Figure 7.7	Périmètre de protection éloigné évalué par la méthode de la cartographie hydrogéologique, hydrique, par l'équation de l'écoulement uniforme et par la modélisation numérique avec MODFLOW/MODPATH (tiré de Karanta, 2002).	145
Figure 7.8	Détermination d'un périmètre de protection par la méthode 3A2E (tiré de Paradis 2000).	146
Figure 7.9	Détermination des PDP par la modélisation numérique (tiré de Paradis, 2000).	146

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Résumés des paramètres essentiels à la cartographie systématique des aquifères en roches sédimentaires fracturées.	5
Tableau 1.2	Produits visés par la cartographie régionale des aquifères en roches fracturées.	6
Tableau 2.1	Types et sources des données géoscientifiques disponibles au Québec utiles pour la définition du cadre hydrostratigraphique (tableau modifié de Michaud <i>et al.</i> , [à paraître]).	32
Tableau 3.1	Synthèse de la procédure d'élaboration d'une carte piézométrique régionale.	52
Tableau 4.1	Comparaison des caractéristiques de certains essais hydrauliques.	79
Tableau 4.2	Calcul de l'écoulement souterrain par le calage de la conductivité hydraulique.	79
Tableau 4.3	Exemple de conductivité hydraulique pour la caractérisation régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec.	80
Tableau 4.4	Nombre de points de contrôle par unité hydrogéologique pour la caractérisation du système aquifère régional du sud-ouest du Québec.	80
Tableau 4.5	Paramètres de forage. Étude locale de Saint-Benoît, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.	81
Tableau 4.6	Localité et caractéristiques des points de contrôle utilisés pour la définition de la distribution spatiale de la conductivité hydraulique des roches fracturées.	81
Tableau 5.1	Problèmes fréquents de la qualité de l'eau souterraine.	102
Tableau 5.2	Critères de qualité d'eau pour les paramètres microbiologiques et dépassements mesurés pendant les campagnes d'échantillonnage des étés 1999-2000 à l'occasion du projet sur les aquifère fracturé du sud-ouest du Québec (tableau modifié de Savard <i>et al.</i> , 2002).	103
Tableau 5.3	Critères de qualité d'eau pour les paramètres physico-chimiques analysés en laboratoire, et dépassements obtenus pendant les campagnes d'échantillonnage du projet sur les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec (tableau tiré de Savard <i>et al.</i> , 2002).	104



Tableau 5.4	Critères de qualité de l'eau pour les paramètres physico-chimiques mesurés sur place et dépassements obtenus pendant les campagnes d'échantillonnage des étés 1999 et 2000 à l'occasion du projet sur les aquifères fracturé du sud-ouest du Québec (tableau tiré de Savard <i>et al.</i> , 2002).	106
Tableau 5.5	Principaux intérêts de l'analyse de la mesure ou du calcul de paramètres physico-chimiques.	107
Tableau 5.6	Sommaire sur l'application de la géochimie des isotopes stables et légers en hydrogéologie.	109
Tableau 5.7	Isotopes utiles à la datation et à l'étude de la dynamique des eaux souterraines.	110
Tableau 5.8	Types d'ouvrages de captage pouvant être utilisés pour une étude de caractérisation hydrogéologique.	111
Tableau 5.9	Statistiques physico-chimiques de différents types d'unités hydrogéologiques.	112
Tableau 5.10	Exemple de détermination d'un type d'eau.	114
Tableau 5.11	Représentation des types d'eau à l'aide de symboles et de couleurs.	114
Tableau 7.1	Vulnérabilité associée au temps de transport vertical de l'eau avant d'atteindre la nappe phréatique.	148
Tableau 7.2	Informations minimales nécessaires pour l'application de la méthode hybride (tableau tiré de Paradis, 2000).	148

1. GUIDE MÉTHODOLOGIQUE POUR LA CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE RÉGIONALE DES SYSTÈMES AQUIFÈRES EN ROCHES SÉDIMENTAIRES FRACTURÉES

Martine M. Savard, René Lefebvre, Richard Martel, Michel Ouellet et Normand Rousseau

1.1 Vers un inventaire québécois des ressources en eau souterraine

L'eau souterraine représente une ressource essentielle et stratégique dont la pérennité repose sur une gestion éclairée. La justesse et la pertinence des décisions de gestion relatives à l'utilisation de l'eau souterraine dépendent quant à elles de la *qualité* de l'information scientifique sur laquelle elles doivent s'appuyer. On peut définir la qualité de l'information scientifique en fonction de la validité et de la quantité de données disponibles. Cependant, ce type de connaissance ou d'information n'existe, à ce jour, que pour une portion limitée du territoire québécois (Lefebvre *et al.*, 1999). En effet, le Québec possède des ressources en eau souterraine considérables sans toutefois avoir délimité ses principaux aquifères, évalué leur qualité ou estimé l'impact d'une consommation accrue dans certains secteurs à forte demande.

Où se trouvent les plus abondantes réserves d'eau souterraine? Est-ce que le Québec possède des eaux souterraines de qualité? En quelle proportion l'eau souterraine se répartit-elle dans les aquifères sédimentaires de surface et dans les aquifères rocheux plus profonds? Comment les changements climatiques peuvent-ils affecter les réserves actuelles d'eau souterraine? Quelle est la recharge annuelle des aquifères? Comment doit on gérer l'accès à la ressource (conflits d'intérêts)? En cas de contamination majeure de l'eau de surface ou d'assèchement des zones d'approvisionnement, est-ce qu'une communauté peut pallier un manque d'eau potable en utilisant les eaux souterraines? Une connaissance solide du contexte hydrogéologique régional constitue clairement l'assise d'une stratégie nationale qui permettra d'aborder ces importantes questions socio-économiques.

La cartographie hydrogéologique peut répondre aux besoins de connaissances et mener à une vision régionale cohérente si elle est effectuée de façon systématique. Or, aucun cadre de référence n'a été proposé auparavant pour accomplir ce type de travail régional. Pour combler cette lacune, deux projets pilotes multidisciplinaires dans les secteurs du piémont laurentien et du sud-ouest du Québec (Basses-Laurentides) ont produit les protocoles de cartographie requis pour délimiter et caractériser les principaux types d'aquifères. Il s'agit du *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires de surface* du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (Michaud et Lefebvre, 2001) et du présent ouvrage. Ce dernier résulte du projet pilote sur la cartographie du système aquifère du sud-ouest du Québec qui a couvert le territoire de quatre municipalités régionales de comté sur plus de 1500 km² (Savard *et al.*, 2000). Il s'intéresse exclusivement à la caractérisation à l'échelle 1 : 100 000 des aquifères en roches sédimentaires fracturées.

Les deux guides méthodologiques d'utilité complémentaire proposent l'approche cartographique qui pourrait servir à inventorier les ressources en eau souterraine du Québec. Cette cartographie constitue sans contredit la première assise d'une gestion durable de l'eau souterraine.

1.2 Objectifs et utilités du guide méthodologique sur la caractérisation des aquifères rocheux fracturés

La méthodologie présentée vise à constituer un guide pratique pour la caractérisation systématique des aquifères fracturés du territoire québécois. L'expression *caractérisation systématique* signifie obtenir et structurer toutes les informations requises pour définir le contexte hydrogéologique d'un territoire à l'échelle régionale. Les utilisateurs du guide sont les hydrogéologues, les aménagistes et les professionnels travaillant à la caractérisation régionale des aquifères.



Les connaissances sur les eaux souterraines générées et compilées en suivant les étapes du présent protocole ne s'appliquent strictement qu'aux échelles régionale et nationale. Sur le plan régional, la connaissance du contexte hydrogéologique favorisera une planification conséquente de l'aménagement du territoire. Les planificateurs prendront donc en considération non seulement la vulnérabilité sur le plan de la qualité et de la quantité de la ressource, mais également son potentiel d'exploitation dans l'optique du développement régional. Une connaissance solide du contexte régional favorisera aussi une meilleure gestion durable, puisque les responsables des activités à risque pourront plus aisément et à moindre coût prendre en considération la protection de la ressource. À titre d'exemple, en vertu du *Règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole*, le concepteur d'un *Plan agro environnemental de fertilisation* doit attester, par sa signature, que les pratiques retenues minimisent, notamment, le risque de contamination de l'eau (art. 21). Avec une connaissance du contexte hydrogéologique régional, il lui sera plus facile d'assumer une telle responsabilité légale.

Bien que la caractérisation du contexte hydrogéologique, à l'échelle régionale, puisse faciliter la prise en compte de la ressource en eau souterraine, elle ne pourra répondre à toutes les questions touchant l'aménagement du territoire. La recherche en eau pour alimenter une collectivité, la détermination des aires de protection d'un lieu de captage d'eau souterraine pour la consommation humaine, l'implantation de nouvelles installations à risque, l'intervention sur un terrain contaminé sont autant de sujets qui nécessiteront la réalisation d'opérations géotechniques spécifiques et complémentaires puisque menées à une échelle locale par des firmes d'experts-conseils. Toutefois, cette réalisation s'appuiera sur les connaissances fournies par la caractérisation hydrogéologique régionale, ce qui permettra aux parties concernées de minimiser les coûts de réalisation des travaux spécifiques. Pour les instances qui auront à se prononcer sur des projets qui leur seront soumis, il sera plus aisé d'élargir leur vision d'ensemble et d'appréhender les conflits relatifs à l'usage de la ressource et du territoire ou leurs effets cumulés.

Enfin, un autre objectif poursuivi par ce guide méthodologique est de servir à la caractérisation systématique des aquifères en roches sédimentaires fracturées, de manière à générer des produits comparables d'une région à une autre et à contribuer à un inventaire d'envergure nationale.

1.3 Approche et produits de la cartographie hydrogéologique régionale

Une solide combinaison de la géologie et de la caractérisation hydrogéologique représente l'aspect central de l'approche préconisée pour la représentation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées. Cette approche implique une synthèse des connaissances géologiques des unités rocheuses et des sédiments quaternaires qui les recouvrent dans les secteurs à l'étude. Le cadre géologique et l'architecture stratigraphique qui en résultent doivent être adéquats pour permettre la prédiction de la distribution des propriétés hydrauliques de façon fiable (figure 1.1).

La compilation des données existantes constitue logiquement la première étape des travaux de cartographie hydrogéologique puisqu'elle permet de tirer profit des efforts antérieurs que l'on peut synthétiser sous la forme d'un modèle hydrostratigraphique conceptuel. C'est aussi à cette étape que l'on détermine les secteurs où l'information est manquante, ce qui oriente la séquence des travaux à effectuer pour produire une synthèse régionale (chapitre 2). Les levés de terrain s'adressant à la caractérisation des propriétés hydrauliques appartiennent aux étapes subséquentes qui doivent s'appuyer sur la synthèse géologique (figure 1.1).

Bien que l'information géologique sur laquelle ils reposent soit souvent disponible à plus petite échelle, les compilations et les levés hydrogéologiques peuvent se faire de façon optimale à l'échelle du 1 : 100 000 (Lefebvre *et al.*, 1999). En effet, cette échelle permet de produire l'information requise pour une région donnée en alliant des échanciers pratiques à des coûts réalistes. Comme il a été mentionné plus haut, les produits de la cartographie régionale serviront d'assise pour des travaux plus détaillés à l'échelle locale, dans des secteurs cibles.



L'ensemble des données essentielles à une synthèse hydrogéologique régionale comprend une série de paramètres géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques (tableau 1.1). Pour une région particulière à cartographier, des groupes de données comme les niveaux d'eau ou les conductivités hydrauliques existent, du moins partiellement. Le travail du spécialiste en hydrogéologie consiste à vérifier la validité de ces données, à les compiler et à planifier une campagne de terrain de manière à compléter la banque de données pour couvrir l'ensemble du territoire à caractériser. À ce stade, une grande partie de la difficulté réside dans l'atteinte d'un degré de fiabilité de l'information adéquat pour l'échelle régionale. En effet, la collecte de nouvelles données hydrauliques en nombre statistiquement élevé engendre des coûts non réalistes. Par contre, il faut rappeler que l'échelle d'investigation du 1 : 100 000 permet d'amener le niveau d'information requis à un minimum pratique et scientifiquement acceptable.

Le guide discute des procédures à suivre pour valider, compiler, générer, intégrer et interpréter les données essentielles à la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées. Le protocole de caractérisation systématique est présenté aux chapitres 2 à 5 inclusivement, alors que les chapitres 6 et 7 décrivent respectivement la procédure pour la saisie des données en une banque numérique et des concepts utiles à la gestion durable de la ressource en eau souterraine. Finalement, bien que la caractérisation hydrogéologique régionale mène, dans les faits, à la constitution d'une banque structurée d'un ensemble de données hydrogéologiques, tous les projets de caractérisation devront comprendre la livraison d'un jeu de cartes d'usage courant. La banque de données, les cartes et les autres compilations devront épouser les formes et les critères présentés dans le présent ouvrage (tableau 1.2) afin d'assurer une cohérence et une uniformité des connaissances sur l'ensemble des régions d'intérêt, et ainsi de favoriser la gestion durable des ressources en eau souterraine du Québec.

Figure 1.1
Schéma conceptuel de l'approche préconisée dans le présent guide méthodologique.

Les étapes de la caractérisation hydrogéologique régionale sont décrites dans le présent ouvrage (cadres et flèches en traits pleins). Les travaux qui ne sont possibles qu'après la cartographie systématique ne sont pas décrits ici (cadres et flèches en traits pointillés).

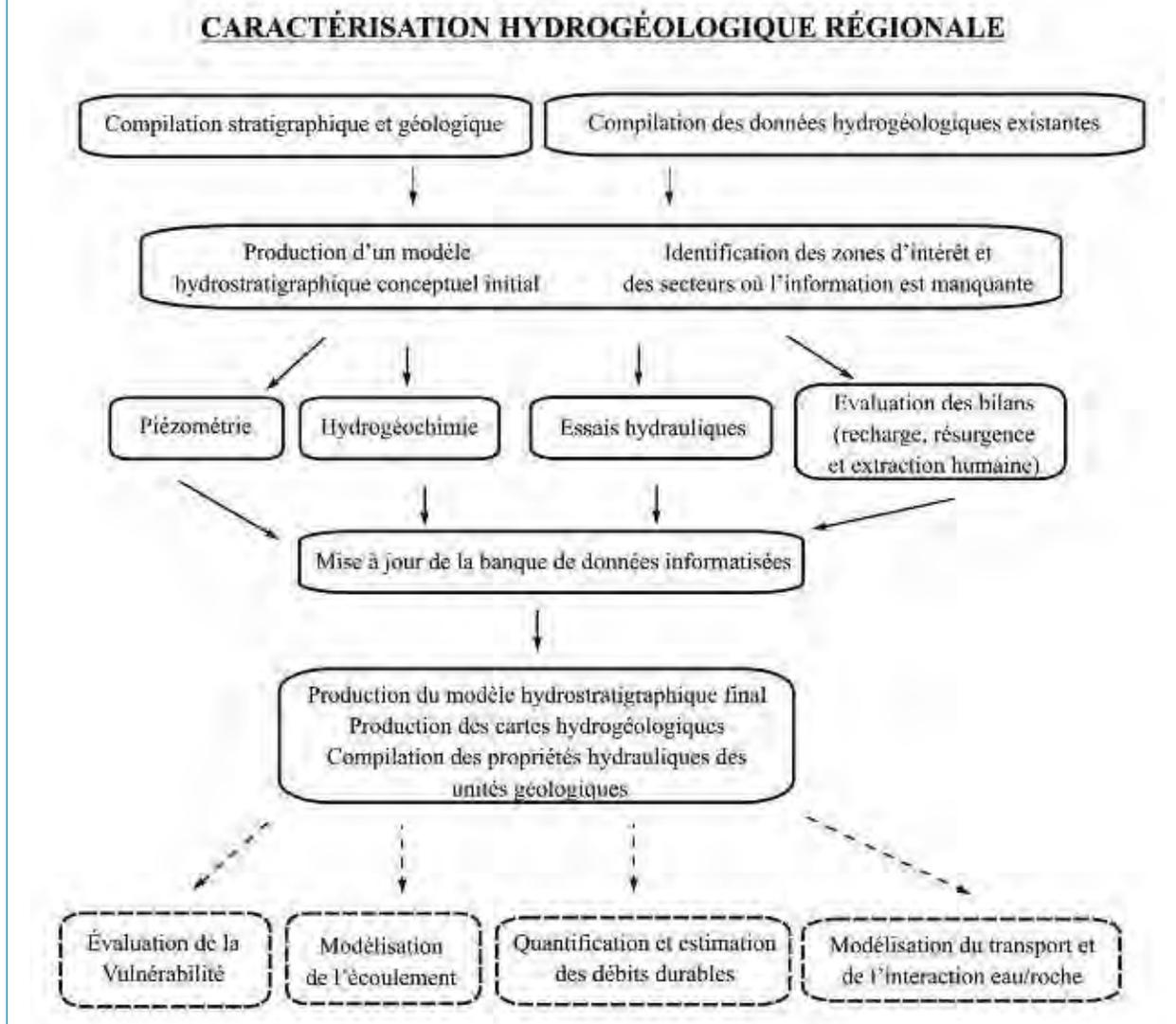


Tableau 1.1 Résumés des paramètres essentiels à la cartographie systématique des aquifères en roches sédimentaires fracturées.

PARAMÈTRES GÉOLOGIQUES	PARAMÈTRES HYDROGÉOLOGIQUES
Formations rocheuses	<i>Physiques</i>
Lithologie	Niveaux d'eau (profondeur de la nappe)
Nature de la porosité	Hydrogrammes de puits
Pourcentage de la porosité	Direction d'écoulement
Stratigraphie	Gradient hydraulique
Structuration régionale (plis, failles)	Liens hydrauliques entre les formations aquifères
Unités sédimentaires quaternaires	Volume d'eau souterraine
Lithologie	Limites des zones de recharge
Perméabilité	Limites des zones de résurgence
Stratigraphie	Évaluation de la recharge
Distribution régionale	Conductivité hydraulique des unités géologiques
	Transmissivité et emmagasinement
PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES	
Précipitations annuelles (mm)	<i>Anthropiques</i>
Rivières	Localisation des principales zones de captage
Localisation	Évaluation des quantités extraites
Débits	Débit des puits
Hydrogrammes	<i>Géochimiques</i>
Lien hydraulique à l'aquifère	Concentrations en ions majeurs et traces
Lacs	Concentration de la matière dissoute totale
Localisation	Qualité de l'eau
Lien hydraulique à l'aquifère	Distribution des types d'eau
Niveaux d'eau	

Tableau 1.2 Produits visés par la cartographie régionale des aquifères en roches fracturées.

CARTES :
Géologique des unités rocheuses
Géologique des sédiments quaternaires
De la profondeur des unités rocheuses
De l'épaisseur des sédiments
Du contexte hydrostratigraphique
Piézométrique
Hydrogéochimiques
De la conductivité hydraulique
COUPES :
Géologiques des unités rocheuses et sédiments meubles
Hydrostratigraphiques
Modèle(s) hydrogéologique(s) conceptuel(s)
Compilation des propriétés hydrauliques
Banque de données
Recommandations sur l'utilisation de l'eau et sa protection

2. ÉTABLISSEMENT DU CADRE HYDROSTRATIGRAPHIQUE

Daniel Paradis, Martine M. Savard, Donna Kirkwood, Richard Martel et René Lefebvre

La présence et la distribution des eaux souterraines ne sont pas l'effet du hasard, mais plutôt la conséquence de facteurs climatiques, hydrologiques, géologiques et topographiques. Ces facteurs interagissent pour créer un système d'écoulement dynamique et souvent complexe. La caractérisation de chacun de ces facteurs et la connaissance des relations qui les unissent sont la clef de la compréhension des systèmes aquifères. La cartographie hydrogéologique constitue l'outil de base qui mène à cette compréhension. Elle comprend toutes les activités et les techniques nécessaires pour recueillir, documenter, interpréter et présenter l'information hydrogéologique.

2.1 Introduction

L'une des premières tâches d'un projet de cartographie hydrogéologique régionale est de définir le cadre hydrostratigraphique de la région d'étude. Ce cadre peut être défini comme un modèle conceptuel du système d'écoulement. Sa fonction principale est de présenter la distribution et les relations entre les unités aquifères et les aquitards situés dans la région. La définition du cadre hydrostratigraphique est d'abord basée sur la cartographie géologique et la stratigraphie des formations quaternaires et rocheuses. Ensuite, elle s'appuie sur l'identification et l'intégration des propriétés hydrauliques des formations quaternaires et rocheuses pour déterminer le rôle des formations (aquifère ou aquitard) en ce qui concerne l'écoulement souterrain. Enfin, l'intégration des conditions d'écoulement (libre ou confiné), de la délimitation des zones de recharge et de résurgence ainsi que des directions générales d'écoulement complète la définition de ce cadre. Les conditions d'écoulement sont définies à l'aide de la piézométrie des unités aquifères ainsi que des relations entre les unités aquifères et les aquitards.

Le présent chapitre traite de l'établissement du cadre hydrostratigraphique à l'aide des cartes géologiques des unités rocheuses et des formations quaternaires déjà disponibles. Il faut souligner le caractère itératif de la définition du cadre hydrostratigraphique et de la formulation du modèle conceptuel d'écoulement. En début de projet, un cadre initial doit être établi sur la base de la compilation géologique et des données hydrogéologiques existantes. Le cadre, que l'on dit alors préliminaire, est défini en termes généraux. Cette étape reste tout de même essentielle pour guider les travaux de cartographie hydrogéologique subséquents qui conduiront à établir un cadre plus détaillé sur la base d'une meilleure connaissance de la distribution spatiale des unités, des propriétés hydrauliques des matériaux et de la piézométrie.

Les sections suivantes présentent donc la compilation de données géologiques et hydrogéologiques existantes (section 2.3), les travaux de terrain (section 2.4) et la présentation de l'information hydrostratigraphique (section 2.5). Des exemples de produits cartographiques issus du projet de caractérisation du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec serviront, tout au long du texte, à illustrer les différentes étapes de la démarche proposée.

2.2 Les aquifères rocheux – cadre général

La figure 2.1 illustre schématiquement les principales composantes des systèmes aquifères et donne un exemple de la définition générale du contexte hydrostratigraphique. Les deux grands types d'aquifères définis à l'aide des conditions piézométriques sont les nappes libres (aquifères non confinés) et les nappes captives (aquifères captifs). Le terme *nappe* désigne l'eau souterraine qui est en mouvement à l'intérieur d'un aquifère et non pas uniquement sa surface. Quant au terme *aquifère*, il inclut à la fois l'eau souterraine et le milieu solide qui la contient (Landry, 1997). Un aquifère peut recevoir différents qualificatifs relatifs à l'origine du matériel solide qui le constitue (Genetier, 1984).

Les nappes libres sont généralement présentes dans les formations aquifères situées près de la surface du sol et liées directement à elle. Elles sont caractérisées par la présence d'une surface libre où



la pression de l'eau est égale à la pression atmosphérique. Le terme *surface libre* ne doit pas être confondu avec les mots *nappe* ou *nappe phréatique*. L'altitude de la surface libre varie selon les saisons, à la suite des périodes de recharge lors du dégel sous notre climat ou lors de pluies importantes et prolongées à l'automne. Par exemple, dans le sud-ouest du Québec, la variation annuelle de la nappe est de 0,7 à 2,7 m dans les systèmes aquifères confinés et de 1,9 à 3,8 m dans les aquifères à nappes libres (en surface).

La recharge des nappes libres se fait principalement par infiltration à partir de la surface et sur toute l'étendue de la nappe. Les nappes captives se trouvent dans des unités aquifères complètement saturées en eau et confinées entre des unités peu perméables. L'eau s'y trouve à une pression toujours supérieure à la pression atmosphérique. Il en résulte qu'un puits pénétrant une nappe captive provoque la remontée de l'eau au-dessus de la limite supérieure de la formation aquifère; il s'agit de conditions artésiennes. La surface représentant l'élévation potentielle de la remontée du niveau d'eau au-dessus de la nappe captive se nomme *surface piézométrique*. La recharge des nappes captives se fait par infiltration verticale à travers les unités sus-jacentes et par écoulement latéral à partir des affleurements de la formation aquifère. La même formation géologique peut être en condition de nappe libre dans un secteur où elle est en contact avec la surface du sol et en condition de nappe captive plus loin de la zone affleurante; on parle alors de nappe semi-captive.

Une couche de confinement est une unité géologique qui ne laisse pas facilement circuler l'eau. Le terme *aquitard* est généralement utilisé pour désigner les couches de confinement ou semi-perméables, c'est-à-dire les unités de faible perméabilité. Ces dernières ne peuvent alimenter adéquatement un ouvrage de captage, mais elles contribuent de façon significative à l'écoulement régional par la lente et constante transmission d'eau souterraine qu'elles contiennent (Freeze et Cherry, 1979). Au Québec, les principales formations géologiques de type aquitard incluent des dépôts de till à matrice argileuse, des argiles (qui forment souvent le toit des aquifères) et des roches ignées et métamorphiques peu fracturées qui forment souvent les limites inférieures des systèmes d'écoulement.

Fondamentalement, il y a deux types de matériaux composant les aquifères : les sédiments moyens à grossiers non consolidés et les roches perméables. Dans un aquifère granulaire non consolidé, l'eau souterraine est emmagasinée et circule à travers les interstices laissés libres entre les grains. Quant aux aquifères rocheux, leur perméabilité provient de la combinaison de la porosité primaire, c'est-à-dire la porosité résiduelle après lithification, et de la porosité secondaire développée par fracturation ou par dissolution de minéraux (diagénétique) (figure 2.2). Les porosités primaires et secondaires peuvent entraîner une circulation de l'eau souterraine similaire à celles des aquifères granulaires, mais la circulation peut aussi être très différente, car l'orientation des fractures peut affecter le sens de l'écoulement de l'eau souterraine. À grande échelle, les aquifères rocheux très fracturés peuvent se comporter comme des aquifères granulaires non consolidés puisque qu'à cette échelle, les fractures sont assimilables aux interstices entre les grains d'un aquifère granulaire, les blocs de roche agissant comme les grains de sable.

Les aquifères fracturés montrent des fissures, joints ou failles, qui peuvent varier en ouverture et en extension latérale, allant de quelques millimètres à quelques centimètres d'ouverture et de l'échelle centimétrique à kilométrique pour l'extension latérale. La circulation de l'eau souterraine se fait principalement par les ouvertures créées par la fracturation tandis que la masse rocheuse agit comme un réservoir. Le rôle de la porosité de matrice dépend du type de roche. Une classification simplifiée des types d'aquifères est présentée à la figure 2.2.

2.3 Compilation des données géologiques et hydrogéologiques existantes

Par son caractère multidisciplinaire alliant plusieurs expertises de la géologie et de l'hydrogéologie, la cartographie hydrogéologique nécessite la collecte d'informations provenant de sources diverses. La compilation des données géologiques et hydrogéologiques existantes constitue la



première étape menant à l'élaboration préliminaire d'un modèle hydrostratigraphique conceptuel de la région d'étude et à l'évaluation des travaux de terrain nécessaires pour obtenir le niveau d'information requis pour la cartographie à l'échelle du 1 : 100 000 (voir la section 1.3).

2.3.1 Données requises et sources des données

Le tableau 2.1 résume les données disponibles au Québec et qui sont généralement requises pour la définition du cadre hydrostratigraphique. Cette information se présente souvent sous forme de cartes ou de rapports diffusés dans les divers ministères, municipalités ou firmes privées de consultants. Les données les plus importantes pour la définition du cadre hydrostratigraphique sont les suivantes :

- les cartes topographiques qui indiquent l'élévation du terrain, la localisation et l'élévation des résurgences (sources, lacs, étangs), et donc de la nappe libre lorsqu'elle affleure;
- les cartes géologiques des unités rocheuses et des formations quaternaires;
- les descriptions de forage (stratigraphie et niveau d'eau);
- les propriétés hydrauliques des matériaux.

Pour construire la carte géologique du secteur à l'étude, il est nécessaire de faire une carte de compilation qui intègre toutes les données géologiques des cartes préexistantes. Soulignons que les cartes géologiques couvrent très bien le territoire québécois habité et qu'elles sont presque toutes disponibles au service géologique du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) et à la Commission géologique du Canada. Ces cartes présentent les roches affleurant à la surface de la terre, qu'elles soient directement visibles sur le terrain ou cachées par la végétation ou les sols. De plus, elles contiennent tous les renseignements d'ordre géologique d'une région donnée :

- le type de roche ou de dépôt meuble illustré par des couleurs, des trames, des chiffres ou des lettres sur la carte;
- les données lithologiques (sites fossilifères, minéralisation, etc.) représentées par des notations ponctuelles;
- les données géométriques représentées par des signes conventionnels (orientation de la stratification, présence de failles, de fractures, etc.);
- les données stratigraphiques énumérées dans la légende qui accompagne la carte.

Les cartes géologiques permettent d'avoir une vue d'ensemble non seulement de la géologie en surface, mais aussi de l'évolution géologique d'une région donnée. Cette évolution peut inclure des périodes de dépôts des différentes unités lithologiques, d'érosion, de karstification, de plissement et de fracturation du socle rocheux, ainsi que des épisodes plus récents de sédimentation des dépôts quaternaires non consolidés. Puisqu'un aquifère régional peut se situer autant dans les formations rocheuses que dans les formations quaternaires, il est essentiel d'avoir une bonne connaissance de ces deux grands ensembles lithologiques. Par exemple, même si l'aquifère est localisé dans une formation rocheuse perméable, les formations quaternaires peuvent recouvrir et confiner l'aquifère rocheux, que l'on ne pourra définir qu'en connaissant toutes les caractéristiques géologiques des formations quaternaires.

Dans le but de travailler avec l'information la plus pertinente possible, il est conseillé d'obtenir, les rapports et les cartes géologiques les plus récents en format numérique. Pour les cartes préliminaires de compilation du socle rocheux, il est recommandé d'utiliser les échelles de 1 : 20 000^e et 1 : 50 000^e. Des cartes synthèses à l'échelle de 1 : 250 000^e permettant de mettre en contexte les cartes plus détaillées peuvent aussi être consultées. Pour ce qui est des cartes de formations quaternaires, elles sont le plus souvent à l'échelle du 1 : 50 000^e et quelques fois du 1 : 100 000^e.

Quant aux données stratigraphiques en profondeur, les puits et les forages miniers et pétroliers plus profonds sont une source inestimable d'information. Les séquences stratigraphiques décrites à



l'aide de forages apportent les informations complémentaires nécessaires à la compréhension de l'architecture des diverses couches géologiques en profondeur. La description de ces forages combinée à l'information provenant des cartes géologiques permet d'obtenir une image tridimensionnelle des systèmes aquifères. La majorité des descriptions de forages peu profonds disponibles proviennent du système d'information hydrogéologique (SIH) du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>). Les descriptions issues de cette base de données portent principalement sur des puits utilisés pour l'exploitation d'eau potable et apportent une aide précieuse pour l'identification des unités aquifères. D'autres descriptions de données de forages peuvent être obtenues auprès de différents ministères fédéraux et provinciaux, d'organismes parapublics (ex.: SOQUIP et Hydro-Québec) ou de firmes privées. Une banque de données des forages pétroliers effectués au Québec est aussi disponible au Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) et accessible sur Internet. Le MRNF garde aussi à sa cartothèque une partie des carottes de ces forages (voir le site <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca/gpg/classes/igpg>).

Bien que la détermination des propriétés hydrauliques soit traitée au chapitre 4, la compilation des données hydrauliques existantes est néanmoins nécessaire à ce stade afin de définir les unités aquifères et les aquitards. Seul l'ordre de grandeur des propriétés hydrauliques est ici nécessaire. La description générique des matériaux et les essais de productivité effectués lors de l'aménagement de puits d'eau potable peuvent suffire à cette tâche.

Des informations complémentaires peuvent être disponibles et être d'une grande utilité pour définir le cadre hydrostratigraphique :

- les cartes hydrographiques et des bassins versants, combinées à la géologie de surface, permettent d'estimer le lien hydraulique entre l'aquifère d'intérêt et les cours d'eau. Ce lien devra cependant être confirmé par une visite de terrain (chapitre 3);
- les levés géophysiques et géotechniques, combinés aux descriptions de forage, aident à définir la géométrie des unités aquifères;
- les photos aériennes ou les images obtenues par télédétection sont utiles pour identifier de grands linéaments qui peuvent correspondre au système de fracturation régional et prédire l'orientation des fractures locales dans une région où le socle rocheux est recouvert de minces dépôts quaternaires, et où la caractérisation des fractures par méthode directe est de ce fait impossible.

2.3.2 Gestion des données et codification des unités hydrostratigraphiques

Pour une caractérisation efficace du cadre hydrostratigraphique, il est important de bien gérer la multitude de données compilées puisque ces données sont présentées dans des formats différents et proviennent de sources variées. Pour faciliter la manipulation de toutes ces données, les différentes cartes recueillies ou produites devraient être introduites dans des systèmes d'information géographique (SIG) et les données de forages ou autres données ponctuelles, compilées dans une base de données relationnelles (voir le chapitre 6).

La codification des données est réalisée dans le but de faciliter leur intégration dans une base de données cohérente tout en permettant une standardisation des notes de terrain. Un système de classification est généralement adapté aux objectifs du travail. Par exemple, un système de classification pour la géologie est généralement basé sur l'origine des matériaux, tandis qu'un système de classification hydrogéologique sera basé sur les propriétés hydrauliques de ces mêmes matériaux. Les systèmes de classification géologique peuvent correspondre aux légendes fournies sur les cartes géologiques des dépôts quaternaires et du socle rocheux. Cependant, du point de vue de l'hydrogéologie, une classification des unités hydrogéologiques est nécessaire afin de définir les unités hydrostratigraphiques (Maxey, 1964; Seaber, 1998) ou des faciès hydrogéologiques (Anderson, 1989). Un faciès hydrogéologique représente essentiellement une ou des unités

géologiques ayant des propriétés hydrauliques similaires. Dans sa plus simple expression, la classification hydrogéologique peut se résumer par deux termes : *aquifère* et *aquitard* (voir le lexique). Cependant, en fonction de la continuité hydraulique et de l'arrangement géométrique des unités, le nombre et la complexité des unités hydrogéologiques peuvent varier selon le contexte.

2.3.3 Cartes préliminaires, modèle conceptuel et identification des travaux de terrain prioritaires

Avant de procéder à la construction des cartes et du modèle conceptuel (préliminaire ou final) du cadre hydrostratigraphique, les données existantes doivent être validées de façon à assurer la qualité des interprétations produites. À ce stade, la validation des données consiste principalement à vérifier la localisation et l'élévation des forages. Dans ce but, les cartes topographiques sont utilisées pour reporter les forages. Ainsi, il faut vérifier que les forages se trouvent à l'intérieur de la zone d'étude et que les élévations correspondent à celles des cartes topographiques. De plus, il faut s'assurer que la somme des épaisseurs des différentes unités géologiques données dans une description égale bien la profondeur totale du forage. On vérifiera aussi la stratigraphie tirée des descriptions de forages. Même si la connaissance du contexte géologique n'est peut être pas très avancée à ce stade, certaines séquences exotiques peuvent être écartées : par exemple, une séquence qui présenterait, de la base au sommet, sable, roche et argile ! Cependant, dans certains cas complexes, la validation des descriptions de forage peut constituer une tâche nécessitant l'expertise d'un spécialiste connaissant bien la région d'étude, sa stratigraphie et les unités lithologiques qu'elle comprend.

À l'aide de l'information existante compilée et validée, une première ébauche d'un modèle conceptuel de la région d'étude peut donc être amorcée. Le modèle conceptuel final, c'est-à-dire celui produit à la fin du processus itératif, devrait pouvoir répondre à plusieurs questions (voir le chapitre 1 – figure 1.1) :

- Quelle est la géométrie des unités aquifères et des aquitards ?
- De quel type est la porosité des unités aquifères ?
- De quel type de nappe s'agit-il ?
- Quel est le degré de confinement des unités aquifères ?
- Où sont les zones complexes (contacts, structures sédimentaires et tectoniques importantes, résurgences, pompages majeurs, problèmes liés à l'utilisation de l'eau) qui demandent une compréhension plus détaillée de l'eau souterraine ?

Pour répondre à ces questions, des coupes hydrostratigraphiques, des cartes isopaques, des cartes des contextes hydrogéologiques et des blocs schématiques tridimensionnels seront construits afin de favoriser une bonne compréhension du système aquifère. Ces outils cartographiques sont discutés à la section 2.5. La mise en carte de toute l'information disponible devrait permettre de valider l'information géologique existante et de faire ressortir les zones où il y a un manque de données. C'est à la suite de cet exercice cartographique que des travaux de terrain seront planifiés. Les différents travaux de terrain permettant de confirmer ou de compléter l'information existante sont examinés à la section 2.4.

2.4 Travaux de terrain

En plus des données déjà existantes, la définition du cadre hydrostratigraphique doit s'appuyer sur des campagnes de terrain pour permettre d'extraire l'information provenant des affleurements, des carrières, des levés géophysiques ainsi que des carottes de forages. Cette étape permet de vérifier et de compléter l'information existante. La nature des travaux de terrain peut être divisée en deux catégories, soit les travaux purement géologiques (cadre de la géologie régionale, stratigraphie et



structure) et les travaux d'ordre hydrogéologique (porosité et perméabilité des unités). La description de ces travaux est considérée respectivement aux sections 2.4.2 et 2.4.3. Les questions concernant les levés géophysiques sont abordées dans le Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires de surface élaboré par Michaud *et al.* (à paraître).

2.4.1 Visite d'affleurement, cartographie géologique et stratigraphie de la séquence rocheuse

En raison de l'histoire géologique du Québec, les dépôts quaternaires constituent un élément majeur du cadre hydrogéologique. Une visite des sites qui exposent les grandes formations quaternaires régionales s'impose. Pour obtenir plus de détails concernant cette section, le lecteur peut se référer au *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires de surface* mis au point par Michaud *et al.* (à paraître).

Même si la région d'intérêt a déjà été cartographiée pour sa géologie, il peut y avoir un manque en ce qui concerne l'information géologique pour construire la carte de compilation. Il est nécessaire de pallier un tel manque avant qu'une campagne de caractérisation hydrogéologique ne soit entreprise. Certains secteurs ont pu faire l'objet d'une cartographie à une échelle trop petite pour les besoins de la caractérisation hydrogéologique, et le géologue aura donc à la compléter par des visites d'affleurement afin de localiser plus précisément les contacts entre les différentes unités géologiques. De même, s'il y a eu des révisions et des mises à jour de la stratigraphie des unités lithologiques qui affleurent dans la région postérieurement à la publication des cartes géologiques les plus récentes, le géologue devra faire des visites de terrain pour mettre à jour la stratigraphie ainsi que la structuration locale. À ce moment, de nouveaux levés de coupes stratigraphiques seront nécessaires pour déterminer la nature des unités rocheuses, définir leur position stratigraphique et mieux comprendre la distribution spatiale des unités lithologiques dans la région à l'étude. Ces levés de coupes seront effectués préférentiellement dans les carrières ou les excavations de routes où il est possible de lever une coupe en continu. À défaut de carrières ou d'excavations de grande dimension, les coupes stratigraphiques peuvent être composites, c'est-à-dire construites au moyen d'une série d'affleurements ponctuels espacés les uns des autres.

Même si les informations géologiques existantes montrent à première vue toutes les qualités requises pour les besoins de la caractérisation hydrogéologique, une description plus détaillée des différentes lithologies est nécessaire dans le secteur à l'étude. Cette étape consiste en un examen visuel pour déterminer la nature et les caractéristiques des unités lithologiques et des grandes structures (plis, failles); par la suite, il s'agit d'assigner aux membres, aux formations et aux groupes stratigraphiques formels ces unités et ces structures, noter leurs coordonnées spatiales et faire des observations quant aux relations entre les lithologies. Des échantillons des différentes lithologies peuvent aussi être recueillis aux fins d'identification ultérieure.

Les structures primaires et la nature des contacts géologiques entre les différentes unités sont parmi les aspects les plus importants à reconnaître, à étudier et à décrire sur le terrain. Les structures primaires fournissent des renseignements valables quant aux conditions physiques qui prévalaient au moment de la formation des unités rocheuses. Elles permettront éventuellement de proposer une interprétation concernant la présence d'unités poreuses, le type de bassin sédimentaire, la dynamique au moment de la sédimentation et l'évolution géodynamique du bassin.

Parmi les structures primaires, l'épaisseur des strates, la granulométrie, la composition minérale, la lithologie et les contacts lithologiques peuvent influencer la qualité des aquifères. Il existe deux types de contacts géologiques, soit les contacts concordants qui reflètent la séquence normale de dépôt et l'ordre chronologique de mise en place ou d'empilement des corps géologiques sédimentaires ou volcaniques, et les contacts discordants, c'est à dire les discordances de socle, les discordances angulaires, les disconformités, les paraconformités, les contacts intrusifs et les contacts faillés. Le type de contact peut également influencer le cadre hydrostratigraphique d'une région. Un



contact discordant entre un intrusif et des roches sédimentaires produit généralement une zone altérée (skarn) où la roche sédimentaire a été altérée au point de perdre toute porosité primaire ou secondaire. Par exemple, dans le secteur du sud-ouest du Québec, des zones d'altération sont observées au contact entre les roches sédimentaires paléozoïques et les intrusions alcalines crétacées. De même, des dykes intrusifs de quelques mètres d'épaisseur ont été rencontrés ponctuellement sur tout l'ensemble du territoire. Ces dykes verticaux sont présents dans certaines carrières où l'on observe une zone d'altération de quelques centimètres, voire d'une dizaine de centimètres d'épaisseur dans les roches sédimentaires paléozoïques. En général, ces zones sont très peu poreuses. Au contraire, un contact discordant faillé et fracturé peut représenter une zone de plus grande perméabilité. À titre d'exemple, dans la carrière de Saint-Eustache, excavée à même le Groupe de Beekmantown, il existe une association spatiale entre les failles cassantes tardives et les dykes, de sorte que les zones altérées très peu poreuses côtoient des zones faillées plus intensément fracturées et donc beaucoup plus perméables. De même, les discordances de socle et angulaires marquent une période d'exposition subaérienne et d'érosion des roches pouvant représenter une surface plus poreuse et perméable, même lorsque recouverte subséquentement par des sédiments. Une telle surface pourra par la suite agir comme aquifère. Dans le sud-ouest du Québec, par exemple, les roches paléozoïques sont recouvertes en discordance par des tills, des argiles et des sables quaternaires. L'unité au contact entre les formations quaternaires et les roches comprend un mélange de sables et de graviers d'origine fluvio-glaciaire ainsi que des roches paléozoïques fracturées et altérées sur quelques mètres sous la discordance. Régionalement, cette surface de contact représente une zone très perméable correspondant effectivement à une unité aquifère (Savard et al., sous presse).

En plus des données lithologiques, il est nécessaire de recueillir les données géométriques et structurales. La description des éléments structuraux se fait à l'échelle de l'affleurement en notant les principaux caractères géométriques des corps géologiques tels que les stratifications, les plis, les failles ainsi que les fractures (joints, veines, etc.) qui y sont associées et leur orientation. À ce stade, le géologue devra indiquer les fractures et les failles locales qui n'apparaissent pas sur les cartes à l'échelle régionale, mais qui peuvent influencer grandement l'écoulement des eaux souterraines. De plus, les données structurales aideront à la construction d'un profil structural de la région permettant de visualiser la géologie dans la troisième dimension, soit celle qui est la plus difficilement accessible : la profondeur. La géométrie des failles et des plis régionaux sera caractérisée à l'aide de la carte géologique et du profil structural. Ces structures régionales et, surtout, les structures secondaires qui y sont associées peuvent influencer l'écoulement des eaux souterraines. Par exemple, la distribution spatiale ainsi que l'écoulement de l'eau souterraine dans un aquifère confiné à une unité géologique plissée, et donc fracturée, seront bien différents de ceux qui sont présents dans un aquifère confiné à une unité horizontale.

Le réseau de fracturation d'une région donnée est formé de différentes familles de joints qui s'entrecroisent. Le terme général *fracture* sera utilisé ici pour décrire toutes les ruptures discrètes qui affectent la masse rocheuse et où il y a perte de cohésion (Ramsay et Huber, 1987). Ce terme général englobe les failles, la schistosité, les joints et les veines. La caractérisation du réseau de fracturation passe par l'identification des structures majeures (sédimentaires ou tectoniques), le relevé détaillé de la géométrie des fractures et l'identification des familles dominantes et de leur orientation principale. Dans les régions les mieux exposées, la caractérisation du système de joints peut se faire également par l'analyse des images LANDSAT ou des photographies aériennes.

L'étude régionale de la fracturation doit tout d'abord déterminer des stations de mesure en choisissant les endroits où les affleurements sont bien exposés et représentatifs de la région d'intérêt. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées lors d'une campagne de terrain pour caractériser la fracturation d'un site ou d'une station donnée. Le choix de la méthode dépendra souvent du type et de la qualité des affleurements.



La méthode sélective consiste à observer les parois ou les affleurements, et à sélectionner et mesurer l'orientation de fractures représentatives des familles principales. Cette méthode est rapide et offre l'avantage d'amasser des données sur plusieurs sites en relativement peu de temps. La méthode sélective est malheureusement subjective et n'est efficace que pour des régions où le réseau de fracturation est assez simple.

La méthode quantitative consiste quant à elle, à mesurer le plus grand nombre possible de fractures, peu importe leur orientation ou leur dimension, à une même station. Étant donné la grande quantité de données obtenues à l'aide de cette méthode, il est possible de distinguer les principales familles de fractures. La méthode quantitative ne permet aucune analyse statistique de l'intensité ou de l'espacement des fractures.

Pour ce qui est de la méthode par inventaire, elle consiste à définir une aire d'une dimension donnée, un cercle de 10 m de rayon ou un carré de 10 m² par exemple, et à mesurer l'orientation et l'extension latérale de toutes les fractures exposées dans cette aire. Cette méthode permet de faire l'analyse statistique de l'orientation des fractures, de calculer leur extension latérale et la densité de fracturation à un site.

Enfin, la méthode par traverse consiste à définir une ligne de traverse sur l'affleurement ou la paroi verticale et à mesurer toutes les fractures qui croisent cette ligne. Même si cette méthode est plutôt coûteuse en temps, elle permet néanmoins une caractérisation quantitative des différentes familles de joints (l'espacement, la fréquence, la densité, l'extension latérale) et une analyse statistique plus complète du réseau de fracturation pour un secteur donné.

2.4.2 Description des forages

Le forage est l'instrument de base pour la définition du cadre hydrostratigraphique et, d'une façon plus large, pour la cartographie hydrogéologique en général. Il a deux principales fonctions : définir la séquence stratigraphique et permettre l'installation de puits d'observation. Ces puits peuvent avoir plusieurs utilités au cours d'un projet de cartographie hydrogéologique, soit la mesure des niveaux d'eau, la réalisation d'essais de perméabilité ou l'échantillonnage de l'eau souterraine. L'aménagement d'un puits d'observation pour l'une ou l'autre de ces tâches peut varier, bien qu'un même type d'aménagement convienne généralement pour toutes ces fonctions. Il faut donc connaître adéquatement les méthodes de forage ainsi que les techniques d'aménagement des puits (chapitres 3, 4 et 5).

Les forages effectués pour la définition de la séquence stratigraphique servent le plus souvent à caractériser l'extension de certaines formations aquifères ou à valider des levés géophysiques. La caractérisation de la fracturation dans un forage peut aussi être réalisée en portant attention aux venues d'eau en cours de forage. L'interconnexion entre les fractures dans un même puits ou d'un puits à l'autre est cependant plus difficile à définir et c'est à l'aide d'essais de perméabilité spécifiques que cette tâche peut être réalisée (chapitre 4). Les principaux types de forages peuvent être classés en trois catégories : les forages rotatifs, les forages exécutés au câble et ceux faits à l'aide de tarières.

L'échantillonnage des matériaux est réalisé pour faire une description et une évaluation de leurs propriétés physiques. Plusieurs types d'échantillonnage peuvent être réalisés et ceux-ci peuvent être divisés en deux groupes. D'abord, l'échantillonnage au moyen de déblais permet d'obtenir, à l'aide des matériaux géologiques broyés (déblais) et remontés à la surface à la suite de l'enfoncement de la tarière, du trépan ou du tricône, des informations de base sur la minéralogie, la granulométrie et la stratigraphie (CCME, 1999). Ensuite, l'échantillonnage par carottage permet de recueillir des échantillons relativement intacts. Ceux-ci sont récupérés au moyen d'une cuillère fendue ou de tubes à parois minces enfoncés dans les formations quaternaires. Bien que légèrement perturbées par le battage, les structures sédimentaires peuvent être visibles. Dans les formations rocheuses, les carottes sont obtenues par rotation lors des forages au diamant. Le type de formation et l'état de la fracturation peuvent être caractérisés sur ces échantillons.



Pour la cartographie des aquifères rocheux, la géophysique (principalement la géophysique sismique) est utilisée pour définir la géométrie des unités aquifères et des aquitards, et pour caractériser les propriétés hydrauliques dans les forages (chapitre 4). Une cartographie plus détaillée de la géologie des formations rocheuses sera nécessaire si les données quant aux caractéristiques hydrostratigraphiques (porosité et perméabilité) sont manquantes ou inexistantes. C'est aussi à cette étape que l'on évalue l'état de la surface rocheuse et que l'on repère les fractures et les venues d'eau présentes ou anciennes.

2.4.3 Porosité des unités rocheuses

Il existe plusieurs définitions de ce qu'est la porosité d'une roche. Les plus courantes spécifient qu'il s'agit du pourcentage volumique de la roche constitué d'espace vide (Blatt, 1982; Friedman *et al.*, 1992). Il y a deux groupes de porosité pour les roches sédimentaires : la porosité primaire et la porosité secondaire. Pour les besoins de l'hydrogéologie régionale, le scientifique doit d'abord caractériser de façon systématique la porosité/perméabilité des unités lithostratigraphiques et établir si les unités rencontrées montrent une porosité efficace, puis catégoriser cette dernière d'après la simple classification présentée à la figure 2.2.

En ce qui a trait à la porosité primaire, elle comprend tous les pores développés lors de la formation d'une roche dans son milieu de dépôt, tels que l'espace intergranulaire laissé libre entre les particules sédimentées et l'espace intraparticulaire, soit par exemple le vide à l'intérieur des coquilles fossiles. Pour les détails concernant la classification des types de pores et la discussion touchant la nature de la porosité, le lecteur peut consulter les études de Choquette et Pray (1970) et de Friedman *et al.* (1992).

Les formations argileuses agissent généralement comme aquitard. Pour les autres types lithologiques sédimentaires, la description de la porosité demeure primordiale en hydrostratigraphie puisqu'elle permet à la première évaluation de reconnaître les unités qui favorisent l'écoulement de l'eau souterraine. Classifier la porosité permet entre autres d'établir les facteurs contrôlant la distribution des pores interconnectés. Pour les roches détritiques à grains plus grossiers ainsi que pour les carbonates, seuls les pores interconnectés contribuent à la perméabilité (porosité effective).

La présence de porosité primaire n'entraîne pas toujours une bonne perméabilité; il s'agit alors d'une porosité non effective. Toutefois, ce type de porosité contribue souvent de façon importante à l'emmagasinement. Mentionnons aussi qu'il existe des formations rocheuses qui montrent à la fois une porosité primaire effective de type matricielle (ou intergranulaire) et une porosité de fracture (de nature secondaire). C'est le cas par exemple des aquifères gréseux des Îles-de-la-Madeleine (figure 2.2).

Quant à la porosité secondaire, elle apparaît après le dépôt des roches et correspond aux vides créés par des processus secondaires tels que l'érosion et la dissolution, par des fluides agressifs mis en circulation dans la roche pendant la diagenèse, soit le métamorphisme ou le tectonisme, et par la fracturation mécanique des roches induite par des contraintes hydrauliques ou tectoniques. Une porosité de fracture (porosité de type secondaire) peut amener une bonne perméabilité. Les aquifères rocheux les plus répandus dans le sud du Québec présentent le plus souvent une porosité de fracture comme celle qui est rencontrée dans les groupes ordoviciens et cambriens des Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec (Savard *et al.*, 2002).

La porosité de fracture peut être constituée de tout plan de rupture discret qui affecte la masse rocheuse et où il y a perte de cohésion, soit les plans de fracture, les veines, les plans de faille ainsi que les plans de litage diagénétique. Ces plans de litage de nature secondaire se situent au contact entre deux strates sédimentaires où une dissolution par pression a eu lieu au moment de la diagenèse d'enfouissement. Ils sont mis en évidence par une quantité importante de minéraux insolubles et de matière organique. Puisque ces plans de litage sont irréguliers et très rugueux, ils



offrent un plan d'écoulement beaucoup plus vaste que les fractures en général et sont très importants dans la compréhension de l'écoulement en milieu fracturé.

La caractérisation de la fracturation à petite échelle peut être essentielle à la compréhension de la dynamique de l'écoulement (section 2.4.2). Par exemple, lors d'un essai de pompage, l'anisotropie des rabattements causée par le pompage est souvent corrélée avec les directions des principales familles de fractures. Il faut se rappeler que les fractures identifiées ne participent pas nécessairement toutes à l'écoulement (Lemieux, 2002). C'est la caractérisation des propriétés hydrauliques qui permettra de tirer cette conclusion.

Bien qu'il ne soit pas nécessaire de quantifier la connectivité des joints, une appréciation de celle-ci doit tout de même être faite afin de comprendre l'influence des joints sur la conductivité hydraulique des unités rocheuses. Par exemple, il peut être noté que les principales familles de fractures recourent la surface des strates sédimentaires (joints de litage), car cette interconnexion peut augmenter considérablement la conductivité hydraulique de la roche.

Quantitativement, on doit décrire l'espacement entre les fractures d'une même famille (l'ensemble de fractures générées par le même mécanisme, sédimentaire ou tectonique), l'intensité ou la densité de fracturation (nombre de fractures par unité de surface) et la fréquence d'une famille de fractures (nombre de fractures par distance linéaire). Sur le terrain, il faut décrire ou mesurer différents paramètres pour chaque famille de fractures dont le degré d'ouverture des fractures, l'orientation (direction/pendage), l'extension latérale, la terminaison et le type de roche qui la contient.

Lorsqu'on travaille par exemple sur des affleurements horizontaux ou sur des faces verticales dans une carrière, il est important de s'assurer de relever les fractures sur différentes surfaces de référence, car l'orientation de celles-ci influencera grandement la qualité des levés (figure 2.3). L'espacement entre les fractures sera également erroné si la traverse se situe sur une paroi oblique par rapport à la direction des fractures (figure 2.3). Dans une région donnée, la fréquence réelle de distribution d'une famille de fractures sera obtenue en relevant les fractures sur une face perpendiculaire à la direction des fractures (figure 2.3). Lorsque les levés s'effectuent sur des parois orientées obliquement par rapport à la direction des fractures, il sera nécessaire d'apporter une correction (Terzaghi, 1965, figure 2.4) sur le nombre de fractures mesurées en fonction de l'orientation de la traverse pour obtenir un diagramme représentatif de la fréquence des fractures (figure 2.4).

Le traitement des données de fracturation permet de regrouper les fractures en familles ayant des caractéristiques semblables. Un regroupement en fonction de l'orientation est le plus couramment utilisé pour les études d'aquifères fracturés, car cette méthode permet d'étudier plus facilement l'espacement entre les fractures. Il s'agit donc de discriminer les différentes familles de fractures en fonction de leur orientation sur un histogramme ou un histogramme circulaire, en utilisant la fréquence corrigée par la méthode de Terzaghi. Les histogrammes circulaires peuvent ensuite être présentés sur une carte géologique de la région, afin de discriminer rapidement les différentes directions prépondérantes des familles de fractures pour un secteur donné. L'espacement entre les fractures est une autre caractéristique importante à mettre en relation pour mieux comprendre l'écoulement des eaux souterraines dans un aquifère fracturé. Plus les fractures sont nombreuses, plus il y aura des fractures qui pourront contribuer à l'écoulement. Une quantité importante de fractures permet également une meilleure connectivité du réseau fracturé. Ici encore il s'agit de présenter les données de l'espacement réel des fractures, après correction, sur un histogramme, tout en prenant soin de construire un histogramme par famille de fractures d'orientation différente (figure 2.5).

2.4.4 Cartographie des formations quaternaires

La présente discussion est tirée du *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires de surface* écrit par Michaud *et al.* (à paraître). Le lecteur dési-



rant plus d'information est invité à le consulter. Les formations superficielles recouvrent le socle rocheux de façon discontinue. Elles peuvent être d'épaisseurs variables et présenter des caractéristiques hydrogéologiques variables aussi bien d'une unité à l'autre que d'un faciès sédimentaire à l'autre, à l'intérieur d'une même unité. Même si l'aquifère d'intérêt se trouve dans les formations rocheuses, il est essentiel de bien situer le rôle des formations quaternaires pour la bonne compréhension de la dynamique de l'eau souterraine du système aquifère.

Généralement, les cartes des formations quaternaires contiennent des informations sur leur distribution et leur géomorphologie, sur le type de matériau en surface (premier mètre supérieur) ainsi que sur l'histoire Quaternaire de la région. La légende est souvent bâtie en fonction de la succession des environnements de sédimentation et elle donne généralement des indications concernant la genèse, la granulométrie et l'épaisseur des formations superficielles. Ceci permet d'avoir une idée de leur extension, de leur porosité et de leur hétérogénéité. Les informations citées, même si elles sont d'ordre général, aident aussi à évaluer le rôle des formations du point de vue de l'hydrogéologie

La cartographie des formations superficielles s'appuie sur des levés de terrain ainsi que sur l'interprétation des photos aériennes. Ce processus peut être divisé en quatre étapes :

- l'évaluation des besoins incluant la délimitation de la région à couvrir, l'évaluation des cartes existantes, la détermination de l'échelle de travail et l'acquisition des cartes topographiques et des photos aériennes;
- la cartographie préliminaire incluant l'élaboration d'une légende pour le secteur et l'interprétation préliminaire des photographies aériennes;
- la cartographie finale incluant les levés de terrain, la photo-interprétation finale et la validation auprès d'un spécialiste;
- l'édition et la production d'une carte incluant la numérisation et la mise en carte des informations cartographiques.

2.4.5 Validation des données géologiques

La validation des données géologiques est une étape cruciale parce qu'elle assure l'intégrité des interprétations subséquentes. Quelques vérifications simples peuvent être effectuées pour s'assurer de la cohésion des descriptions (section 3.3.3) :

- localiser les forages en fonction des numéros de carte SNRC de la région, du bassin versant, du comté, de la municipalité ou du code postal;
- estimer la somme des épaisseurs en fonction de la profondeur du puits.

Pour ce qui est de la vérification des données stratigraphiques, cette tâche peut être beaucoup plus complexe et fastidieuse. De façon générale, les codes utilisés dans les journaux de forage servent à décrire la nature des déblais de forage. Ces codes sont souvent très généraux (ex. : dépôt, terre, roc), ce qui rend l'interprétation très difficile. L'aide d'un spécialiste connaissant bien la géologie ou la région d'étude sera souvent nécessaire pour réinterpréter les codes. Des sondages stratigraphiques bien déterminés peuvent aussi être d'une grande utilité pour cette tâche.

2.5 Présentation de l'information hydrostratigraphique

Cette section vise à présenter divers outils cartographiques nécessaires pour préciser la géométrie des diverses unités hydrogéologiques et pour présenter une synthèse schématique de l'hydrostratigraphie régionale. Le très grand nombre de données généralement disponibles dans les régions habitées du Québec rend le traitement manuel difficile. C'est pourquoi l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG), de logiciels de construction de coupes hydrostratigraphiques et de l'interpolation des données est fortement recommandée.

2.5.1 Coupes hydrostratigraphiques

La construction de coupes hydrostratigraphiques a pour but d'établir la stratigraphie des unités géologiques afin de connaître l'architecture des aquifères et les relations entre les unités. La réalisation des coupes hydrostratigraphiques permet d'intégrer et de mettre en valeur l'ensemble de l'information recueillie lors de la compilation des données de forages et lors des levés de terrain. Ces informations regroupent les levés de coupes stratigraphiques, les données de forages de diverses sources et les levés géophysiques. L'élaboration des coupes hydrostratigraphiques permet ainsi de valider l'information disponible et, pour ce faire, des levés de terrain fiables doivent servir de référence. La démarche générale pour la construction de ces coupes consiste à :

- intégrer les différents contacts géologiques et hydrogéologiques dans une base de données et un système d'information géographique (SIG). L'information contenue dans la base de données pourra ensuite être traitée à l'aide d'un logiciel de construction de coupes stratigraphiques (ex. : BoreHole Mapper, de Northwood Geoscience, 1997; Discover, de Encom, 2001; Downhole Explorer, de Earthworks, 2003);
- tracer et orienter les coupes stratigraphiques là où il existe une bonne densité de points de contrôle. On peut imaginer que sur un territoire de quatre feuillets cartographiques à l'échelle 1 : 50 000, quatre coupes nord-sud et quatre coupes est-ouest soient nécessaires pour illustrer l'ensemble des contextes hydrostratigraphiques;
- définir un rayon de recherche à l'aide de chacune des coupes. Par exemple, si les coupes sont effectuées tous les 10 km, le rayon de recherche sera égal ou inférieur à 5 km de part et d'autre de la coupe;
- projeter l'information des points de contrôle sur la coupe;
- relier les différentes unités entre elles.

Même si la construction des coupes hydrostratigraphiques à l'aide de l'ordinateur est facilitée et presque automatisée, les coupes doivent tout de même être révisées pour assurer la qualité du produit. Cet exercice pourra nécessiter une certaine forme d'interprétation, surtout lorsque le contexte apparaît complexe ou que l'information est éparse. Meilleure est la compréhension du contexte, meilleure sera la conception de la qualité de l'information. En raison de certaines limites opérationnelles des logiciels de construction des coupes hydrostratigraphiques, surtout lorsque les unités sont discontinues, les coupes produites à l'aide de l'ordinateur doivent donc être modifiées souvent (exemple à la figure 2.6). Des coupes géologiques du socle rocheux sont d'abord produites à l'aide d'un logiciel et par la suite modifiées à la main. Les coupes hydrostratigraphiques des formations quaternaires et du socle rocheux sont généralement réalisées de façon indépendante et à des échelles différentes parce que la puissance de ces unités diffère grandement. En fait, l'épaisseur totale des formations quaternaires dépasse rarement plus de 100 m, tandis qu'une seule unité paléozoïque peut faire plus de 1000 m. Les coupes sont généralement présentées avec une exagération verticale afin de mieux visualiser les changements d'épaisseur des unités. Dans le cas particulier du système aquifère du sud-ouest du Québec, les coupes des formations quaternaires sont présentées avec une exagération verticale de 1 : 20 tandis que les coupes du socle rocheux sont, pour la même échelle horizontale, présentées avec une exagération verticale de 1 : 5 (Savard *et al*, sous presse).

2.5.2 Cartes des aquifères et des aquitards

Les cartes isopaques permettent de représenter les variations spatiales d'épaisseur d'une unité hydrostratigraphique. Ces cartes peuvent être utiles particulièrement pour représenter les unités quaternaires pour lesquelles l'information requise existe souvent profusément. À titre d'exemple, dans le sud-ouest du Québec, l'unité aquifère se trouve au contact des formations quaternaires et du socle rocheux. Cette unité est de composition lithologique mixte puisqu'elle inclut à la fois des sables et des graviers d'origine fluvio-glaciaire, et des roches altérées sur les premiers cinq mètres des Groupes de Potsdam, de Beekmantown et de Chazy (grès, dolomies, calcaires). Il n'existe pas

de différence significative de conductivité hydraulique entre les différentes unités rocheuses. À vrai dire, dans ce cas précis, l'état d'altération des premiers mètres des unités gréseuses, dolomitiques et calcaires semble exercer un contrôle prépondérant sur les propriétés hydrauliques. Ainsi, même si la distribution des sables et des graviers est discontinue sur le territoire, l'unité aquifère se trouve sur l'ensemble de la région d'étude puisqu'elle est avant tout composée d'unités Paléozoïques altérées sur une épaisseur moyenne de cinq mètres. Pour représenter la géométrie de l'aquifère, une carte de l'élévation de la surface du socle rocheux doit être produite (figure 2.7).

Démarche générale pour réaliser une carte isopaque

- Sélection et validation des points de contrôle de la variable d'intérêt (ex. : élévation du roc, niveau piézométrique)
- Spécification de l'épaisseur totale de l'unité lithologique d'intérêt (unité de confinement ou roches aquifères)
- Uniformisation et intégration des données dans un logiciel d'interpolation
- Choix de la méthode d'interpolation et interpolation

Les cartes d'épaisseur de sédiments permettent d'identifier les secteurs où il y a peu d'accumulation de formations quaternaires. Ces secteurs constituent souvent des zones préférentielles de recharge pour les aquifères sous-jacents. Les données nécessaires pour produire une carte d'épaisseur de sédiments proviennent de plusieurs sources, mais les données de forages validées apportent particulièrement une information précieuse pour cet exercice. Les données relatives aux levés de terrain stratigraphiques et géophysiques pour les formations quaternaires sont aussi importantes. Dans les régions où il existe un bon nombre d'affleurements rocheux, la méthode d'interpolation P_ROC (Boisvert et Fagnan, 1999) peut être avantageusement utilisée. L'épaisseur minimale peut aussi être considérée, notamment s'il s'agit des seules données disponibles dans un secteur d'intérêt.

Les variations de l'épaisseur des unités aquifères et des aquitards doivent être connues pour estimer le potentiel aquifère d'une région et le degré de confinement des aquifères (figure 2.8). Dans les formations rocheuses des Basses-Terres du Saint-Laurent, les unités productives sont peu profondes et se situent dans la partie supérieure de la séquence stratigraphique où l'altération des formations est plus importante. Dans d'autres contextes, il est aussi possible de rencontrer des unités rocheuses productives à des profondeurs importantes et confinées entre des aquitards. Mais ces unités ne sont pas fréquemment exploitées au Québec puisqu'il est généralement facile de trouver de l'eau potable à de faibles profondeurs et à de moindres coûts.

De façon générale, l'utilisation de méthodes courantes d'interpolation mène à des résultats satisfaisants dans la mesure où les données sont nombreuses et bien distribuées. En pratique, les données sont nombreuses, mais leur distribution n'est pas uniforme. Le plus souvent, les données sont distribuées le long du réseau routier en fonction des utilisateurs d'eau et selon certains secteurs d'intérêt local, par exemple des sites d'enfouissement sanitaire. Distribuées d'une telle manière, les données ne reflètent pas nécessairement toute la réalité hydrogéologique, et des travaux de terrain sont alors nécessaires pour compléter l'information.

De plus, lorsque des algorithmes d'interpolation simple procédant par triangulation ou par la méthode de l'inverse de la distance sont utilisés, l'hétérogénéité de la distribution ou le regroupement des points de contrôle peut occasionner d'importants biais. Ainsi, les données doivent être dégroupées afin de présenter une distribution plus uniforme (Srivastava, 1989). L'interpolation au moyen de modèles géostatistiques comme le krigeage ne présente pas ce type d'inconvénients, mais son utilisation nécessite un minimum de compréhension des modèles.



Les résultats de l'interpolation sont habituellement présentés sous forme de carte isoligne sur laquelle sont superposés les points de contrôle. La présentation des points de contrôle est essentielle puisqu'elle permet d'apprécier la distribution des données et de mieux juger du niveau de confiance à accorder à l'interpolation. Le choix de l'intervalle des contours doit refléter la densité et la distribution des données sur le territoire ainsi que le contexte régional dans lequel elles sont utilisées. Des intervalles rapprochés donneront une fausse impression de précision, alors que des intervalles trop éloignés n'indiqueront pas certains détails. En règle générale, de 15 à 20 classes d'intervalles sont suffisantes pour représenter l'étendue des valeurs de la variable d'intérêt.

2.5.3 Carte des contextes hydrogéologiques

Un contexte hydrogéologique donné représente un secteur dont les caractéristiques hydrogéologiques sont homogènes et distinctes de celles des secteurs adjacents. Des secteurs identiques mais loin l'un de l'autre peuvent présenter des conditions d'écoulement semblables. Les contextes hydrogéologiques mis en carte présentent un résumé des principaux facteurs qui influencent l'écoulement de l'eau souterraine dans une région donnée. Les principales connaissances servant à délimiter les unités hydrogéologiques sont les suivantes :

- les cartes des formations quaternaires et rocheuses, la carte piézométrique (chapitre 3) où sont indiquées les lignes de partage des eaux souterraines;
- les surfaces de suintement et les conditions artésiennes;
- les unités aquifères et les aquitards avec leur épaisseur, leur distribution et leurs propriétés hydrauliques (chapitre 4);
- la carte d'épaisseur des aquitards;
- les cartes topographiques;
- les cartes hydrographiques.

Les coupes stratigraphiques complètent l'ensemble des informations en fournissant une vue verticale. La délimitation des contextes hydrogéologiques est réalisée en superposant toutes ces informations sur une carte unique à l'aide de laquelle les zones hydrogéologiques similaires sont définies.

Dans le cadre du projet décrivant le système aquifère du sud-ouest du Québec, les cartes des contextes hydrogéologiques produites sont la carte des conditions de la nappe (figure 2.9) et la carte des principales zones de recharge (figure 2.10). La carte des conditions aquifères est issue de la superposition de la géologie du quaternaire (carte et coupes) et de la carte d'épaisseur des sédiments, tandis que la carte des principales zones de recharge a été obtenue en combinant la carte des conditions aquifères et la carte piézométrique. Pour faire la synthèse des différents contextes hydrostratigraphiques présents dans le sud-ouest du Québec, des blocs-diagrammes tridimensionnels ont été conçus. Le modèle conceptuel préliminaire intègre les connaissances existantes avant les travaux de terrain en début de projet (figure 2.11a), alors que le modèle conceptuel final résulte d'une itération sur le concept décrivant l'aquifère régional après l'acquisition et l'analyse des données issues des campagnes de terrain (figure 2.11b).

2.6 Recommandations et produits attendus

Au terme de la synthèse géologique et hydrostratigraphique élaborée dans ce chapitre, nous recommandons au moins deux itérations pour la préparation du cadre hydrostratigraphique et du modèle conceptuel du système aquifère régional. Une première ébauche des différents contextes hydrogéologiques présents dans la région d'étude devrait être réalisée sur la base des données cartographiques, des descriptions de forages et des rapports hydrogéologiques existants. La compila-

tion et la mise en forme de l'information dans un modèle conceptuel préliminaire devraient permettre de déterminer l'information manquante et les travaux de terrain prioritaires. Les travaux de terrain permettront par la suite de compléter l'information manquante et de raffiner le modèle conceptuel. Si des incompréhensions majeures persistent après cette deuxième itération du modèle conceptuel, d'autres travaux peuvent être menés, et une troisième itération sera alors complétée.

Produits requis pour élaborer une synthèse adéquate du cadre hydrostratigraphique

- Cartes géologiques du quaternaire et du socle rocheux mises à jour et montrant les points de contrôle (sections 2.3 et 2.4)
- Description des types de porosité des unités aquifères (section 2.4.4)
- Coupes hydrostratigraphiques (section 2.5.1)
- Cartes isopaques des unités aquifères et des aquitards (section 2.5.2)
- Cartes des contextes hydrogéologiques montrant les zones de recharge et les types d'aquifères (section 2.5.3)
- Blocs schématiques tridimensionnels montrant le modèle conceptuel (section 2.5.3)
- Carte piézométrique (chapitre 3)
- Propriétés hydrauliques des unités aquifères et des aquitards (chapitre 4)

Les cartes produites devraient être à l'échelle 1 : 100 000 et le niveau de connaissance à acquérir devrait être suffisant pour permettre l'élaboration d'un modèle numérique. Les unités aquifères et les aquitards doivent par conséquent être bien définis de même que leurs propriétés hydrauliques, les limites d'écoulement de l'eau souterraine et les limites physiques de l'aquifère.

Figure 2.1 Écoulement de l'eau souterraine dans un système aquifère comprenant une nappe libre, une nappe perchée et une nappe confinée.

Si le système aquifère cartographié comprend plusieurs aquifères d'intérêt (ex. : un aquifère à nappe libre et un aquifère confiné), les paramètres hydrogéologiques doivent être déterminés et présentés séparément (modifiée d'après Castany et Margat, 1977).

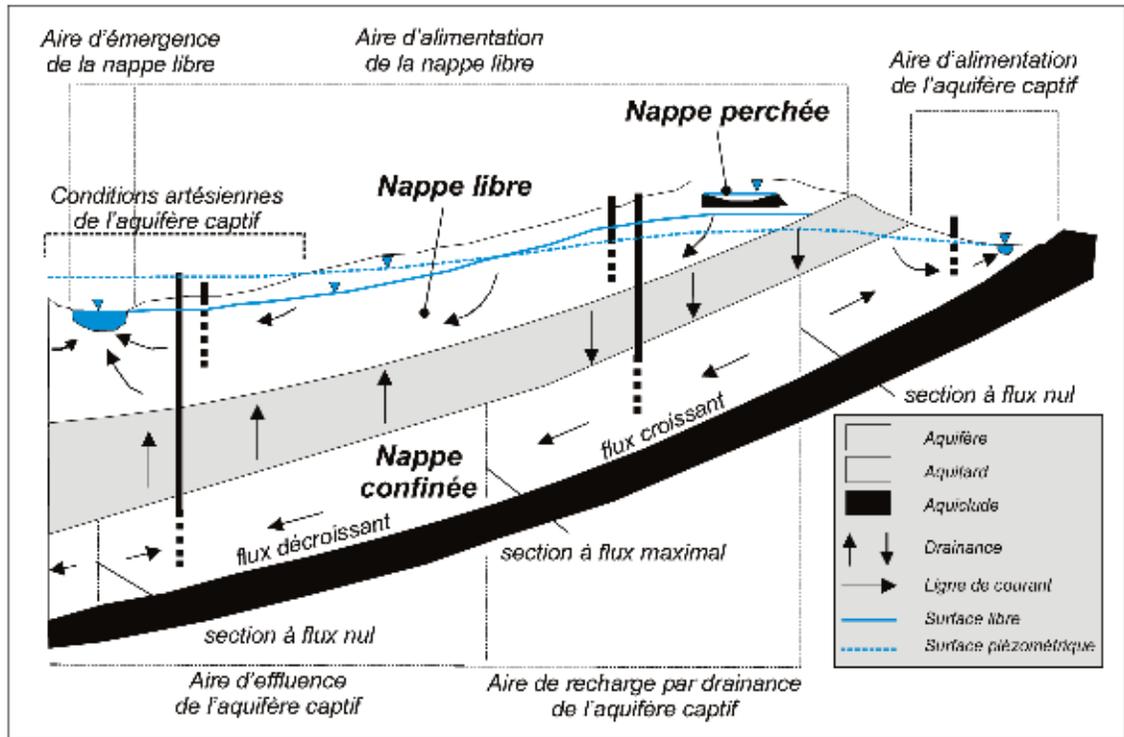


Figure 2.2 Classification hydrogéologique des aquifères présents dans les formations rocheuses (modifiée d'après Streltsova, 1976; Sharp, 1993).

Les aquifères *purement fracturés* sont des milieux dans lesquels l'eau est emmagasinée dans les fractures et non dans la matrice de la roche (ex. : granite, roches cristallines). Dans les aquifères *fracturés*, la porosité de la matrice est faible, mais l'emmagasinement est plus élevé que dans les fractures (ex. : basalte). Les systèmes à *double porosité* ont une porosité de matrice très élevée et l'écoulement se produit aussi bien par la matrice que par les fractures (ex. : dolomies, calcaires). Finalement, dans certains contextes, il est possible de trouver des formations rocheuses sans fractures, mais avec une porosité de matrice élevée (ex. : grès des Îles-de-la-Madeleine). Rappelons que K_f est la conductivité hydraulique des fractures, K_m la conductivité hydraulique de la matrice, S_f l'emmagasinement des fractures et S_m l'emmagasinement de la matrice.

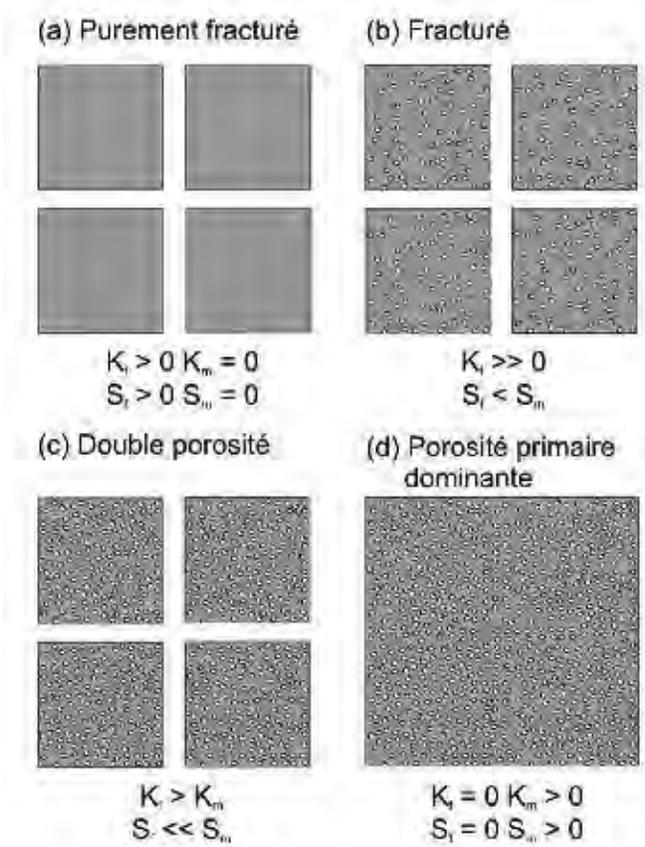


Figure 2.3 Effet de l'orientation des surfaces sur la fréquence des joints exposés.

La quantité de fractures mesurées pour la famille P sur la face X de la figure 2.3 ne sera pas représentative de la réalité, puisque l'orientation de la paroi est parallèle à la direction générale des fractures de la famille P.

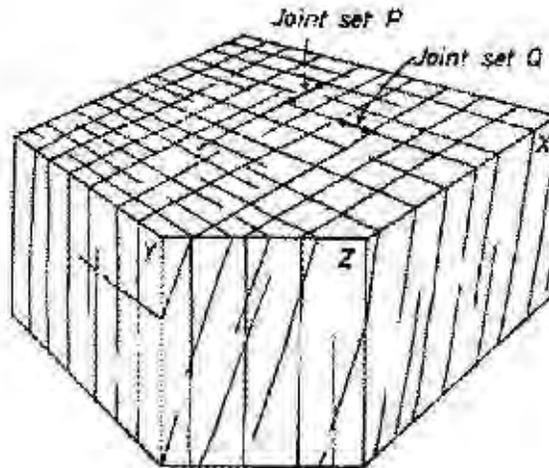


Figure 2.4 Levé de terrain le long de deux traverses d'orientation différente et correction de Terzaghi.

Notons que $N = n/\sin(\theta)$, soit le nombre réel de fractures d'une orientation donnée (N), qui est exprimé par le nombre de fractures mesurées le long de la traverse (n) divisé par le sinus de l'angle entre l'orientation de la traverse et l'orientation des fractures (θ), est toujours inférieur ou égal à 90° . Par exemple, la fréquence des fractures de direction N50 (famille B de la figure 2) s'obtient en calculant le nombre de fractures de cette famille qui croisent la traverse 2 et en y apportant la correction de Terzaghi, soit $N = 4/\sin 40^\circ$ ou $N = 5,37$.

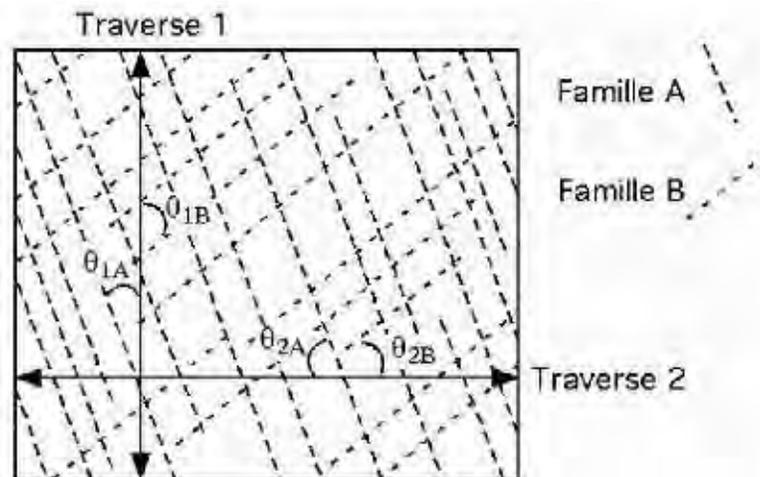




Figure 2.5 Traitement des données de fracturation : Histogramme présentant l'espacement des fractures pour une famille donnée.

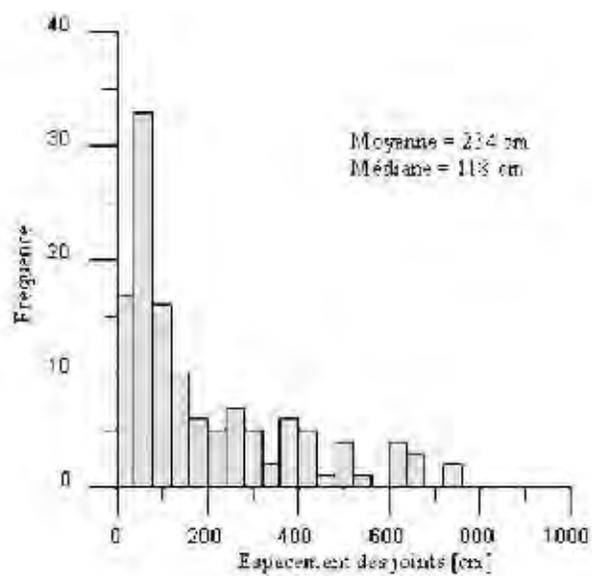


Figure 2.7 Carte d'élévation de la surface du socle rocheux.

Cette carte correspond à l'élévation supérieure de l'aquifère rocheux. Tous les points de mesure utilisés pour l'interpolation sont présentés.

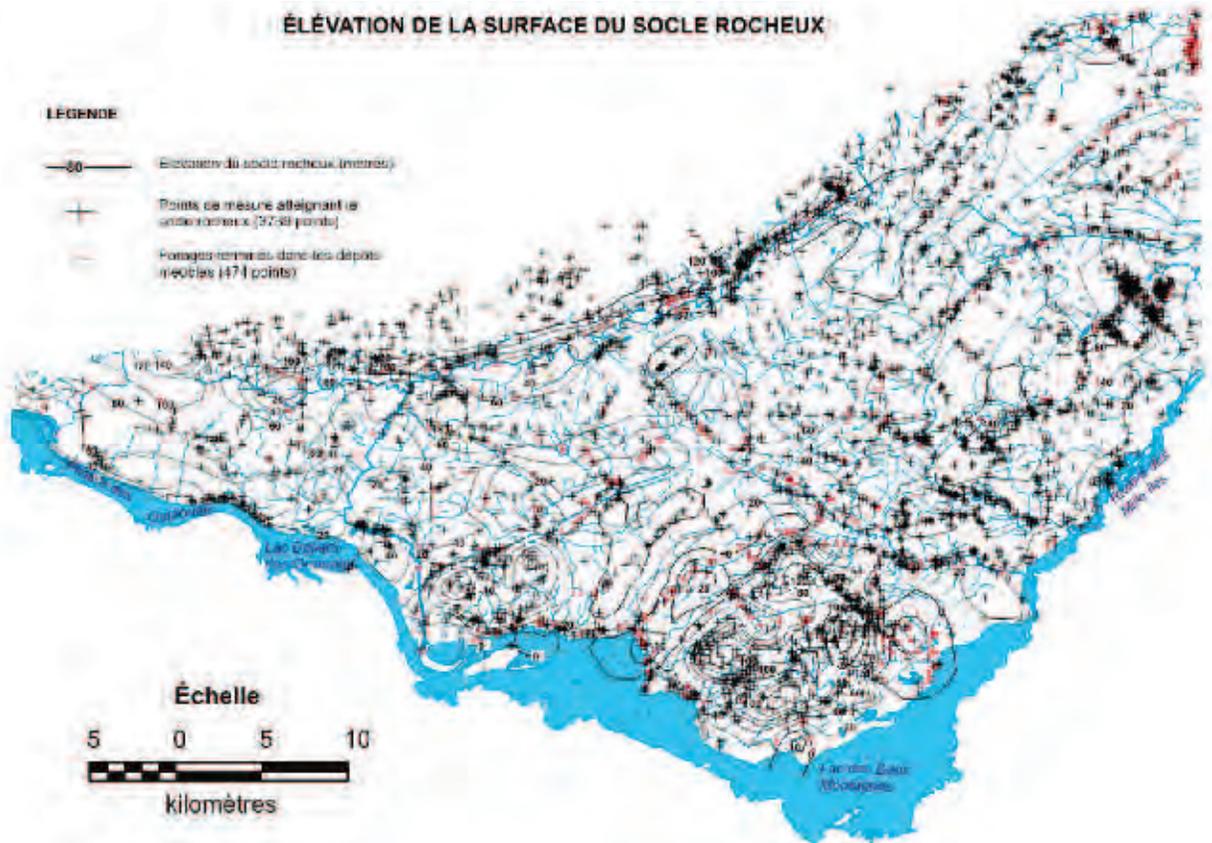


Figure 2.8 Carte d'épaisseur d'argile marine.

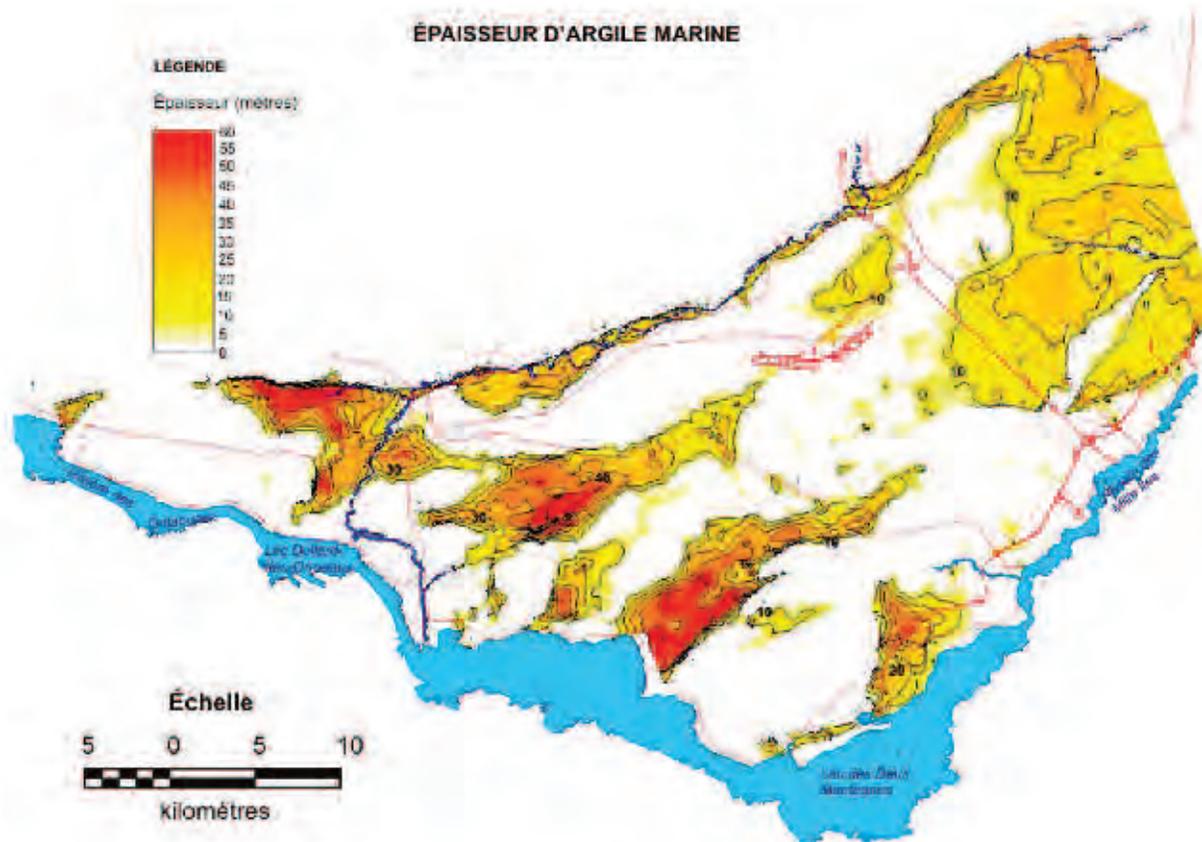


Figure 2.9 Carte des contextes hydrogéologiques.

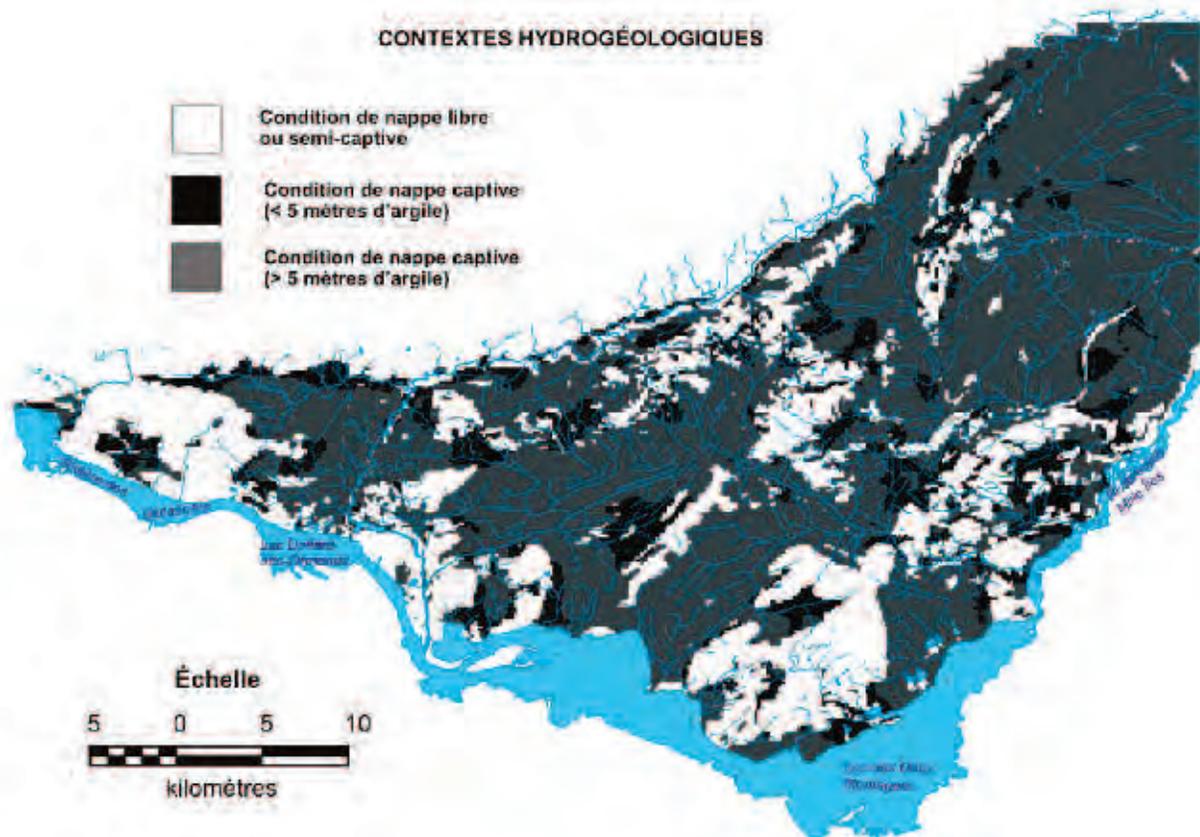


Figure 2.10 Carte des principales zones de recharge de l'aquifère rocheux.

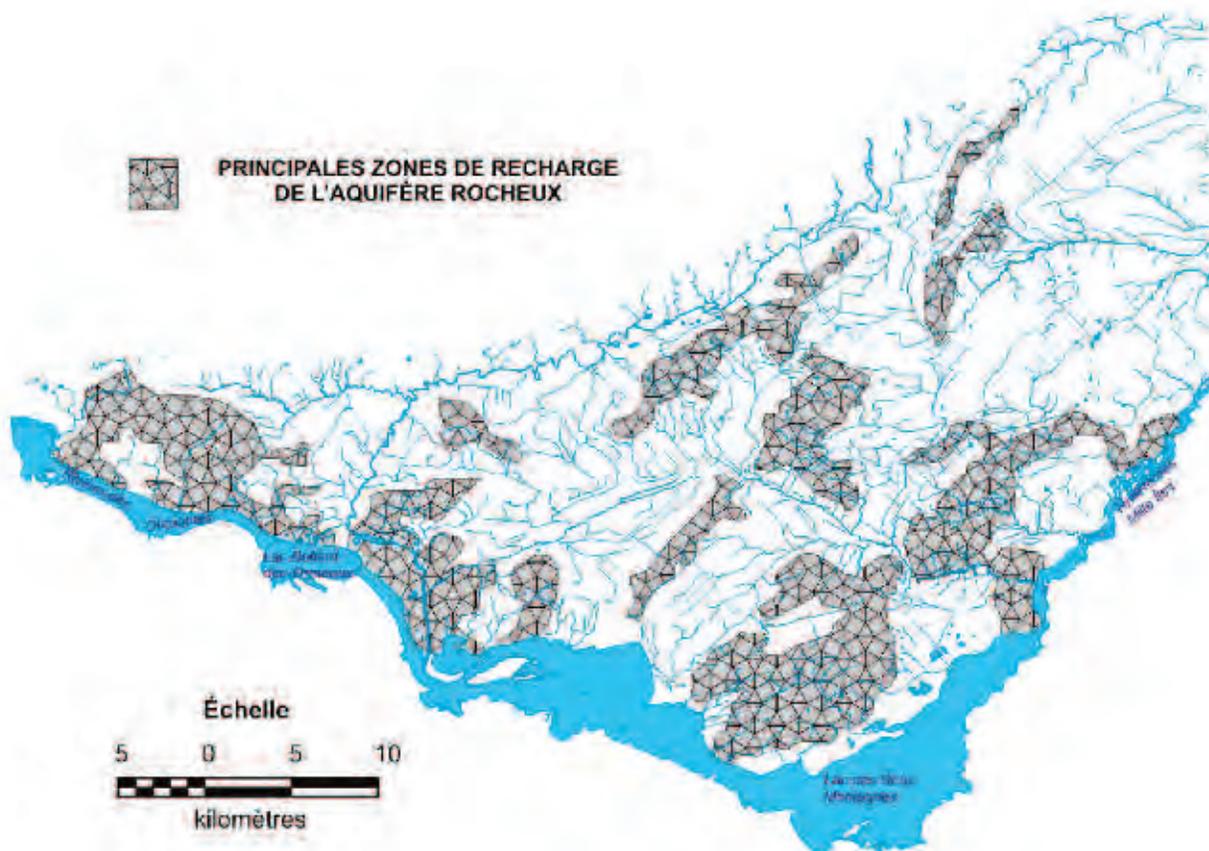
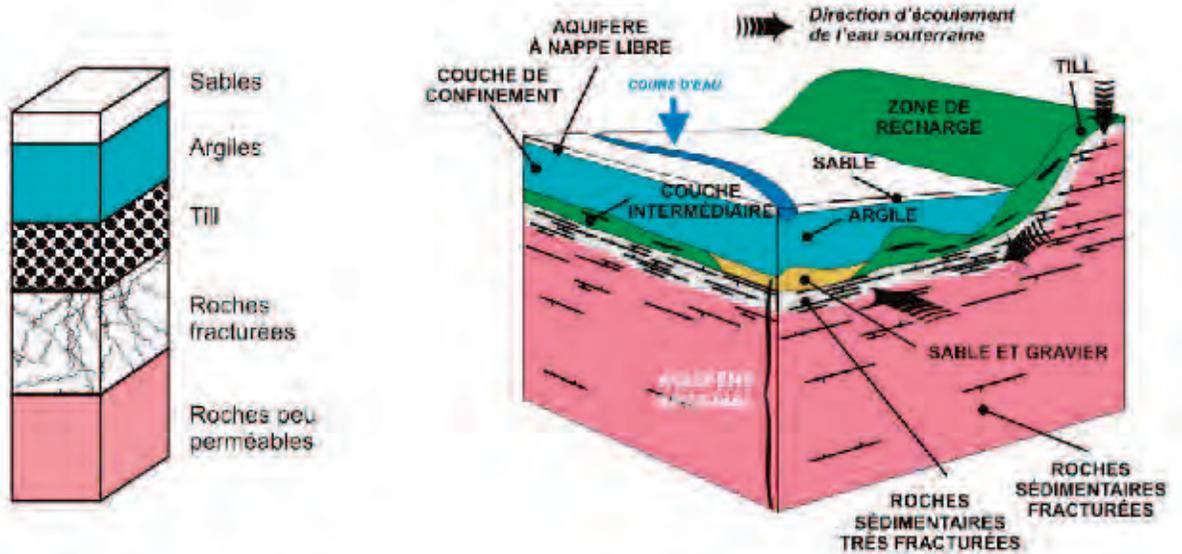


Figure 2.11 Modèle conceptuel préliminaire et modèle conceptuel final.

L'analyse des données existantes a d'abord permis de définir une stratigraphie préliminaire schématisant le système aquifère cartographié (a). À la suite des campagnes de terrain, les différents travaux effectués (forages, essais de perméabilité, visites de carrières et d'affleurements, etc.) ont aidé à peaufiner le modèle conceptuel (b). Ainsi, l'aquifère régional n'est pas seulement composé de roches fracturées mais aussi, par endroits, de sable et de gravier d'origine fluvioglacière ou de till délavé de ses particules fines. Les différents essais de perméabilité montrent que la partie effective de l'aquifère se trouve à 100 mètres sous la surface du socle rocheux (Nastev *et al.*, 2002).



(a) Modèle conceptuel préliminaire

(b) Modèle conceptuel final

Tableau 2.1 Types et sources des données géoscientifiques disponibles au Québec et utiles pour la définition du cadre hydrostratigraphique (tableau modifié de Michaud et al,[à paraître]).

FÉDÉRAL	PROVINCIAL (P)				MUNICIPAL (M)		PRIVÉ (F)		
Ressources naturelles Canada	Transports	Environnement	Ressources naturelles	Agriculture pêcheries et alimentation	Municipalités Régionales de Comté (MRC)	Municipalités	Firmes privées		
3,8			2,5,12					Géologie du socle rocheux	Géologie
1,2,8		21	1,3,12	25				Géologie du Quaternaire	
1,2,3,8	27	13,14	1,2,3,4,6,12				1	Stratigraphie	Propriétés aquifères
	27	13,14,15	4,25				1	Niveau de l'eau souterraine	
		13,14,15				1,2		Débit	
	27	14,15					1	Granulométrie	
		14,15					1	Propriétés hydrauliques*	
	27							Propriétés mécaniques**	
4				25				Pédologie	Infiltration et écoulement
5,6		18,19	7,8					Hydrologie	
		16						Météorologie	
5,6,7			7,8,9,10			1,2		Topographie	
		17			1	1,2		Système d'approvisionnement	Qualité, utilisation et vulnérabilité
		17,20				1,2		Qualité de l'eau souterraine	
4,7		21,22,23	7,8,11	25	1			Utilisation du sol	

* Transmissivité, conductivité hydraulique et coefficient d'emmagasinement.

** Teneur en eau, limite plastique liquide, pénétromètre, scissiomètre et cisaillement.

FÉDÉRAL

F1- Cartes des dépôts superficiels
 F2- Bd géologie quaternaire
 F3- Cartes socle rocheux
 F4- Cartes des inventaires des Terres du Canada
 F5- Photographies aériennes (1:5000 au 50000)
 F6- Carets topographiques (BNDT) (1:50000 et 1:20000)
 F7- Données numériques d'élévation du Canada (1:250000)
 F8- Catalogue collectif GEOSCAN (Bd bibliographiques)

PROVINCIAL

P1- Cartes des dépôts superficiels
 P2- Cartes du socle rocheux
 P3- Cartes des agrégats
 P4- Bd puits d'exploitation pétrolière
 P5- Bd levés géophysiques (MAGGY)
 P6- Carothèque
 P7- Photographie aériennes (1:5000 et 1:40000)
 P8- Bd topographiques (BDTQ) (1:20000)
 P9- Orthophotographies numériques (1:40000)
 P10- Bd géodésiques du Québec (GÉODEQ)
 P11- Système de délimitation administrative (SDA)
 P12- EXAMINE et SIGEOM (Bd bibliographiques)

P13- Syst. d'inf. hydrogéologiques (SIH)
 P14- Bd piézométriques
 P15- Cartes et rapports hydrogéologiques
 P16- Données climatologiques
 P17- Bd sur l'eau potable
 P18- Bd des bassins versants
 P19- Bd hydriques
 P20- Bd sur la qualité du milieu aquatique
 P21- Cadre écologique de référence du Québec
 P22- Inventaire des industries
 P23- Bd sur les terrains contaminés
 P24- Envirodoq et Collection générale (Bd bibliographiques)
 P25- Cartes et rapports pédologiques
 P26- Bd sur les sols québécois (BIRSQ)
 P27- Données géotechniques

MUNICIPAL

M1- Schéma d'aménagement
 M2- Rapports techniques

PRIVÉ

C1- Rapports techniques

3. ÉLABORATION D'UNE CARTE PIÉZOMÉTRIQUE RÉGIONALE

Daniel Paradis

L'écoulement de l'eau souterraine dans un aquifère se fait des régions à potentiel hydraulique élevé aux régions à potentiel hydraulique faible. Par définition, le potentiel hydraulique d'un volume d'eau de l'aquifère représente la somme des énergies cinétique, potentielle et de pression. Les vitesses d'écoulement dans les aquifères étant le plus souvent faibles, la composante de l'énergie cinétique est négligée et la somme des énergies potentielles (énergie d'élevation z) et de pression (hauteur de la colonne d'eau h) définit alors le potentiel hydraulique aussi appelé *charge hydraulique* (H). Cette charge s'évalue donc de la façon suivante :

$$H = z + h$$

Équation 3.1

La charge hydraulique est mesurée à l'aide d'un piézomètre. Dans sa plus simple expression, un piézomètre est un tube ouvert à ses deux extrémités qui permet la mesure du niveau d'eau. La charge hydraulique mesurée est celle de la base du tube. Un piézomètre peut aussi être un tube ouvert à son extrémité supérieure avec à sa base une crépine. Une crépine est un tube possédant des ouvertures permettant de laisser pénétrer l'eau sans laisser entrer les sédiments. Le point de mesure se trouve alors au centre de la crépine. Dans les aquifères rocheux, la mesure des niveaux d'eau se fait aussi par l'entremise de puits ouverts. Dans ce dernier cas, l'ouverture dans les unités rocheuses n'est pas munie de tubage ni de crépine. Le point de mesure se trouve alors au centre du trou ouvert, comme dans le cas du piézomètre muni de la crépine.

Pour calculer la charge hydraulique d'un piézomètre ou d'un puits donné, on doit connaître l'élévation du niveau de référence et du sol, l'élévation de l'extrémité supérieure (margelle) du piézomètre ou du puits et la profondeur du niveau d'eau par rapport à cette extrémité (figure 1).

La détermination de la distribution des charges hydrauliques pour un territoire donné est à la base de l'élaboration d'une carte piézométrique. Le terme *piézométrique* est ici utilisé comme synonyme de *charge hydraulique*. La charge hydraulique est une grandeur scalaire dont la valeur est rattachée à un point précis de l'espace contenant l'aquifère. En pratique, l'écoulement dans un aquifère est souvent considéré comme horizontal (hypothèse de Dupuit, 1863), c'est-à-dire sans variations de la charge hydraulique en fonction de la profondeur. Dans ce cas, la surface piézométrique correspond à la charge hydraulique.

La carte piézométrique régionale donne une vue d'ensemble de la dynamique de l'écoulement de l'eau souterraine d'un aquifère donné. Les applications possibles d'une telle carte sont multiples : délimitation d'un ou des bassins d'écoulement (bassin versant ou hydrogéologique), compréhension du déplacement d'une substance chimique à grande échelle, optimisation d'un réseau de suivi des niveaux piézométriques et calibrage d'un modèle numérique d'écoulement.

La procédure d'élaboration d'une carte piézométrique régionale est divisée en plusieurs étapes qui doivent être réalisées selon une séquence logique (tableau 1). Cette procédure est basée sur l'identification des bassins d'écoulement (notion similaire à celle de bassin versant en hydrologie) afin de définir la densité et l'exactitude des mesures requises. L'estimation de la densité de mesures requises permet d'optimiser les levés de terrain. Par ailleurs, l'estimation de l'exactitude des mesures est indispensable à la production d'une carte de qualité.

Des exemples d'application sont donnés au cours du texte afin d'illustrer la méthodologie proposée. La carte piézométrique régionale du Projet sur les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec (AFSOQ) est aussi présentée à la fin du chapitre comme exemple de produit fini.



3.1 Traitement préliminaire

Le traitement préliminaire de l'information suppose une connaissance préalable de l'aquifère d'intérêt. S'il n'est pas déjà connu par des travaux antérieurs, l'aquifère peut être identifié selon les directives du chapitre 2 traitant de la définition du contexte hydrogéologique. Dans le cas d'aquifères multiples, il faut distinguer les aquifères les uns des autres et les traiter séparément. De plus, une carte piézométrique distincte doit être produite pour chacun des aquifères. Il faut aussi porter une attention particulière pour ne pas confondre les mesures prises dans les différents aquifères.

Le traitement préliminaire de l'information est une étape essentielle pour optimiser les levés de terrain. Celle-ci comprend la collecte des données existantes, la sélection des points de mesure, l'évaluation de l'exactitude des mesures requises et le choix des méthodes et de la période de mesure.

3.1.1 Collecte des données existantes

Les premières données à compiler sont les détails de construction des puits existants. Ces ouvrages peuvent être des puits domestiques ou des puits d'observation aménagés pour des études spécifiques. Ces ouvrages sont accessibles, surtout lorsqu'ils sont encore, en activité, mais plusieurs peuvent avoir été abandonnés ou détruits. La description de l'ouvrage doit comprendre la date d'aménagement, la longueur du tubage, la profondeur du forage, une description des formations géologiques rencontrées et les mesures des niveaux statique et dynamique. La principale source d'information concernant les puits domestiques est le système d'information hydrogéologique (SIH) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Les rapports de firmes privées et de certains autres ministères peuvent également servir à localiser les puits d'observation sur le territoire.

La compilation des détails de construction des ouvrages de captage d'eau souterraine qui ont une influence sur la piézométrie régionale est aussi requise. Il peut s'agir de puits municipaux et de puits d'extraction importants à vocation industrielle ou agricole (ex. : pompage pour les carrières, pisciculture). S'il y a lieu, l'influence de ces ouvrages doit être représentée sur la carte piézométrique finale. La description de ces ouvrages doit contenir, en plus du débit et des périodes d'extraction, les mêmes informations que pour les puits existants. Ces informations sont généralement disponibles auprès des municipalités ou de l'exploitant du captage.

3.1.2 Sélection des points de mesure

Les points de mesure sont sélectionnés dans le but d'optimiser la quantité et la distribution des mesures de niveau piézométrique sur l'ensemble de l'aquifère cartographié. La procédure suggérée se base sur l'identification des bassins d'écoulement et de ses composantes (figure 3.2). Schématiquement, un bassin d'écoulement est composé de deux versants et d'une ligne de convergence des versants. L'eau des deux versants s'écoule vers le centre du bassin ou vers la ligne de convergence des versants, alors que l'eau sur la ligne de convergence s'écoule vers l'embouchure du bassin.

La première étape consiste à réaliser une carte d'écoulement préliminaire. Cette carte est réalisée par l'interpolation des mesures historiques de niveaux piézométriques récoltées pour l'aquifère d'intérêt. Les puits utilisés doivent effectivement être mis en place dans la formation aquifère cartographiée. Pour les aquifères de surface au Québec, comme il y a souvent une bonne corrélation entre les surfaces topographique et piézométrique, les contours topographiques peuvent remplacer l'utilisation des données antérieures à l'étude lorsque celles-ci sont inexistantes. Notons que la carte d'écoulement préliminaire ne constitue qu'une approximation et qu'il est essentiel de produire une carte piézométrique finale à l'aide des mesures de terrain (section 3.5).



Par la suite, les bassins d'écoulement ainsi que les différentes composantes des bassins sont tracés (figure 3.3). Les bassins d'écoulement sont délimités à l'aide des lignes de partage des eaux de la carte d'écoulement préliminaire. On remarquera que les différents bassins peuvent avoir des formes et des dimensions relativement variables. Pour faciliter la répartition des points de mesure, les plus grands bassins peuvent être subdivisés en sous-bassins. Les liaisons entre les bassins et les sous-bassins, de même qu'entre les différentes composantes des bassins, sont tracées afin de faciliter la compréhension de l'écoulement. Dans certains contextes, il se peut que les lignes de partage des eaux excèdent la partie de l'aquifère cartographié. Dans ce cas, l'aquifère entier peut être considéré comme une fraction de versant d'un bassin d'écoulement plus vaste.

Le nombre et la distribution des points de mesure sur un bassin d'écoulement dépendent à la fois de la forme de la surface piézométrique et de la distribution des puits existants. Indépendamment des puits existants, une bonne stratégie de distribution des points de mesure est basée sur la représentation adéquate de la géométrie de la surface piézométrique pour chaque bassin d'écoulement (figure 3.4). Premièrement, on doit représenter l'écoulement le long de la ligne de convergence des versants. Un certain nombre de points de mesure sont alors sélectionnés selon la forme en plan et la pente de la ligne de convergence. Ainsi, un minimum de trois points doit être sélectionné et un de ceux-ci doit coïncider avec l'embouchure du bassin. Si la forme du bassin est assimilable à une ellipse, huit points de mesure sont alors ajoutés pour représenter le périmètre du bassin ou du sous-bassin d'écoulement. Par la suite, une quantité de points de mesure égale à la quantité servant à représenter le périmètre est ajoutée pour représenter la pente des versants. Ainsi, huit points de mesure sont répartis entre le périmètre du bassin et la ligne de convergence. De plus, les points de mesure doivent être répartis uniformément sur le bassin de même que sur l'ensemble de la région d'étude. Cette répartition des points de mesure constitue un optimum pour une surface piézométrique uniforme dont le bassin d'écoulement est assimilable à une ellipse.

En pratique, les bassins d'écoulement sont de formes variables et la distribution des points de mesure dépend des irrégularités de la surface piézométrique (figure 3.5). Ainsi, en plus de permettre la représentation générale d'un bassin d'écoulement, des points de mesure sont ajoutés de façon à représenter les hauts et les bas de la surface piézométrique. Pour faciliter la distribution des points de mesure, les bassins de forme complexe peuvent être subdivisés en sous-bassins. On remarque aussi que plus la forme du bassin est complexe, plus grande doit être la quantité de points de mesure.

Pour représenter l'effet du pompage autour d'un captage, le niveau dynamique doit être mesuré à l'endroit même du captage. De plus, trois mesures supplémentaires, non affectées par le cône de dépression du puits et réparties uniformément autour de celui-ci, doivent être prises afin de ne pas exagérer l'effet du pompage. Il est possible que le niveau dynamique varie dans le temps si le débit de pompage est variable. Ainsi doit on s'assurer de connaître l'horaire de pompage pour faire le lien entre le niveau piézométrique mesuré et le débit de pompage correspondant.

Pour la sélection des points de mesure, les puits inutilisés et les puits d'observation doivent être recherchés en priorité. Si des puits utilisés de façon intermittente (ex. : puits domestiques) doivent être sélectionnés, on choisit ceux dont l'écart entre les niveaux statique et dynamique est le moindre. Les mesures de niveaux statique et dynamique sont généralement prises lors de l'aménagement des puits. De façon générale, moins la formation est perméable, plus grande est l'influence du pompage sur le niveau statique. Si la majorité des points de mesure sélectionnés sont des puits domestiques et que l'analyse préliminaire des niveaux statique et dynamique montre un écart sensible entre les deux mesures (> 5 m), l'utilisation de ce type de point de mesure doit être justifiée (section 3.1.4).

Pour chacun des puits existants sélectionnés, le lien hydraulique avec l'aquifère d'intérêt est vérifié à l'aide des descriptions des forages. La crépine ou le puits doit être ouvert sur la formation d'intérêt. L'absence de puits existant dans certaines zones peut exiger des forages additionnels. Il est

de plus suggéré de sélectionner quelques points de mesure supplémentaires pour parer à l'éventualité que certains puits soient endommagés ou introuvables. Ces mesures servent aussi à la validation des mesures (section 3.2.5).

Lorsqu'un cours d'eau est en contact hydraulique avec l'aquifère d'intérêt ou lorsqu'une nappe fait résurgence, des points de mesure peuvent être ajoutés. Dans ce cas, l'élévation de la surface piézométrique correspond à l'élévation du cours d'eau. Le lien hydraulique du cours d'eau devra être ultérieurement vérifié sur le terrain (section 3.2.2).

3.1.3 Évaluation de l'erreur minimale acceptable (ErMinA)

L'évaluation de l'erreur minimale acceptable sur les mesures d'élévation de la surface piézométrique est requise afin d'assurer la qualité de la carte produite. En effet, si l'erreur sur les mesures est trop importante, de mauvaises directions d'écoulement peuvent être indiquées sur la carte. Cette évaluation est faite au moyen du calcul du gradient piézométrique entre deux points de mesure. Par exemple, pour deux points de mesure parallèles au sens d'écoulement, une erreur d'évaluation supérieure à la différence de niveau piézométrique entre les deux mesures (erreur plus grande que 100 %) produit un renversement de la direction de l'écoulement (figure 3.6a). D'autre part, pour deux points de mesure perpendiculaires au sens de l'écoulement, une erreur de mesure modifie la direction de l'écoulement ainsi que la magnitude du gradient (figure 3.6b). Pour minimiser les effets de ces erreurs, on estime qu'une erreur du gradient de 20 % est acceptable à l'échelle régionale.

L'erreur minimale est évaluée à l'aide de la carte d'écoulement préliminaire pour chacune des composantes des bassins d'écoulement (figure 3.5). L'erreur minimale acceptable sur les mesures de l'élévation de la surface piézométrique pour un point de mesure donné (ErMIN) s'évalue par la relation suivante :

$$Er_{MIN} = D_{MIN} \times G_{MIN} \times Er_G \quad \text{Équation 3.2}$$

où D_{MIN} est la distance minimale de séparation entre deux points de mesure parallèles au sens de l'écoulement; G_{MIN} le gradient piézométrique minimum sur la composante du bassin considéré et Er_G l'erreur relative acceptable sur la mesure du gradient piézométrique (20 % à l'échelle régionale).

De façon générale, l'erreur minimale est plus grande pour la ligne de convergence des versants que pour les versants. Notons que si l'erreur de mesure anticipée (section 3.1.4) est négligeable et que l'on sait que les méthodes de mesure de la surface piézométrique qui seront utilisées sont très précises, l'évaluation de l'erreur minimale n'a pas besoin d'être effectuée (section 3.1.4).

3.1.4 Évaluation de l'erreur de mesure anticipée

Avant de procéder aux levés, on doit s'assurer que le choix des méthodes ou de la méthodologie n'affecte pas la qualité des mesures prises sur le terrain. Les principales sources d'erreur à considérer sont l'exactitude des méthodes de mesure, le choix de la période de mesure et la représentativité de certains types d'installation comme les puits domestiques. La somme de ces erreurs ne devrait jamais excéder l'erreur minimale requise (section 3.1.3).

Les méthodes de mesure de l'élévation de la surface piézométrique regroupent les méthodes de mesure de la profondeur du niveau piézométrique et de l'élévation du point de référence. L'erreur sur la mesure de la profondeur mesurée à l'aide d'une sonde électrique est souvent faible (< 1 cm). Si la mesure est prise adéquatement (section 3.2.2), l'erreur engendrée peut être considérée négligeable à l'échelle régionale. Pour le nivellement du point de référence, les méthodes disponibles sont beaucoup plus variées que les méthodes de mesure de la profondeur. Une bonne connaissance des différents outils disponibles s'avère donc nécessaire.



Les méthodes de nivellement se divisent en deux catégories : les méthodes directes et les méthodes indirectes. Les méthodes directes incluent le niveau, le théodolite et les systèmes GPS et DGPS. L'exactitude de ces méthodes à l'échelle régionale est généralement centimétrique. Parmi les méthodes indirectes, il y a les cartes et les modèles numériques topographiques généralement disponibles à l'échelle 1 : 20 000 et 1 : 50 000. L'exactitude de ces méthodes est très variable et celles-ci ont besoin d'être validées de façon directe avant d'être utilisées.

En général, la validation des méthodes de mesure d'élévation est réalisée à l'aide des mesures exactes que sont les bornes géodésiques ou tous les autres points dont l'élévation est connue avec précision. Ces points de validation doivent être répartis sur l'ensemble du territoire, dans les différents contextes topographiques de la région d'étude, tels les reliefs plats et montagneux. Un maximum de points doit être utilisé de façon à avoir une meilleure estimation de l'erreur.

Une fois les mesures obtenues, il faut reporter dans un graphique les élévations obtenues par la méthode à valider en fonction des élévations mesurées par la méthode exacte se rapportant au même point de référence (ex. : le sol) (figure 3.7). L'erreur induite par la méthode à valider s'évalue par le calcul de l'erreur résiduelle, soit la différence entre la mesure obtenue par la méthode exacte et celle qui est estimée par la méthode à valider. L'erreur est donnée par la médiane, à laquelle on additionne le 75^e centile, puis on soustrait le 25^e centile de l'erreur résiduelle (Isaaks et Srivastava, 1989). Une médiane non nulle indique qu'il y a une erreur systématique avec la méthode de mesure à valider.

Pour réduire l'erreur inhérente aux fluctuations de la surface piézométrique, la période de mesure doit être aussi courte que possible. Cette période peut être réduite si le nivellement des points de référence est effectué après la mesure de l'ensemble des profondeurs. Si les levés de terrain doivent s'étendre sur plusieurs mois, l'erreur induite doit alors être quantifiée. Pour ce faire, on analyse les hydrogrammes de puits disponibles dans la région (figure 3.8). Les hydrogrammes utilisés doivent être représentatifs de l'ensemble des conditions hydrogéologiques présentes. L'erreur induite est donnée par la différence de niveau piézométrique pour la période considérée. Cette erreur peut être réduite en choisissant une période de l'année où les fluctuations de la surface piézométrique sont moins importantes. Généralement, les mesures sont prises à l'étiage (hivernal ou estival), au moment où la diminution des niveaux piézométriques est constante. Le choix de ces périodes facilite aussi la quantification de l'erreur. On veille aussi à bien indiquer sur la carte piézométrique finale, en plus des dates de mesure, la période du cycle hydrologique pendant laquelle se situe la période de mesure (ex. : niveau piézométrique moyen, d'étiage ou de crue).

Idéalement, tous les points de mesure de la surface piézométrique doivent être des puits d'observation ou des piézomètres en bon état et non influencés par des pompages. Cependant, à cause de la rareté de ces derniers, il arrive que la majorité des points de mesure utilisés soit des puits domestiques. Si ces puits sont aménagés dans des formations peu perméables, le niveau statique est susceptible d'être grandement affecté par le pompage. Ainsi, la représentativité des niveaux statiques mesurés dans des puits en activité de façon intermittente doit être évaluée avant de procéder aux levés de terrain. Si l'analyse préliminaire des niveaux statique et dynamique de la section 3.1.2 montre un écart considérable entre ces deux mesures (> 5 m), l'enregistrement des fluctuations de la surface piézométrique pour plusieurs cycles de pompage (> 2 semaines) en condition normale d'utilisation doit être réalisé (figure 3.9). Ainsi, on choisira quelques puits domestiques représentatifs de l'ensemble des conditions hydrogéologiques et des conditions de pompage pour ce type d'installation. L'erreur induite par le pompage est donnée par l'amplitude des fluctuations de la surface piézométrique. Si l'erreur ainsi mesurée est supérieure à l'erreur minimale requise, l'utilisation de ce type de point de mesure doit être remise en question.

La somme des erreurs induites de différentes sources doit toujours être comparée avec l'erreur minimale requise. Dans certains cas, lorsque l'erreur anticipée est très variable ou que les coûts d'opération de certaines méthodes sont élevés, une optimisation des levés de terrain peut être

réalisée pour chacune des composantes des bassins d'écoulement. Par exemple, des méthodes directes peuvent être utilisées pour niveler les puits d'observation par rapport aux lignes de convergence et des méthodes indirectes, pour niveler les puits domestiques des versants.

3.2 Levés de terrain et validation des mesures

Les levés de terrain nécessaires à l'élaboration de la carte piézométrique régionale visent à positionner et à vérifier le lien hydraulique des points de mesure sélectionnés, à mesurer la profondeur de la surface piézométrique et à mesurer l'élévation du point de référence. La validation des mesures de terrain, quant à elle, vise l'identification des mesures anormales.

3.2.1 Localisation du point de mesure

La localisation des points de mesure ne nécessite généralement pas de précautions particulières pour obtenir l'exactitude désirée. En effet, si une précision de 10 % est exigée pour l'horizontale (par exemple si l'erreur totale exigée est de 20 %, dont 10 % à la verticale et 10 % à l'horizontale) et que la séparation moyenne des points de mesure est d'environ 2000 m, l'erreur acceptable est alors de 200 m. Cette précision s'obtient facilement à l'aide des cartes topographiques à l'échelle de 1 : 20 000 ou 1 : 50 000 ou par l'utilisation d'un GPS de poche. On veillera cependant à utiliser un système de coordonnées unique pour l'ensemble des points de mesure (chapitre 6).

3.2.2 Vérification du lien hydraulique

La vérification du lien hydraulique des cours d'eau est réalisée par l'analyse de la composition du lit et par des coupes géologiques naturelles qui sont parfois présentes aux abords des cours d'eau. On doit aussi vérifier que les caractéristiques des puits – (profondeur, longueur du tubage ou position de la crépine, hauteur de la margelle et niveau statique) – correspondent bien aux descriptions données. De plus, le puits ne doit pas être endommagé (ex. : infiltration préférentielle) ou colmaté. La vérification du scellé et du colmatage des piézomètres peut se faire par la méthode du graphique des vitesses (Chapuis, 1999). Avant de prendre la mesure dans un nouveau puits d'observation, il est important de s'assurer que celui-ci est bien développé et stabilisé.

3.2.3 Mesure de la profondeur de la surface piézométrique

La profondeur du niveau piézométrique est généralement mesurée à l'aide d'une sonde électrique qui émet un signal sonore ou lumineux lorsqu'elle atteint la surface de l'eau. Le câble attaché à la sonde est gradué, sinon un gallon métrique est utilisé pour mesurer la profondeur atteinte par la sonde. Pour améliorer la précision de la mesure, le câble ne doit pas être étiré ou emmêlé. L'erreur sur la mesure de la profondeur est généralement faible (< 1 cm).

Pour qu'une mesure de la profondeur de la surface piézométrique soit valable, une série de mesures doit être prise pour vérifier la stabilité du niveau piézométrique. Au moins trois mesures consécutives doivent être prises à des intervalles d'une ou de plusieurs minutes, et la précision doit être de $\pm 0,25$ cm (Karklins, 1996). Si les mesures ne sont pas stables, le point de mesure doit être abandonné, sauf s'il s'agit d'un puits influencé par un captage voisin dont on veut représenter l'effet. S'il s'agit d'un puits muni d'une pompe (ex. : puits domestique), cette dernière ne doit pas être active lors de la prise de mesure. Pour des puits d'observation servant aussi à évaluer la qualité de l'eau souterraine ou qui sont susceptibles d'être contaminés, il est recommandé de nettoyer la partie de la sonde qui est submergée dans l'eau de façon convenable (gouvernement du Québec, 1994) avant d'effectuer les mesures de la profondeur de la surface piézométrique dans chacun des puits, afin d'éviter une contamination entre les puits. De façon générale, lorsque la pompe est arrêtée depuis seulement quelque temps, la mesure du niveau statique est instable et la validité de la mesure est mise en doute.

Finalement, l'endroit par rapport auquel la mesure a été prise (ex. : sol, margelle) doit être indiqué afin de fournir un point de référence pour le nivellement du puits.

3.2.4 Mesure de l'élévation du point de référence

Le nivellement des points de référence est réalisé à l'aide d'un niveau, d'un théodolite ou d'un système GPS ou DGPS (méthodes directes). La procédure générale consiste à relier, à l'aide de ces instruments, le point de référence du puits à une borne géodésique d'élévation connue. Le cheminement entre le point de référence du puits et la borne géodésique se fait en aller-retour de manière à permettre la validation des mesures (Lauzon et Duquette, 1996). À l'échelle régionale, l'exactitude de ces méthodes est généralement centimétrique.

L'élévation du point de référence du puits se mesure à l'aide d'une référence absolue, soit le niveau moyen des mers. Cette référence doit être commune pour toutes les mesures. Pour mesurer cette élévation, les bornes géodésiques du réseau québécois sont le plus souvent utilisées. L'emplacement de ces bornes et l'information qui s'y rattache sont disponibles auprès du ministère des Ressources naturelles. Les municipalités peuvent aussi tenir un registre des bornes géodésiques sur leur territoire. Il est important de s'assurer que le point de référence nivelé est le même que celui qui est utilisé pour la mesure de la profondeur. Si tel n'est pas le cas, la distance et l'élévation séparant ces deux points doivent être mesurées.

Les cartes ou les modèles numériques topographiques à l'échelle 1:20 000 ou 1:50 000 peuvent aussi être utilisés (méthodes indirectes). La procédure consiste à lire l'élévation sur la carte correspondant à l'endroit de la mesure. La valeur sur la carte correspond à l'élévation du sol. Par conséquent, les mesures de profondeur doivent être rapportées au niveau du sol avant d'effectuer le calcul de l'élévation de la surface piézométrique. L'exactitude de ces cartes et de ces modèles numériques est très variable : la variation est de quelques mètres en relief plat jusqu'à une dizaine de mètres en relief montagneux.

3.2.5 Validation des mesures

La validation des mesures vise à assurer la qualité des données qui seront utilisées pour l'interpolation. Malgré toutes les précautions prises pour s'assurer de la qualité de la méthodologie (section 3.1.4) et de la prise de mesures (sections 3.2.1 à 3.2.4), certaines erreurs peuvent subsister (ex. : erreurs de transcription, mauvaise calibration). Pour repérer les mesures anormales, deux procédures sont suggérées, soit la représentation graphique des niveaux statiques et la vérification spatiale des mesures.

La validation des mesures nécessite de représenter par des graphiques les niveaux statiques mesurés lors de l'aménagement des puits, c'est-à-dire avant leur mise en service, et ceux qui ont été mesurés sur le terrain (figure 3.10). Les mesures des niveaux statiques mesurés lors de l'aménagement des puits sont généralement disponibles dans le système d'information hydrogéologique (SIH) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Même si les mesures ont été levées à des périodes différentes, l'analyse de ce graphique permet tout de même de repérer les anomalies.

La vérification spatiale des mesures est facilitée lorsqu'il y a redondance des mesures dans le voisinage d'un point de mesure. Les mesures d'élévation de la surface piézométrique dans un secteur donné sont alors comparées entre elles. S'il y a des différences majeures inexplicables entre le point de mesure et ses voisins, le point considéré peut être supprimé ou remplacé par une mesure voisine.

3.3 Procédure d'interpolation des mesures

De façon générale, si la densité des mesures est élevée et homogène, le choix du type d'interpolateur n'a pas beaucoup d'influence sur la distribution des mesures interpolées. Dans ce cas, les mesures peuvent facilement être interpolées par triangulation, à condition d'éviter les effets de regroupement des mesures (Isaaks et Srivastava, 1989). Lorsque la densité des mesures est faible ou que leur distribution est inégale, l'utilisation de méthodes plus complexes comme le krigeage doit être envisagée. Cependant, ces méthodes ne devraient pas être utilisées sans une connaissance de base appropriée. Pour une discussion plus complète sur le choix et l'application des méthodes d'interpolation, nous conseillons au lecteur de se référer à Isaaks et Srivastava (1989), à Kitanidis (1997), et à Davis (1986).

La procédure d'interpolation des mesures est itérative jusqu'à ce que les mesures interpolées concordent avec notre interprétation de l'écoulement. Par exemple, il faut vérifier que les cours d'eau, s'ils sont en contact hydraulique avec l'aquifère d'intérêt, s'écoulent dans la bonne direction. On s'assure aussi que l'effet du pompage des puits importants est bien représenté. De plus, l'élévation de la surface piézométrique peut être comparée avec l'élévation de la surface du sol. Si l'élévation de la surface piézométrique est plus élevée que la surface du sol dans une zone où il n'y a pas de puits coulant, la surface piézométrique devra être corrigée par l'ajout de mesures supplémentaires.

Le choix de la méthode d'interpolation est fait selon la densité et la variabilité des mesures. L'interpolation est effectuée avec les mesures validées à la section 3.2.5 ainsi qu'avec l'élévation des cours d'eau en lien hydraulique avec l'aquifère d'intérêt. Plusieurs méthodes ou modèles peuvent être utilisés afin d'être comparés entre eux.

Le résultat de l'interpolation obtenue pour chacune des méthodes est comparé avec la carte d'écoulement préliminaire ou notre interprétation de l'écoulement. Les bassins et les directions d'écoulement peuvent être tracés afin d'aider au choix de la meilleure représentation.

Si les interpolations précédentes ne sont pas satisfaisantes, des points de mesure supplémentaires doivent être ajoutés. Les nouveaux points peuvent être des mesures de terrain, des mesures provenant du système d'information hydrogéologique (SIH) relevées à une date proche de la période de mesure ou des approximations de la surface piézométrique issues de la connaissance du terrain. Les deux derniers types de mesure doivent être utilisés avec parcimonie à cause de l'impossibilité à contrôler la qualité de l'information. Ce type de données ne devrait jamais excéder 10 % du nombre total de mesures.

3.4 Présentation – Mise en carte

Le but de la présentation cartographique des résultats piézométriques est de montrer la dynamique de l'écoulement de l'eau souterraine et de faire la synthèse de toute l'information s'y rattachant. Pour ce faire, les huit types d'information de base définis ci-dessous doivent figurer sur la carte piézométrique.

D'abord, l'aquifère d'intérêt doit être clairement identifié. S'il en existe plusieurs, ceux-ci doivent être présentés sur des cartes séparées. Ensuite, les isopièzes sont exprimés de préférence en mètres au-dessus du niveau moyen de la mer. Les intervalles des contours varient de 5 ou 10 mètres en fonction de l'échelle de la carte. Pour ce qui est des limites des principaux bassins d'écoulement hydrogéologiques et des directions principales d'écoulement, elles doivent être présentées sur la carte. Si l'aquifère est délimité par des limites physiques, celles-ci doivent être indiquées. Les points d'intérêt hydrogéologiques incluent quant à eux les zones de résurgence, les zones de condition artésienne et les cours d'eau en lien hydraulique avec l'aquifère d'intérêt. Concernant les points d'extraction d'eau souterraine, ils comprennent les principaux ouvrages de captage présents sur le



territoire (ex. : puits municipaux, carrières). Les points de mesure utilisés pour l'élaboration de la carte doivent également être indiqués avec une référence à l'élévation du niveau piézométrique et au type de point de mesure (ex. : cours d'eau, puits). La méthode d'interpolation des mesures (ex. : triangulation, krigeage) ainsi que les différents paramètres d'ajustement de la méthode doivent aussi être précisés dans la légende. Enfin, la période de mesure ainsi que la période du cycle hydrologique correspondante doivent être spécifiées dans la légende.

Pour illustrer les différents éléments cartographiques de la carte piézométrique, plusieurs légendes ont été établies (Struckmeier et Margat, 1995; UNESCO, 1975; Vrba et Zaporozec, 1994; ANON, 1970 et 1983). L'utilisation de ces légendes favorise la standardisation des cartes hydrogéologiques. Cependant, d'autres représentations plus appropriées à certains contextes particuliers peuvent être utilisées.

3.5 Conclusion

Le tableau 3.1 présente une synthèse de la procédure d'élaboration d'une carte piézométrique régionale. Dans cette procédure, le traitement préliminaire des données constitue l'étape la plus importante. Cette étape peut représenter jusqu'à 50 % de la tâche totale lorsque l'information nécessaire n'est pas répertoriée ni standardisée. Mais par dessus tout, c'est parce que cette étape permet d'assurer l'efficacité des levés de terrain et la qualité du produit final qu'elle est cruciale.

La base du traitement préliminaire est la sélection des points de mesure et l'évaluation des erreurs minimale et anticipée. La sélection des points de mesure se fonde sur l'identification des bassins d'écoulement et de leurs composantes à l'aide d'une carte préliminaire d'écoulement. La réalisation d'une telle carte préliminaire et de son découpage en bassins d'écoulement est réalisée afin d'anticiper la compréhension de l'écoulement et d'accentuer la recherche de points de mesure dans les endroits où l'écoulement est moins bien défini. De plus, cette procédure permet d'estimer la densité des points de mesure nécessaires et de faciliter par le fait même la planification des levés de terrain.

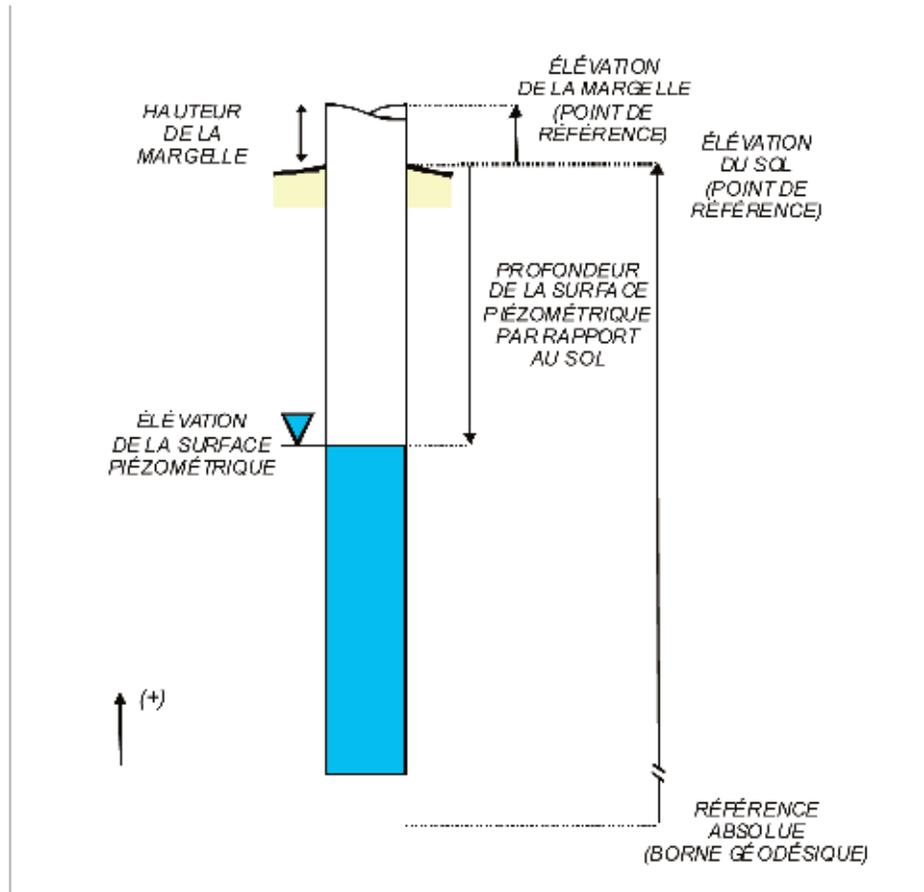
L'équation 3.2, appliquée pour le calcul de l'erreur minimale, donne un ordre de grandeur de l'erreur acceptable et elle est utilisée surtout pour éviter des erreurs d'interprétation flagrantes (ex.: écoulement en sens inverse de l'eau souterraine par rapport à un cours d'eau en contact hydraulique avec l'aquifère). L'évaluation de l'erreur de mesure anticipée est réalisée surtout pour valider les méthodes de mesure de la profondeur et de l'élévation du niveau statique, et pour vérifier la représentativité des mesures. Cette dernière vérification est essentielle lorsque des puits domestiques servent de points de mesure dans des formations peu perméables. Dans certains contextes, l'utilisation de tels points de mesure peut être à proscrire, à moins que des actions particulières ne soient entreprises pour s'assurer que les niveaux statiques ne sont pas influencés par le pompage.

Le niveau technique pour effectuer les levés de terrain est minimal. Cependant, le temps nécessaire pour se déplacer entre les points de mesure peut être considérable. C'est pourquoi la préparation au préalable d'une bonne feuille de route, la sélection de points de mesure supplémentaires et l'assurance d'avoir les droits d'accès requis aux puits désirés peuvent considérablement réduire le temps alloué à cette tâche. De plus, l'interpolation des mesures ne devrait pas nécessiter de traitement particulier. Pour ce faire, les mesures doivent être exactes, suffisantes et distribuées uniformément sur la zone d'étude. Finalement, il faut garder en tête qu'aucune méthode d'analyse ne peut se substituer à des mesures de qualité et qu'il faut toujours s'assurer de la représentativité et de l'exactitude des mesures prises sur le terrain.

Figure 3.1 Schématisation de la mesure de l'élévation de la surface piézométrique.

L'élévation de la surface piézométrique est donnée par :

$$\begin{pmatrix} \text{élévation} \\ \text{de la surface} \\ \text{piézométrique} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{élévation} \\ \text{du sol} \\ \text{(référence)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{hauteur} \\ \text{de la} \\ \text{margelle} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{profondeur} \\ \text{du niveau statique} \\ \text{à la margelle} \end{pmatrix}$$



Notons que le point de référence aurait pu aussi bien être le dessus de la margelle. Dans ce cas, la mesure de la hauteur de la margelle n'est plus nécessaire. La profondeur est négative lorsque la surface piézométrique est sous la surface du sol et positive lorsqu'elle est au-dessus (ex. : puits coulant).

Figure 3.2 Représentation schématique tridimensionnelle de la surface piézométrique d'un bassin d'écoulement et de ses composantes.

Le concept de bassin d'écoulement est analogue à celui de bassin versant (ou hydrologique) utilisé en hydrologie (Liamas, 1985).

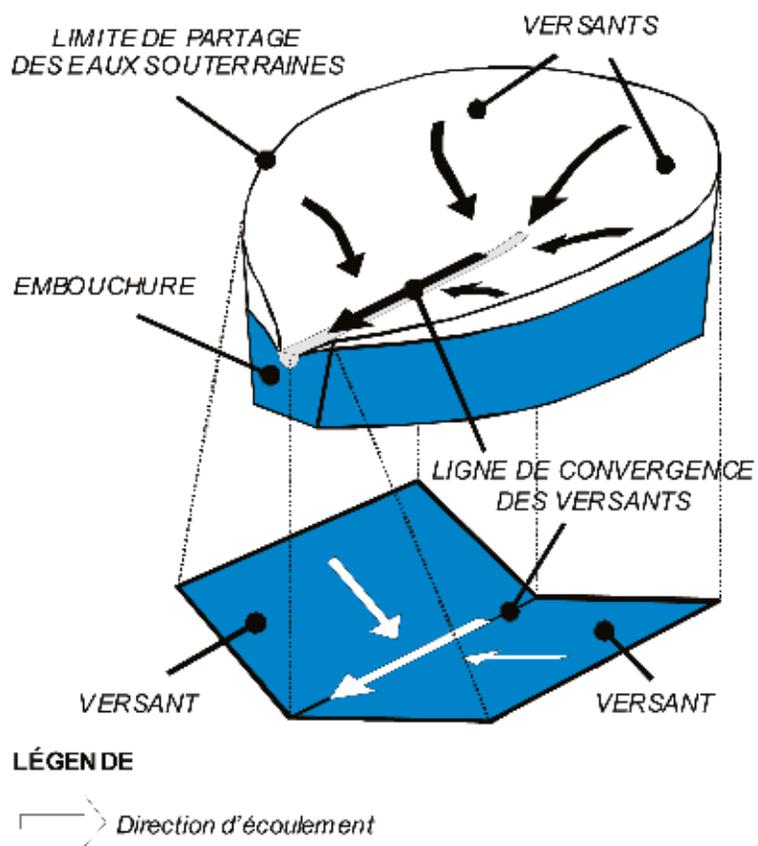
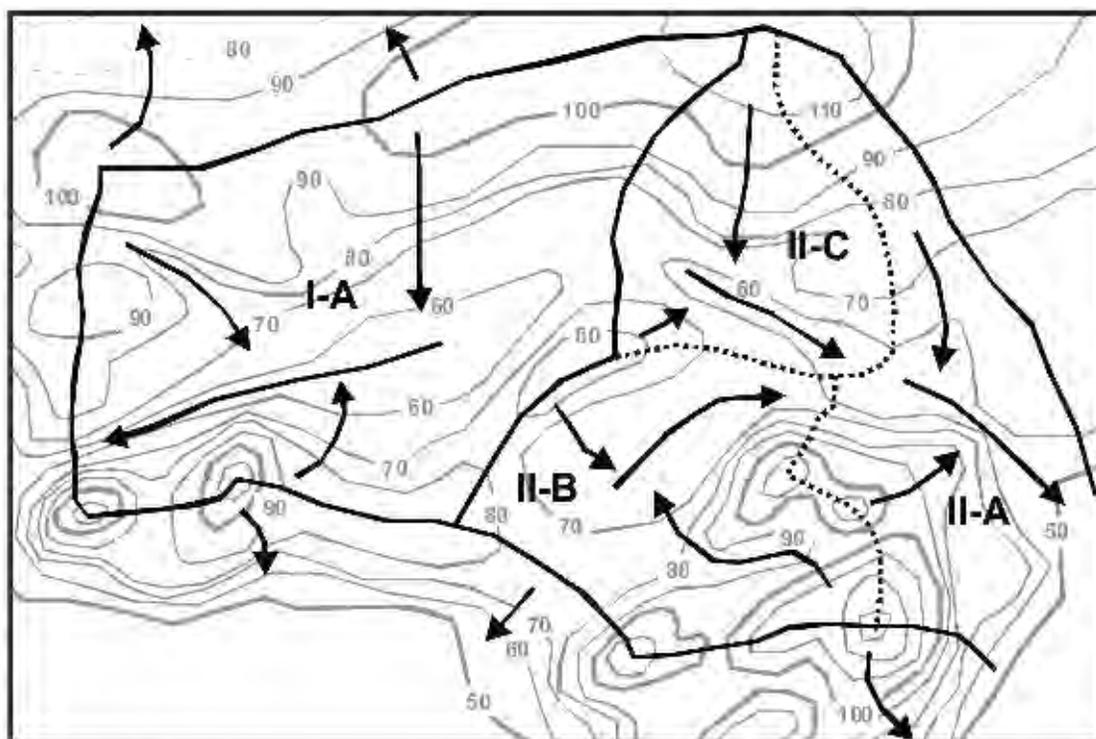


Figure 3.3 Délimitation des bassins d'écoulement et de leurs composantes à l'aide de la carte d'écoulement préliminaire.



LÉGENDE

— Limite de partage des eaux ou limite de bassin

..... Limite de sous bassin

— 60 — Isopièze (carte d'écoulement préliminaire)

→ Direction d'écoulement

II-A Numérotation du bassin

Figure 3.4 Distribution optimale des points de mesure à l'intérieur d'un bassin d'écoulement hypothétique.

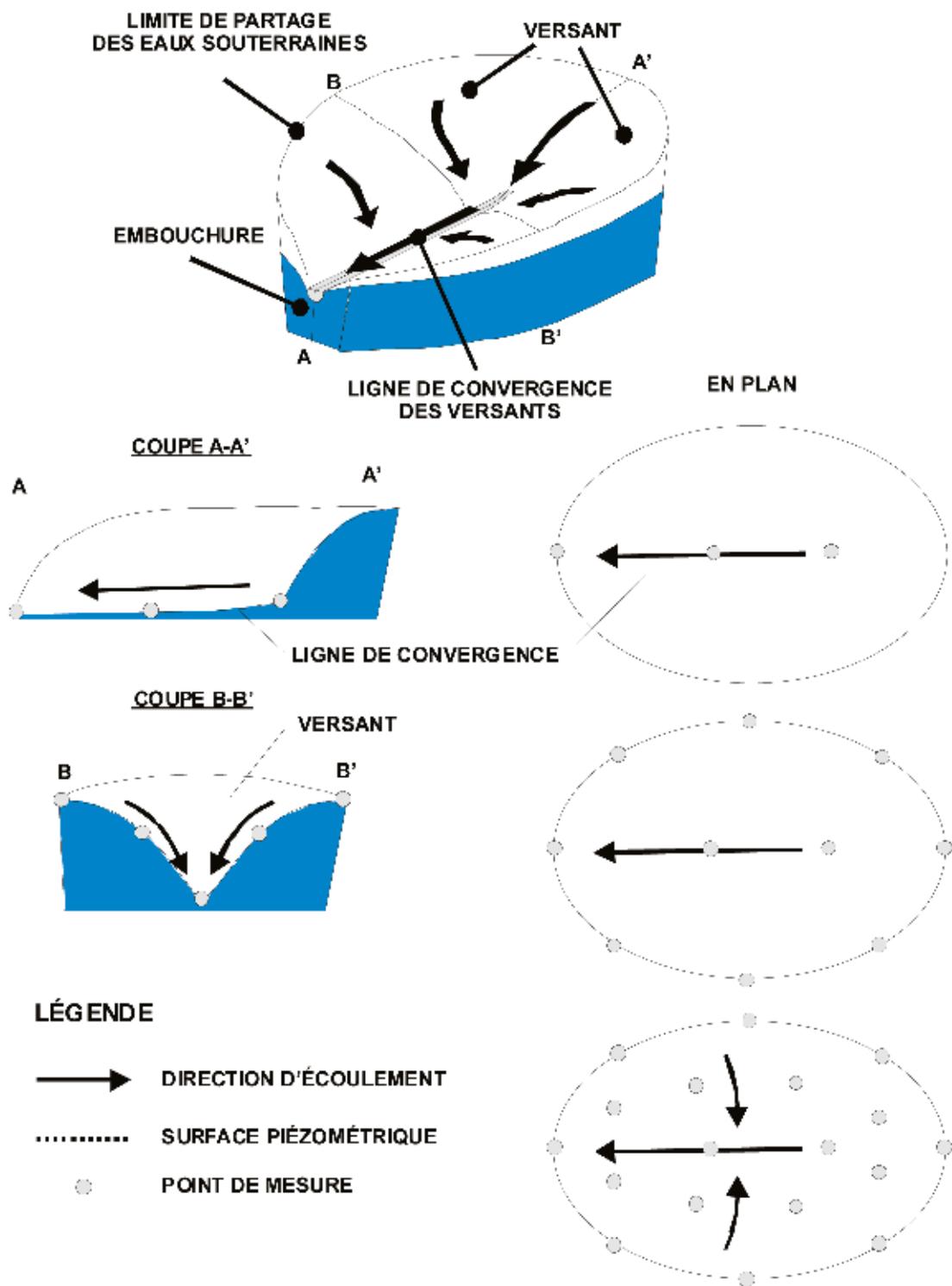
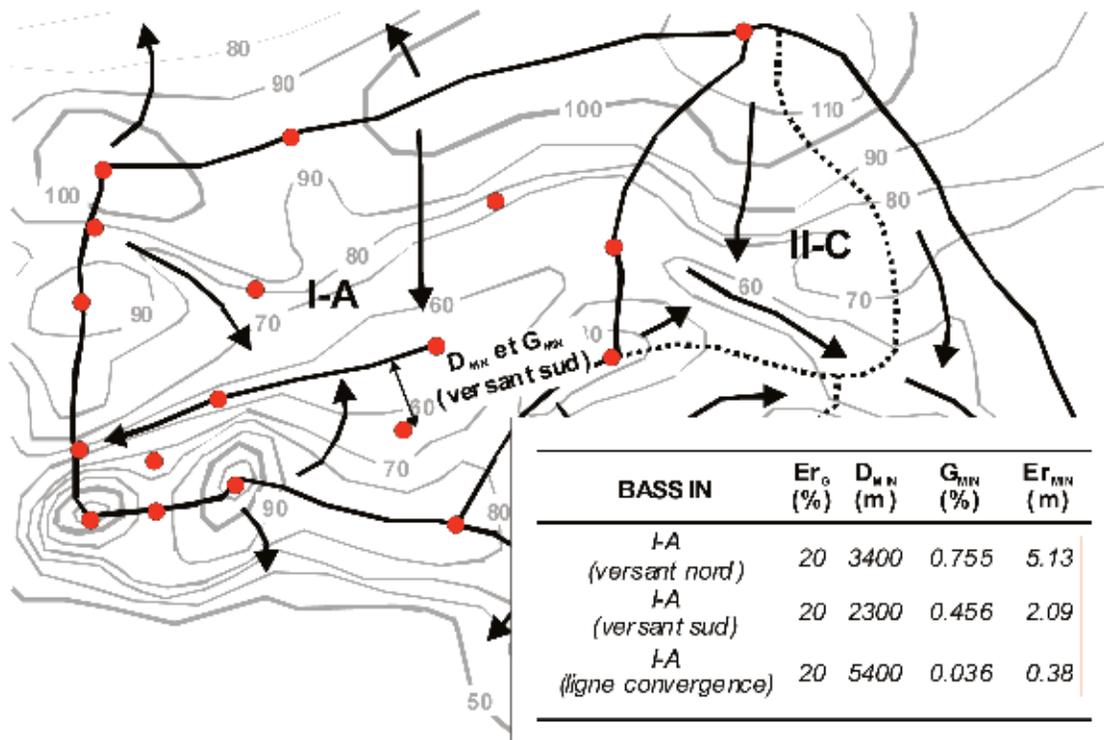


Figure 3.5 Distribution des points de mesure pour un bassin d'écoulement de forme hétérogène et calcul de l'erreur minimale de mesure pour chacune des composantes des bassins et des sous-bassins d'écoulement.

L'erreur minimale (Er_{MIN}) est donnée par l'équation 3.1. Notons que la distance minimale de séparation (D_{MIN}) ne coïncide pas nécessairement avec le gradient minimal (G_{MIN}). On observe dans cet exemple de calcul que l'exactitude nécessaire pour la ligne de convergence est beaucoup plus importante que pour les versants.

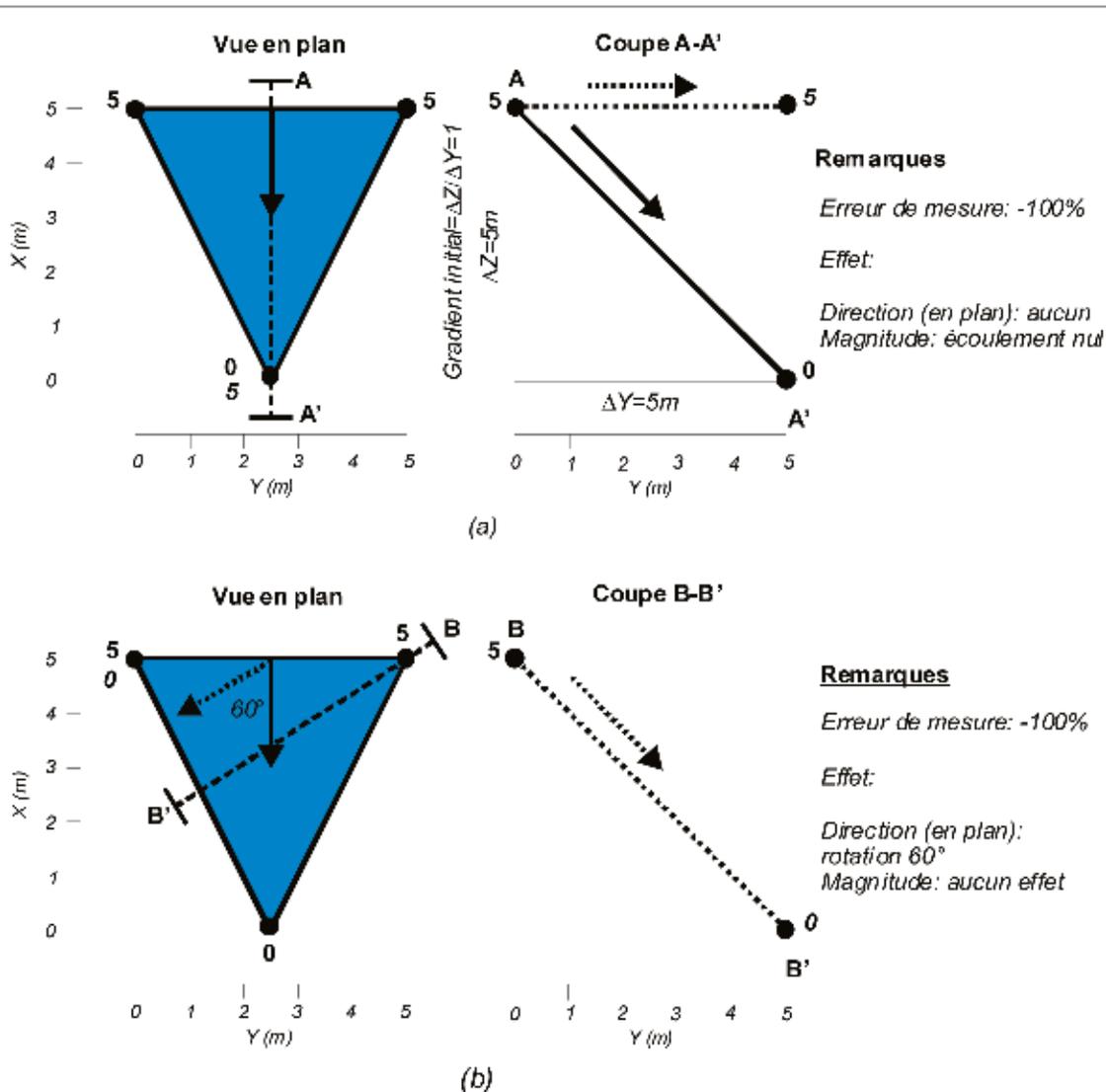


LÉGENDE

- Limite de partage des eaux ou limite de bassin
- Limite de sous bassin
- 60 — Iso piéze (carte d'écoulement préliminaire)
- Point de mesure
- Direction d'écoulement
- I-A** Numérotation du bassin

Figure 3.6 Effet de l'erreur de mesure sur la direction d'écoulement et la magnitude du gradient piézométrique : (a) erreur sur un point de mesure localisé parallèlement à l'écoulement; (b) erreur sur un point de mesure localisé perpendiculairement.

L'erreur est de 100 % lorsque celle-ci est égale à la différence de niveau piézométrique entre deux mesures.



LÉGENDE

- | | | | |
|--|--------------------------------------|--|--|
| | Direction d'écoulement (sans erreur) | | Points de mesure |
| | Direction d'écoulement (avec erreur) | | 5 Niveau piézométrique sans erreur (m) |
| | | | 0 Niveau piézométrique avec erreur (m) |

Figure 3.7 Graphique des mesures d'élévation estimées à l'aide des cartes topographiques en fonction des élévations mesurées par une méthode exacte.

Les points de validation utilisés sont des puits nivelés à l'aide d'un niveau électronique. Ces puits sont répartis uniformément sur l'ensemble de la région d'étude. Le point de référence commun utilisé pour la comparaison est le sol. Dans cet exemple, l'erreur induite par les cartes topographiques est considérée inférieure à 1,06 m.

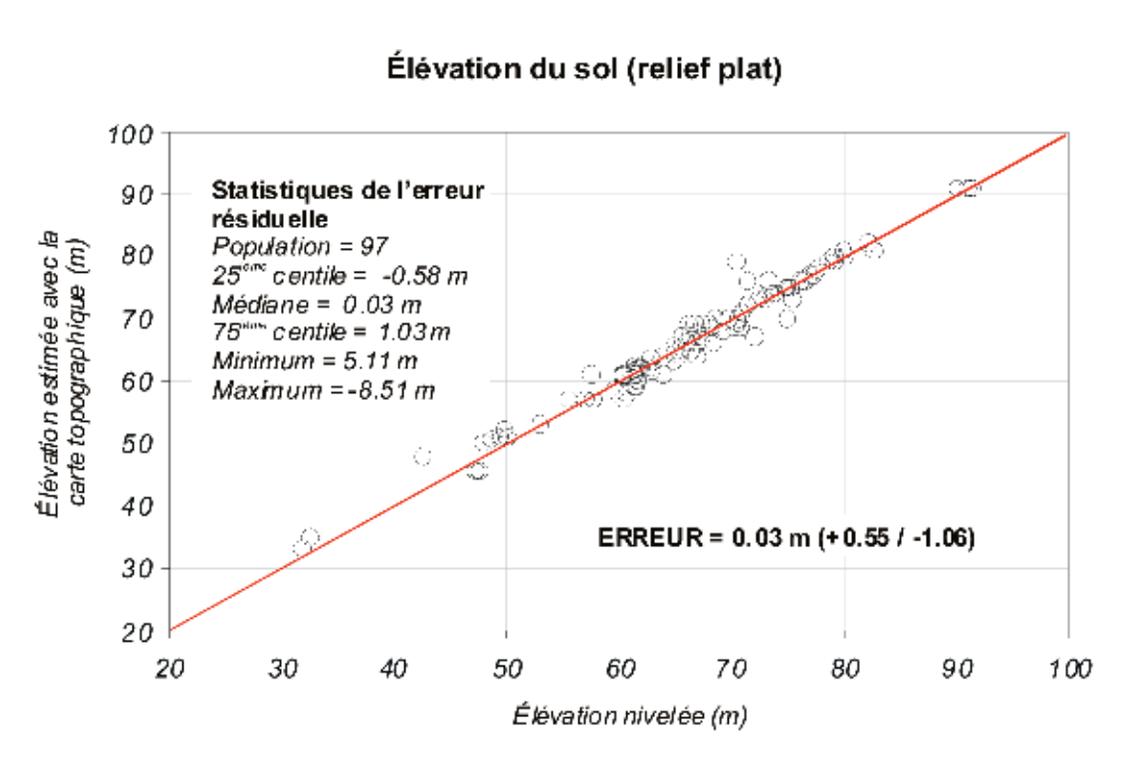


Figure 3.8 Exemple d'hydrogramme de puits.

Un hydrogramme est la représentation graphique de la mesure de l'élévation de la surface piézométrique en fonction du temps. Cet outil est généralement utilisé pour connaître les fluctuations naturelles de la surface piézométrique. Pour ce faire, les mesures doivent être prises dans un puits d'observation non influencé par le pompage (mesures directes et indirectes).

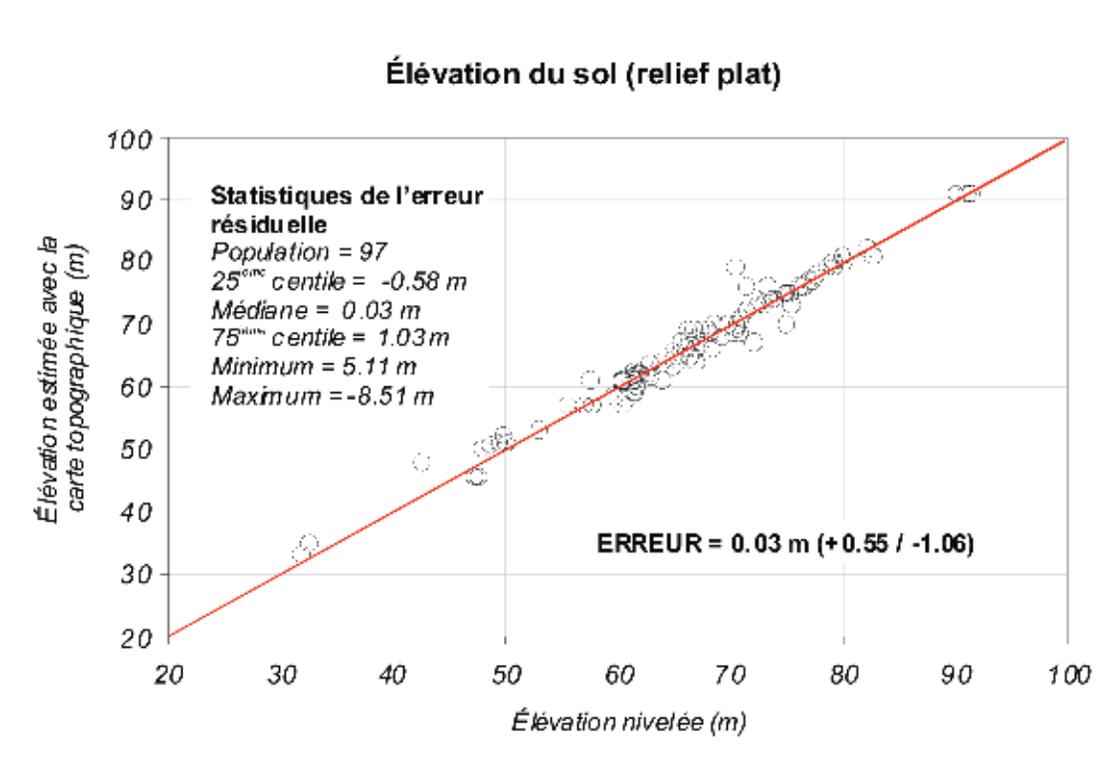


Figure 3.9 Hydrogramme d'un puits domestique pour évaluer la représentativité des niveaux statiques.

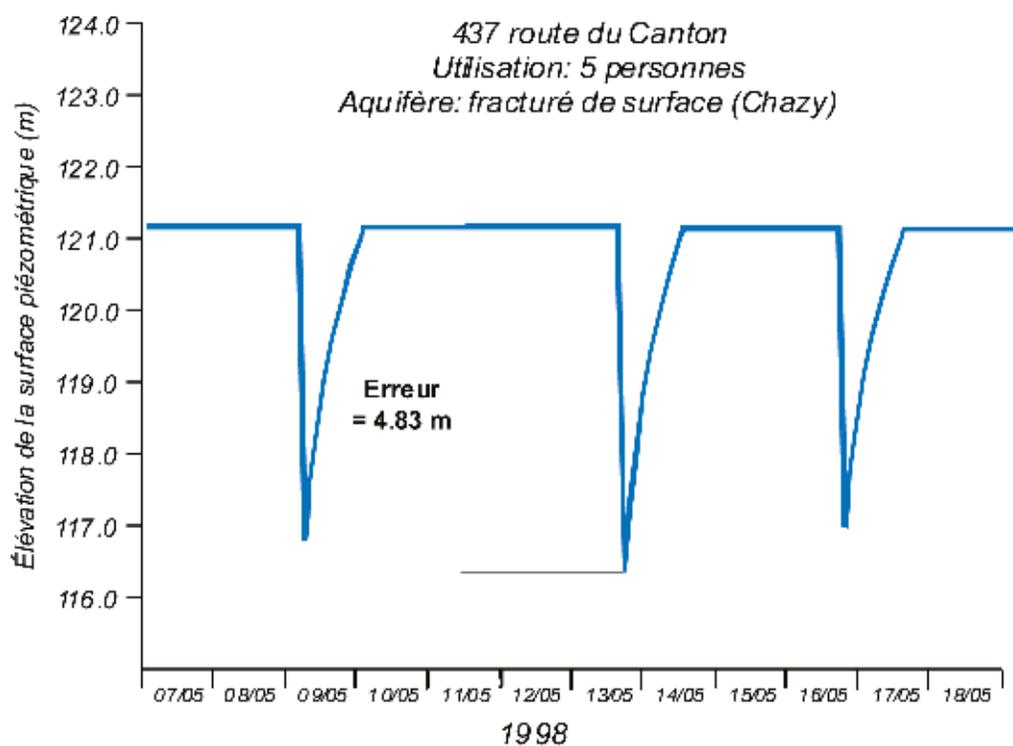
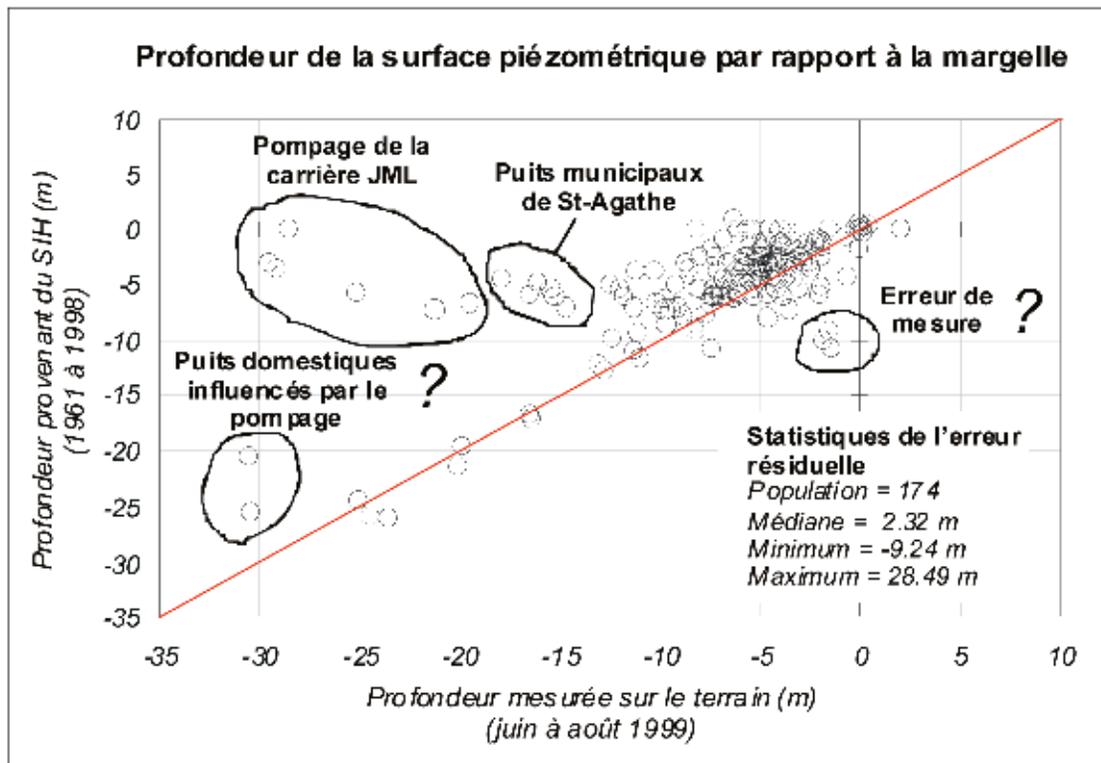


Figure 3.10 Graphique des profondeurs de la surface piézométrique mesurées lors de l'aménagement des puits en fonction des mesures prises sur le terrain.

On observe que l'écart entre les deux séries de mesure est parfois considérable. Une inspection approfondie montre que certains de ces points de mesure sont affectés par le pompage d'une carrière et d'un puits municipal. Cependant, d'autres écarts observés ne peuvent être expliqués avec certitude (puits domestiques influencés par le pompage ou erreur de mesure) et ces mesures seront alors retirées de la banque de données.



**Tableau 3.1 Synthèse de la procédure d'élaboration
d'une carte piézométrique régionale.**

3.1 TRAITEMENT PRÉLIMINAIRE
3.1.1 Récolte des données existantes
a. Puits d'observation, piézomètres, puits domestiques
b. Principaux points d'extraction d'eau souterraine
3.1.2 Sélection des points de mesure
a. Carte d'écoulement préliminaire
b. Bassins d'écoulement et leurs composantes
c. Distribution des points de mesure
d. Sélection des points de mesure
3.1.3 Évaluation de l'erreur minimale de mesure
a. Application de l'équation 3.1
3.1.4 Évaluation de l'erreur de mesure anticipée
a. Validation des méthodes de mesure
b. Période de mesure (choix et mesure de l'erreur)
c. Représentativité des niveaux statiques
3.2 LEVÉS DE TERRAIN
3.2.1 Localisation des points de mesure
3.2.2 Vérification du lien hydraulique
3.2.3 Mesure de la profondeur de la surface piézométrique
3.2.4 Mesure de l'élévation du point de référence
3.2.5 Validation des mesures
a. Représentation graphique des niveaux statiques
b. Vérification spatiale des mesures
3.3 INTERPOLATION DES MESURES
a. Choix de l'interpolateur et interpolation
b. Visualisation de l'interpolation
c. Ajout de mesures supplémentaires
3.4 PRÉSENTATION – MISE EN CARTE
a. Mise en carte des isopièzes et de l'information d'intérêt hydrogéologique

4. CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES

Miroslav Nastev

4.1 Introduction

Les paramètres hydrauliques d'un système aquifère comprennent l'épaisseur saturée, la conductivité hydraulique, la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et la porosité effective. Ils permettent l'évaluation quantitative de la dynamique d'un aquifère, notamment de l'effet de la recharge, de l'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère sous des gradients hydrauliques et de l'effet du pompage de l'eau. Les propriétés hydrauliques d'un aquifère peuvent être estimées à l'échelle locale et intermédiaire à l'aide d'essais hydrauliques, ou encore à l'échelle régionale grâce à la méthode graphique par réseau d'écoulement et au calage des modèles numériques de l'écoulement souterrain.

L'écoulement souterrain dans les aquifères rocheux se fait surtout à travers les fractures des roches et, dans certains cas, dans leur matrice poreuse. L'hétérogénéité du milieu constitue le problème central de la caractérisation des aquifères composés de roches sédimentaires fracturées et de l'estimation de leurs propriétés hydrauliques. Cette hétérogénéité résulte de l'histoire complexe des roches (déposition, lithification, déformation tectonique, érosion, etc.) et peut être d'une importance prépondérante pour l'écoulement souterrain. La variation des propriétés hydrauliques des unités rocheuses est à la fois latérale et verticale. Les couches caractérisées par une fracturation et une altération élevées représentent des conduits préférentiels de l'écoulement souterrain, lorsqu'encaissées par des strates moins perméables. L'orientation, l'étendue spatiale et le degré d'interconnexion sont également importants pour comprendre l'écoulement souterrain. Les principaux conduits de l'écoulement peuvent souvent se situer le long de plans horizontaux et contrôler à eux seuls la majeure partie de la perméabilité. Des variations de la conductivité hydraulique de plusieurs ordres de grandeur sont souvent remarquées pour une même unité de roche sédimentaire. Ainsi, deux puits de pompage distants de quelques mètres et interceptant la même formation lithologique n'ont pas nécessairement la même productivité, ou encore, deux puits d'observation situés à la même distance du puits de pompage peuvent montrer des rabattements fort différents si l'un des deux intercepte un réseau de fractures alimentant le puits de pompage.

L'estimation des propriétés hydrauliques représentatives d'un milieu hétérogène présente plusieurs problèmes nécessitant des méthodologies souvent différentes de celles qui sont normalement appliquées pour un aquifère granulaire. Deux approches peuvent être appliquées pour la définition de ces propriétés : l'approche déterministe et l'approche stochastique. La première approche est habituellement appliquée pour des études régionales telles que celle qui est préconisée pour la cartographie systématique. Elle consiste en un programme de forages et d'essais hydrauliques dans le but d'obtenir plusieurs données représentatives de la région étudiée. Cependant, l'obtention d'une couverture adéquate par des forages et des essais hydrauliques est souvent entravée par les ressources financières et logistiques. La précision de la prédiction des propriétés hydrauliques peut être augmentée en appliquant un co-krigeage reliant les résultats de plusieurs méthodes de caractérisation des roches telles que les levés géophysiques ou des modèles de faciès (USGS, 2000). La deuxième approche définit l'hétérogénéité comme une propriété stochastique. Cette méthode considère la propriété hydraulique donnée comme une valeur aléatoire avec une moyenne et un écart-type établis selon les données disponibles. Par la suite, on génère plusieurs champs de la propriété hydraulique et on observe leur vraisemblance à l'aide des modèles numériques d'écoulement. La valeur de la propriété hydraulique peut aussi être conditionnée aux endroits où les données sont déjà existantes. Évidemment, la précision de la méthode stochastique dépend de la disponibilité des données de terrain. Elle est souvent appliquée après l'approche déterministe, et ce, pour tester différentes variantes de la distribution spatiale de la propriété hydraulique.

Un aspect souvent négligé lors de la caractérisation des milieux hétérogènes est l'effet d'échelle. L'échelle de caractérisation des propriétés hydrauliques est locale (mètres à dizaines de mètres), intermédiaire (dizaines à centaines de mètres), à l'échelle de l'aquifère ou régionale (dizaines de kilomètres). L'effet d'échelle fait en sorte que la conductivité hydraulique varie selon le volume de roche étudié et la méthode d'essai.



Dans ce chapitre, on présente l'approche déterministe et le cheminement utilisé pour caractériser les propriétés hydrauliques des aquifères rocheux sédimentaires à l'échelle régionale. La méthodologie des divers types d'essais hydrauliques nécessaires pour obtenir la conductivité hydraulique et l'emmagasinement est également présentée. La plupart de ces essais s'appliquent aux milieux granulaires, mais ils peuvent également être appliqués aux roches sédimentaires fracturées. Il est supposé que la fracturation des roches et les volumes d'aquifère étudiés par les essais hydrauliques sont assez élevés pour permettre l'approximation d'un milieu poreux équivalent. On donne dans le présent guide des détails pour les essais hydrauliques qui ne sont pas décrits par Chapuis (1999), comme l'essai à l'aide d'obturateurs pneumatiques, l'essai de perméabilité in situ avec une réponse oscillatoire et l'utilisation de la capacité spécifique pour l'estimation de la transmissivité. Ce chapitre présente aussi la compilation des données et des exemples pour illustrer les résultats. Les données du projet de caractérisation hydrogéologique dans les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec seront utilisées à cette fin (Nastev *et al.*, 2000; Savard *et al.*, 2000; Cloutier *et al.*, 2000; Nastev *et al.*, 2001; Hamel *et al.*, 2001; Cloutier *et al.*, 2001; Karanta *et al.*, 2001).

4.2 Compilation des données existantes

4.2.1 Définitions de base

Les trois principaux types d'aquifères sont les suivants :

- *l'aquifère confiné* est celui qui est compris entre deux couches peu perméables. Il est entièrement saturé et sa charge hydraulique est supérieure à la pression atmosphérique;
- *l'aquifère semi-confiné* est celui dont l'une ou les deux couches limites sont semi-perméables;
- *l'aquifère à nappe libre* repose quant à lui sur une couche peu perméable ou semi-perméable et il est partiellement saturé. La surface libre est toujours égale à la pression atmosphérique.

L'écoulement de l'eau souterraine dans un aquifère peut se faire de deux façons : en régime permanent, l'écoulement de l'eau est stabilisé et il ne varie jamais; en régime transitoire, l'écoulement n'est pas stabilisé et il varie au cours du temps.

Les paramètres hydrauliques d'un aquifère sont :

- l'épaisseur saturée, b ;
- la transmissivité, T ;
- la conductivité hydraulique, K ;
- le coefficient d'emmagasinement, S ;
- l'emmagasinement spécifique, S_s ;
- la porosité efficace, n_e ;
- le gradient hydraulique, i .

Dans le cas d'un aquifère confiné, *l'épaisseur saturée*, b , est mesurée du plancher au toit de l'aquifère. Dans le cas d'un aquifère à nappe libre, la limite supérieure variable de l'aquifère est représentée par la surface libre. Le plancher d'un aquifère dans un milieu sédimentaire fracturé est difficile à définir, car l'espace disponible à l'écoulement diminue graduellement avec la profondeur, et la transition entre les unités aquifères et les aquitards n'est pas toujours une surface clairement définie. Il est plus approprié de parler d'une épaisseur d'aquifère exploitable, par exemple allant de 100 à 200 m de profondeur comme dans le cas des Basses-Terres du Saint Laurent dans le sud-ouest du Québec. On suppose alors que, grâce à un écoulement principalement horizontal, le transfert d'eau à travers ce plancher fictif est négligeable par rapport au taux d'écoulement moins profond.



Cette supposition est appuyée par le fait que près de la surface, la connectivité des fractures et l'altération de la matrice des roches sédimentaires sont beaucoup plus élevées, ce qui fait que l'écoulement à de plus grandes profondeurs est beaucoup moins important que celui qui est près de la surface. La *transmissivité* d'un aquifère, T , est la mesure de la quantité d'eau qui s'écoule horizontalement à travers l'épaisseur saturée sous un gradient hydraulique unitaire (Fetter, 1980). Elle est directement liée à la *conductivité hydraulique* par la relation $T = K \times b$ (m²/s). Pour un aquifère multicouche, la transmissivité horizontale est la somme des transmissivités pour chaque couche T_i , $T = \sum T_i$. Le *coefficient d'emmagasinement*, S , est défini comme la quantité d'eau qu'un aquifère relâche ou emmagasine par unité de surface d'aquifère d'épaisseur b , lorsque la charge hydraulique varie d'une unité (Chapuis, 1999). L'*emmagasinement spécifique* est quant à lui défini comme la quantité d'eau relâchée ou emmagasinée par un volume unitaire d'aquifère saturé lorsque la charge hydraulique varie d'une unité. Il provient de la compressibilité de la matrice rocheuse et de l'eau interstitielle. À l'instar de T et K , le coefficient d'emmagasinement est lié à l'emmagasinement spécifique S_s selon la relation $S = S_s \times b$. Le coefficient d'emmagasinement est fondamental pour comprendre la réponse d'un aquifère en régime transitoire, tandis que pour un écoulement en régime permanent, c'est la transmissivité de l'aquifère qui est essentielle. Le rapport entre la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, T/S (K/S_s), est défini comme la *diffusivité* de l'aquifère. La diffusivité détermine la vitesse de la propagation du changement de la charge hydraulique dans un aquifère (à la suite de pompages, de recharges, des effets de marées, etc.). La *porosité efficace*, n_e , est déterminée par le rapport entre le volume des fractures ou des pores qui contribuent à l'écoulement souterrain et le volume total de roches où l'évaluation est faite. Elle contribue à définir la *vitesse d'écoulement* souterrain, $K \times i/n_e$, où i est le gradient hydraulique qui définit le changement de la charge hydraulique dans la direction de l'écoulement souterrain. En raison des forces capillaires et de l'adsorption de l'eau, la porosité efficace est toujours moindre que le volume total des vides. Dans le cas d'un aquifère à nappe libre, où l'eau est mobilisée par drainage gravitationnel, le coefficient d'emmagasinement correspond à la porosité efficace.

Les propriétés principales sont la transmissivité, T , et le coefficient d'emmagasinement, S . Pour des aquifères constitués de roches sédimentaires fracturées tels le grès, la dolomie et le calcaire, la plage de valeurs de la transmissivité peut varier de plusieurs ordres de grandeur. Pour une épaisseur moyenne de l'aquifère allant jusqu'à 100 m, Freeze et Chery (1979) donnent des valeurs typiques de la transmissivité entre 10^{-8} et 10^{-3} m²/s. Dans le présent guide, pour les besoins de comparaison des résultats, les valeurs de conductivité hydraulique correspondantes seront utilisées plutôt que celles de la transmissivité. La valeur du coefficient d'emmagasinement est typiquement de l'ordre de 5×10^{-5} à 5×10^{-3} pour un aquifère confiné, et de l'ordre de 0,01 à 0,3 pour un aquifère à nappe libre (Freeze et Chery, 1979). En raison de leur acquisition relativement difficile et coûteuse (uniquement à l'aide d'essais de pompage avec des mesures de niveau d'eau dans des puits d'observation) et de leur variation relativement plus faible que celle de la transmissivité, des valeurs typiques du coefficient d'emmagasinement peuvent être considérées lors d'une étude régionale. Les essais hydrauliques effectués dans les roches sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec ont révélé une conductivité hydraulique globale de $2,6 \times 10^{-5}$ m/s avec un écart type des logarithmes de 0,9. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement variaient entre 5×10^{-5} et 4×10^{-3} avec une moyenne géométrique de 4×10^{-4} . Un essai de pompage dans des conditions d'écoulement à nappe libre a indiqué un coefficient d'emmagasinement (porosité efficace) de 1 % (Nastev et al., 2001).

La compilation des données pour les paramètres hydrauliques relevés dans la région au moment d'études hydrogéologiques constitue une première étape pour la cartographie régionale. Ces données sont utiles pour la définition initiale des propriétés hydrauliques et la planification des travaux de terrain (voir aussi le chapitre 1). Dans certains cas, il peut s'avérer que l'information existante soit suffisante pour l'étude. Des travaux de terrain additionnels doivent être entrepris seulement si l'information existante ne couvre pas adéquatement la région étudiée.



Les données existantes peuvent fournir des informations qui sont directement ou indirectement liées aux propriétés hydrauliques : géologie de la région, délimitation verticale et spatiale des unités aquifères et des aquitards, piézométrie et qualité de l'eau souterraine, propriétés hydrauliques des aquifères, et modèle conceptuel préliminaire de l'écoulement souterrain. Les études concernant la recherche en eau d'approvisionnement des municipalités et des industries qui nécessitent d'importants débits (pisciculteurs) de même que les rapports de caractérisation d'aquifères appartenant aux embouteilleurs représentent des sources de données de grande valeur. Ces études comprennent une description hydrogéologique détaillée de l'aquifère, au moins un essai de pompage de longue durée (72 heures et plus) et l'interprétation ainsi que la présentation des résultats obtenus. En plus de la stratigraphie décrite et des niveaux d'eau mesurés, l'annuaire des puisatiers du MDDEP contient aussi des valeurs de la capacité spécifique que l'on peut tirer des estimations de la transmissivité de l'aquifère intercepté. Les rapports internes des municipalités incluent généralement un suivi des débits pompés et des rabattements observés aux puits d'approvisionnement en eau de même qu'aux puits d'observation. Finalement, les rapports techniques des compagnies de consultation peuvent eux aussi renfermer des données intéressantes pour l'étude régionale. Ils traitent surtout de problèmes environnementaux liés aux sites d'enfouissement, de divers sites contaminés ou simplement de sites industriels propices à une contamination, et ils s'appuient souvent sur des données de niveaux d'eau recueillies dans plusieurs puits d'observation et lors d'essais de perméabilité *in situ*.

4.2.2 Validation des données

Toutes les données existantes doivent être vérifiées, validées et réinterprétées à la lumière des connaissances actuelles. Au moment de la création de la banque de données, les coordonnées X et Y des puits, la stratigraphie des dépôts meubles, la lithologie et les autres doivent être vérifiées pour l'ensemble des données. Cependant, il reste plusieurs autres vérifications à faire avant d'utiliser ces données pour la caractérisation des propriétés hydrauliques du système aquifère.

Les débits et la durée de pompage ainsi que les rabattements relatifs à l'essai de perméabilité présentés dans l'annuaire des puisatiers du MDDEP nécessitent un triage approfondi. Il faut éliminer toutes les données pour lesquelles les situations suivantes se présentent : le débit, le niveau statique ou le niveau dynamique ne sont pas indiqués; le niveau dynamique est plus élevé que le niveau statique; le puits testé s'est asséché pendant l'essai de productivité; le niveau dynamique est plus bas que les deux tiers de la hauteur saturée initiale pour satisfaire les conditions d'un écoulement horizontal et de faibles gradients hydrauliques où la composante verticale de la vitesse d'écoulement est négligeable (hypothèses de Dupuit); la durée de l'essai est plus courte que deux heures. Ce n'est qu'après ce triage que les résultats des essais de perméabilité qui satisfont aux critères peuvent être utilisés pour estimer la transmissivité de la formation interceptée.

Les rapports hydrogéologiques (de compagnies de consultation, de ministères, etc.) constituent normalement des sources de données de qualité. Il est quand même recommandé de réinterpréter les essais de pompage présentés dans les cas où de nouvelles connaissances, telles les conditions aux limites, la pénétration de l'aquifère ou l'utilisation d'une autre méthode d'interprétation et d'analyse des données, risquent de changer certains paramètres importants.

4.3 Détermination des propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques d'un aquifère (transmissivité T , coefficient d'emmagasinement S) sont déterminées par l'analyse des résultats des essais hydrauliques sur le terrain. D'autres informations peuvent également être obtenues, entre autres l'existence et les distances des conditions aux limites, les conditions de l'aquifère (confinées ou captives), le lien hydraulique entre différents aquifères et le suintement des couches juxtaposées. Certains essais de performance de l'installation de pompage donnent aussi les pertes de charge et l'efficacité du puits.



Le principe des essais hydrauliques est d'extraire ou d'injecter une quantité d'eau connue pour créer un rabattement ou une remontée de la nappe dans le puits testé. L'eau est injectée ou pompée à travers la section ouverte du puits, une crépine, un intervalle limité par des obturateurs pneumatiques ou, dans le cas extrême, à travers l'ouverture inférieure du tubage du puits. Le changement des niveaux d'eau est mesuré dans les puits d'observation ou dans le puits testé. La qualité de l'analyse et des données obtenues dépend de paramètres de l'essai, notamment de la durée, du nombre de points de mesure et de la méthode d'interprétation. Idéalement, les niveaux d'eau sont mesurés avant, pendant et à l'arrêt du pompage ou de l'injection. Les graphiques des rabattements en fonction du temps ou de la distance sont utilisés pour résoudre les équations d'écoulement décrivant la relation entre le débit pompé, les propriétés hydrauliques et les variations de la nappe observées.

Plusieurs essais hydrauliques existent et peuvent être appliqués selon le type de données voulues et selon l'équipement disponible. Les essais hydrauliques à l'aide d'obturateurs pneumatiques (essais Lugeon) sont réalisés dans la section ouverte du puits et sont utilisés pour la définition verticale des unités aquifères (Houlsby, 1976; Zeigler, 1976). Les essais de perméabilité *in situ* (*slug test*) sont réalisés en effectuant un changement instantané du niveau d'eau dans le puits (Chapuis, 1999). Les essais de productivité consistent en des essais de pompage pour lesquels le débit du pompage est constant, et le rabattement final dans le puits testé est observé. Le ratio entre le débit pompé et le rabattement obtenu donne la capacité spécifique du puits qui est fonction de la transmissivité de l'aquifère. Finalement, le principe de l'essai de pompage est de pomper de l'eau à un débit constant et d'enregistrer le rabattement en fonction du temps dans le puits de pompage et dans les puits d'observation localisés en périphérie. Les essais de pompage durent habituellement longtemps, soit plusieurs jours ou semaines, et visent à obtenir les propriétés hydrauliques moyennes sur un grand volume de l'aquifère. Les propriétés hydrogéologiques des aquifères peuvent également être obtenues indirectement par la méthode graphique, par réseau d'écoulement et par calage des modèles numériques.

Les interprétations des données de rabattement ou de remontée sont généralement divisées en deux groupes :

- les méthodes en régime permanent donnent les valeurs de transmissivité et de conductivité hydraulique; dans leur cas, les paramètres tels le débit et les niveaux d'eau sont indépendants du temps;
- les méthodes en régime transitoire donnent, en plus des paramètres du régime permanent, l'emmagasinement et dans certains cas les conditions aux limites de l'aquifère.

Le tableau 4.1 présente l'échelle, les avantages et les inconvénients des essais hydrauliques. Les meilleures références pour l'interprétation analytique des essais hydrauliques sont les documents de l'ASTM (1999), de Chapuis (1999), de Genetier (1997), de Kruseman et DeRidder (1990), et d'Osborne (1993). Il existe également sur le marché des logiciels avec des manuels d'utilisation assez exhaustifs, tels AQTESOLV et AQUIFERTEST.

4.3.1 Modèle conceptuel du site testé

Avant de commencer la planification d'un essai hydraulique, il est nécessaire d'avoir un modèle conceptuel de l'écoulement souterrain ainsi que les détails de construction du puits de pompage et des puits d'observation. L'information obtenue lors de la phase de collecte et de compilation des données existantes permet d'établir le modèle conceptuel initial du site par une idéalisation graphique des conditions hydrogéologiques.

Le modèle conceptuel contient de l'information qualitative. Il devrait donner la description générale de la stratigraphie, la délimitation verticale du système aquifère (confiné/non confiné, aquifère/aquitard), les zones de recharge et de résurgence avec la direction de l'écoulement, et l'emplacement des eaux de surface (voir aussi le chapitre 2). Si possible, il peut également définir les



conditions aux limites du système. Le degré de précision de cette description dépend de l'échelle et de la qualité des données existantes, mais aussi de la complexité des conditions sur place. Le modèle conceptuel assiste l'hydrogéologue en indiquant la distribution des unités hydrogéologiques, la localisation et la profondeur des puits ou des intervalles testés, et le type d'essai hydraulique qui a été appliqué.

La figure 4.1 présente le modèle conceptuel élaboré dans le cas du projet de caractérisation hydrogéologique dans les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec. L'aquifère régional consiste en une unité discontinue de sable et de gravier d'une épaisseur moyenne de moins de trois mètres, déposée immédiatement au contact des roches paléozoïques. Sur les premiers mètres, les roches sont très fracturées et occasionnellement altérées, et leur perméabilité est du même ordre de grandeur que celle de la couche de sable et de gravier. Les deux unités sont en contact hydraulique direct et forment une couche très perméable. La perméabilité des roches fracturées diminue avec la profondeur. Pour la majeure partie de la région étudiée, l'aquifère régional est confiné par des couches de till et d'argile d'épaisseur variable. Dans les zones de hauts topographiques, la couche d'argile est absente et l'aquifère devient semi-confiné sous la couche de till, ou à nappe libre dans les zones d'affleurements rocheux. Ce sont les zones de recharge.

Une deuxième considération importante est le choix de la représentation du milieu aquifère par un milieu discret ou par un équivalent en milieu poreux. Habituellement, pour les études régionales, le milieu poreux équivalent reste une meilleure supposition parce que la grandeur du territoire de la région ne permet pas de connaître adéquatement le milieu fracturé pour examiner un milieu discret. Le milieu poreux équivalent considère que les équations classiques de l'écoulement (la loi de Darcy) peuvent être appliquées à l'échelle de l'étude. Également, certains détails connus sur la fracturation (orientation et longueur des plans fracturés) peuvent être pris en considération lors des analyses avec le milieu poreux équivalent.

L'EPA (1991) énumère les critères suivants pour déterminer si le système fracturé se comporte comme un milieu poreux équivalent : la fracturation des roches est élevée, les ouvertures des fractures varient peu, l'orientation des fractures est uniformément distribuée dans toutes les directions, le rabattement dans les puits d'observation est proportionnel au débit de pompage, les courbes de rabattement dans les puits d'observation situés dans deux ou plusieurs directions ont une forme similaire, le cône de dépression est circulaire ou elliptique, et l'échelle de l'étude est grande. Finalement, le dernier critère implique que le milieu poreux équivalent n'est pas nécessairement applicable à l'échelle locale, où des caractérisations additionnelles seront requises.

Une fois le modèle conceptuel hydrogéologique du site établi et les lacunes dans l'information existante bien identifiées, on procède aux travaux de caractérisation par des essais hydrauliques. Les prochains paragraphes traitent des essais mentionnés au tableau 4.1.

4.3.2 Essai à l'aide d'obturateurs pneumatiques (essai Lugeon)

L'usage des essais à l'aide des obturateurs pneumatiques dans les projets à l'échelle régionale permet surtout de définir la variabilité verticale de la conductivité hydraulique, donc de délimiter verticalement les unités aquifères et les aquitards. Ce type d'essai est également applicable aux unités de faible perméabilité pour lesquelles des débits de pompage stables ne peuvent pas être maintenus. La plage de valeurs de conductivité hydraulique mesurée par ce type d'essai se situe entre 10^{-10} et 10^{-2} m/s. Ces limites sont imposées par la disponibilité d'eau pour l'injection et par la capacité de mesurer de faibles taux d'écoulement. La durée des essais varie d'une dizaine de minutes à quelques heures ou quelques jours, en fonction de la perméabilité rencontrée et du temps nécessaire pour que les charges dans l'intervalle testé se stabilisent.

L'équipement pour l'essai d'injection consiste habituellement en deux obturateurs pneumatiques utilisés pour limiter l'intervalle testé (figure 4.2.a). Dans certains cas, l'intervalle peut être limité par un obturateur et le fond du puits. Les obturateurs pneumatiques ont une tête mobile et une gaine



en caoutchouc renforcée d'acier. Une crépine d'acier perforé, de 2,5 à 5 cm de diamètre, relie les deux obturateurs. Un capteur à pression est installé entre les deux obturateurs pour mesurer la charge dans l'intervalle testé. Habituellement, une série de cinq réservoirs d'eau d'un diamètre de 0,01 à 0,3 m et munis d'un manomètre sert à approvisionner l'eau pour l'injection. De l'azote comprimé exerce une pression au-dessus du niveau d'eau dans les réservoirs et assure l'injection de l'eau. Un système de contrôle mesure la quantité d'eau injectée, tandis que le système d'acquisition de données enregistre le changement de la charge dans l'intervalle testé.

L'équipement incluant des obturateurs pneumatiques, la crépine et diverses tubulures pour le gonflement des obturateurs et pour l'injection de l'eau peut facilement peser plus de 500 kg. Ce poids impose l'utilisation de systèmes de manutention capables de descendre et de lever l'équipement dans le puits (figure 4.2.b).

Trois types d'essais peuvent être réalisés à l'aide des obturateurs pneumatiques (figure 4.3) : l'injection à charge constante, le pompage à taux constant et l'essai de perméabilité *in situ* (*pulse test*). L'essai à charge constante est considéré comme standard pour l'évaluation des propriétés hydrauliques des roches fracturées (NRC, 1996). Les étapes de l'essai sont les suivantes : installation et gonflement des obturateurs pneumatiques délimitant l'intervalle testé, stabilisation des niveaux d'eau (conditions initiales), injection d'eau à débit constant dans l'intervalle jusqu'à ce que les charges se stabilisent (régime permanent), arrêt de l'injection et retour aux conditions initiales.

La transmissivité de l'intervalle testé est calculée à l'aide de l'équation de Thiem pour l'écoulement radial dans des conditions en régime permanent (Zeigler, 1976),

$$T = \frac{Q}{\Delta h} \frac{l}{2R} \ln\left(\frac{r_i}{r_p}\right) \quad (4.1)$$

où Q est le taux d'injection en régime permanent, Δh la différence entre la charge pour les conditions initiales et la charge en régime permanent, r_p le rayon du puits, et r_i le rayon d'influence habituellement considéré entre 10 et 15 m. On estime qu'à ces distances l'impact de l'eau injectée est négligeable et que la charge reste inchangée. Dans cet essai, la pression d'injection est habituellement de 7 à 14 m plus élevée que la charge initiale dans l'intervalle testé. Si des pressions plus élevées sont imposées, une ouverture des fractures pourrait se produire dans l'intervalle testé, ce qui changerait les conditions de l'écoulement et les propriétés hydrauliques. La conductivité hydraulique correspondante est calculée par la suite en fonction de la longueur de l'intervalle testé.

Le même essai peut être analysé en régime transitoire. L'analyse transitoire donne de l'information sur la transmissivité et l'emmagasinement dans l'intervalle testé. Cette dernière interprétation est cependant rarement applicable en raison de l'incapacité à mesurer précisément les variations du taux d'injection pendant la période transitoire de l'essai.

L'essai de pompage à taux constant de l'intervalle testé est pertinent pour l'évaluation de la variabilité verticale des propriétés hydrauliques lorsque le roc fracturé est perméable. Cependant, cet essai devient difficile à appliquer lorsque la perméabilité des intervalles testés est variable. Dans ces cas, l'utilisation d'une pompe à capacité différente pour chaque intervalle est nécessaire. Mais il faut d'abord estimer la transmissivité de l'intervalle avant de choisir la pompe appropriée, ce qui est peu pratique. De plus, si la transmissivité devient très faible, l'intervalle ne fournira pas un débit de pompage continu.

Le *pulse test* est en réalité un essai de perméabilité *in situ* (*slug test*) réalisé sur un intervalle limité par deux obturateurs. Il est indiqué pour des intervalles ayant une perméabilité qui va de moyenne à faible. Pour les méthodes relatives à l'interprétation de cet essai, voir la section suivante.

4.3.3 Essai de perméabilité *in situ* (slug test)

Les essais de perméabilité *in situ* sont devenus très populaires compte tenu de l'équipement et de leur interprétation relativement simple et rapide. Deux types d'essai existent : l'essai à niveau constant et l'essai à niveau variable. Seul l'essai à niveau variable est recommandé (Chapuis, 1999). Cet essai consiste à brusquement changer (augmentation ou diminution) le niveau d'eau dans le puits et à observer le retour au niveau initial. Le choc hydraulique peut être exercé par ajout ou enlèvement d'une quantité d'eau dans le puits à l'aide d'une écope ou d'une masse cylindrique. Il existe également des instruments spécifiques pour injecter de l'air à une pression élevée. Le puits est d'abord bien scellé et l'air y est introduit à travers un tubage. La pression d'air pousse l'eau du puits dans l'aquifère, ce qui produit une diminution du niveau de la nappe dans le puits à l'étude. Cependant, la réalisation de l'essai et les instruments sont plus compliqués, et l'utilisation de l'air comprimé est restreinte surtout pour les sites où on ne veut ni injecter ni retirer de liquide des puits.

Dans le cas de roches peu perméables, le retour aux conditions initiales peut être extrêmement long : plusieurs jours ou semaines sont parfois nécessaires. Par contre, si l'unité rocheuse testée est très perméable, le retour du niveau d'eau peut être trop rapide. Il devient alors essentiel d'utiliser un capteur de pression pour enregistrer les changements de niveau d'eau. Typiquement, la plage des valeurs de la conductivité hydraulique pour l'essai de perméabilité *in situ* est de 10^{-9} à 10^{-4} m/s. Les méthodes habituellement appliquées pour l'interprétation des données sont décrites en détail par Chapuis (1999). Il s'agit des méthodes Bouwer-Rice, pour un aquifère à nappe libre, et Cooper-Papadopulos, pour un aquifère à nappe confinée. Pour l'interprétation des essais à réponse oscillatoire, la méthode de Uffink Van der Kamp est nécessaire (Kruseman et DeRidder, 1990).

Lorsqu'il s'agit d'un puits installé dans un milieu à perméabilité élevée, le retour de la nappe aux conditions initiales peut se faire par oscillation (exemple à la figure 4.4). L'équation décrivant cette réponse oscillatoire est

$$h = h_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega t) \quad (4.2)$$

où t est le temps (seconde), h le niveau d'eau dans le puits (m), h_0 le niveau d'eau dans le puits à $t = 0$, γ la constante d'amortissement (sec^{-1}), $\gamma = \ln(h_r/h_0 + 1)/\tau_{nr}$, n le numéro de l'oscillation et ω la fréquence de l'oscillation (sec^{-1}). Kruseman et DeRidder (1990) donnent un nomogramme pour obtenir la conductivité hydraulique en fonction de la fréquence et de l'amortissement de la magnitude de l'oscillation.

Les essais *in situ* sont souvent exécutés préalablement à la planification et à la réalisation d'autres essais hydrauliques pour évaluer la perméabilité d'un puits avant de planifier et de réaliser d'autres essais. Cette étape préalable est fortement recommandée.

4.3.4 Essai de productivité d'un puits – capacité spécifique

L'essai de productivité d'un puits comprend un essai de pompage réalisé par l'extraction de l'eau souterraine à un débit constant et par la mesure du rabattement final dans le puits testé. Le pompage est habituellement d'une durée relativement courte, et on suppose qu'à la fin du pompage le niveau de la nappe dans le puits s'est stabilisé. Ce type de données est disponible dans l'annuaire des puisatiers du MDDEP. Les données sont normalement obtenues par les foreurs lors de l'évaluation du potentiel d'un puits privé à la suite de son installation. Il est à noter qu'il ne s'agit pas d'un essai hydraulique standard, mais plutôt d'une façon d'obtenir des valeurs approximatives de la transmissivité dans un rayon relativement restreint autour du puits. Pour les études de caractérisation hydrogéologique régionale, des estimations approximatives de la transmissivité sont acceptables compte tenu du niveau de précision nécessaire, de la rapidité et des coûts minimes relatifs à l'obtention de cette information.



Une première estimation de la transmissivité peut être obtenue à l'aide de la *capacité spécifique*, c'est à dire du ratio entre le débit pompé Q et le rabattement observé Δh ($T \approx Q/\Delta h$). Cependant, la capacité spécifique n'est pas constante lors des pompages. Avec le temps, le rayon d'influence et le rabattement augmentent, faisant en sorte que la capacité spécifique diminue (figure 4.5). Pour corriger cette diminution, Razack et Huntley (1991) donnent un coefficient de transformation de la capacité spécifique en transmissivité. Sa valeur varie entre 0,9 et 1,5 (1,2 en moyenne) pour un rayon d'influence r_i de 100 à 1000 m.

Une approche beaucoup plus efficace du calcul de la transmissivité à l'aide de la capacité spécifique se base sur la relation théorique entre ces deux paramètres selon l'équation de Thiem pour des conditions en régime permanent (équation 4.1). On peut aussi utiliser l'approximation de Cooper-Jacob de la solution de Theis pour l'écoulement transitoire dans des aquifères confinés,

$$T = \frac{Q}{\Delta h} \frac{2.3}{4\pi} \log\left(\frac{2.25Tt}{S r_p^2}\right) \quad (4.3)$$

où r_p est le rayon du puits testé (m), t la durée du pompage (sec) et S le coefficient d'emmagasinement. Pour l'évaluation de la transmissivité, une valeur doit être supposée pour S selon le type de roche en place et les conditions du système aquifère (confiné ou libre). Parce que la transmissivité est une fonction du logarithme de ce paramètre, la solution n'est pas très sensible, et nous avons vu dans la section 4.2.1 que la plage de valeurs de S est assez restreinte.

La durée de l'essai de productivité doit être suffisamment longue, idéalement de huit heures et plus (minimum de deux heures), pour obtenir un rabattement relativement stable. Pour obtenir des conditions quasi permanentes dans le puits, la durée doit être plus longue pour des milieux de faible perméabilité. De plus, pour les puits installés dans des milieux peu fracturés, des réponses non linéaires peuvent être obtenues, et il faut s'assurer que le rabattement Δh ne soit pas trop élevé : idéalement, il devrait être plus petit que le tiers de la hauteur saturée initiale. Cette condition est également importante pour satisfaire la condition de l'écoulement de Dupuit, dont l'hypothèse de base pour toutes les solutions analytiques est un écoulement presque horizontal et un gradient vertical négligeable. Au cours du projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec, après l'élimination de toutes les données non compatibles selon les critères cités (section 4.2.2), 132 données de capacité spécifique ont été retenues au sein d'un ensemble initial de quelque 2760 données disponibles.

Bradbury et Rothschild (1985) donnent une solution numérique à l'équation 4.3. D'abord, une estimation initiale de T est supposée, puis l'équation est calculée pour $Q/\Delta h$. T est ajusté par la suite jusqu'à ce qu'une erreur raisonnable ($\leq 1\%$) entre la valeur obtenue et la valeur réelle du quotient $Q/\Delta h$ soit obtenue. Les évaluations de la transmissivité pour les mesures prises entre 1 minute et 24 heures après le début du pompage sont présentées à la figure 4.5. Un coefficient d'emmagasinement $S = 6 \times 10^{-4}$ a été utilisé pour le calcul puisque c'est la valeur moyenne obtenue par l'interprétation des rabattements observés dans les puits d'observation. La figure 4.5 montre que la capacité spécifique diminue avec le temps, ce qui la rend inadéquate pour l'estimation directe de la transmissivité. De plus, l'estimation de la transmissivité selon l'équation 4.3 reste plus ou moins stable sur toute la durée de l'essai parce que le facteur temps est considéré. Pour le même essai, les interprétations du rabattement et de la remontée de la nappe par la méthode de Theis donnent une valeur de la transmissivité égale à 0,021 m²/s, ce qui est très proche des estimations de la transmissivité montrées à la figure 4.5.

Le rabattement causé par le pompage dans un puits est souvent affecté par divers facteurs, dont la pénétration partielle, les pertes de charge dans le puits et les conditions aux limites. Bradbury et Rothschild (1985) présentent une procédure numérique pour l'évaluation de la transmissivité selon l'équation 4.3 en considérant ces facteurs.

4.3.5 Essai de pompage

L'essai de pompage est la méthode classique pour l'évaluation des effets du pompage sur la nappe et l'estimation des propriétés hydrauliques d'un aquifère. Les installations requises pour la réalisation d'un essai de pompage comprennent le puits de pompage et des puits d'observation qui interceptent la même formation aquifère que le puits pompé. Si de l'information sur les contacts hydrauliques entre les diverses formations est recherchée, des puits d'observation sont installés dans des unités autres que celle qui est pompée. Le débit de pompage est habituellement constant tandis que le pompage à débit variable est utilisé pour l'évaluation de la productivité et de l'efficacité du puits ainsi que pour la prédiction du rabattement.

Compte tenu de l'échelle de ces essais, les courbes de rabattement et de remontée de la nappe pour les roches sédimentaires sont généralement les mêmes que pour un milieu poreux. Ainsi, les méthodes standard d'interprétation de la réponse d'un aquifère granulaire pour obtenir la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement sont également applicables. Il s'agit des méthodes de Theis et de Cooper-Jacob pour un aquifère confiné, de Walton pour un aquifère semi-confiné, et de Neuman ou de Theis pour un aquifère à nappe libre (Kruseman et DeRidder, 1990; Chapuis, 1999). Si aucun puits d'observation n'est installé, le rabattement et la remontée de la nappe sont mesurés dans le puits de pompage seulement. Dans ce cas, la méthode de Cooper-Jacob est la plus appropriée, mais elle permet seulement d'obtenir la transmissivité de l'aquifère. Pour les détails sur la réalisation et l'interprétation des essais de pompage, il faut se référer aux descriptions complètes de Chapuis (1999).

4.3.6 Méthode graphique par réseau d'écoulement

Une estimation de la conductivité hydraulique et de la recharge à l'échelle régionale peut être obtenue par la méthode graphique en établissant un réseau d'écoulement (*flow-net*) selon la piézométrie observée sur le terrain. Cette méthode consiste à faire le traçage des lignes de courant, soit le chemin suivi par des particules d'eau en direction du gradient hydraulique, et des lignes équipotentielles, c'est à dire les contours de la surface piézométrique (Freeze et Cherry, 1979). Ces deux familles de courbes doivent s'intercepter à angle droit et former des rectangles. La solution est basée sur la loi de Darcy pour un écoulement en régime permanent et sur la loi de la conservation de la masse quand le volume d'eau qui entre dans un rectangle est égal au volume sortant. La méthode graphique est très rapide et elle est appliquée dans des conditions d'écoulement simple selon deux dimensions (en plan ou en coupe) et également pour une approximation d'un milieu poreux et isotrope équivalent. Elle est très puissante pour des problèmes où la piézométrie et les conditions aux limites sont bien connues, et les zones de recharge et de résurgence bien délimitées. Par contre, une bonne connaissance de l'hydrogéologie de la région étudiée est nécessaire pour appliquer cette méthode. Elle est particulièrement recommandée lors de la phase de caractérisation régionale préliminaire, avant la réalisation des travaux de terrain. Le seul inconvénient pour les études régionales, c'est que deux paramètres inconnus existent pendant le processus de calage : le flux souterrain (le taux de recharge) et la conductivité hydraulique. Ceci rend la solution non unique et il incombe aux hydrogéologues d'évaluer la solution la plus plausible.

Le flux souterrain, Q (m²/s), est calculé par l'équation suivante (Freeze et Cherry, 1979) :

$$Q = \frac{K m \Delta h}{n} \quad (4.4)$$

où K est la conductivité hydraulique (m/s), m le nombre de chenaux d'écoulement établis entre deux lignes de courant, n le nombre de rectangles dans un chenal d'écoulement et Δh (m) le gradient hydraulique le long des lignes de courant. À titre d'exemple d'application, une région d'étude contenant cinq zones de recharge est illustrée à la figure 4.6. La direction principale de l'écoulement



souterrain est vers le sud, avec une composante mineure allant vers le nord. Aucun flux ne traverse les extrémités ouest et est ni certains secteurs de la limite nord de la région (calcul au tableau 4.2). Les chenaux d'écoulement ont été associés à une seule valeur de conductivité hydraulique représentée par la moyenne globale des aquifères fracturés, $2,6 \times 10^{-5}$ m/s. L'épaisseur supposée b de l'aquifère est constante à 100 m. Le flux souterrain est de $54,1 \times 10^6$ m³/an. La plus grande partie de cet écoulement souterrain, 42,4 %, provient de la zone III, tandis que la plus petite partie, soit 6,1 %, est celle qui correspond à la zone V. La recharge moyenne annuelle est estimée comme le ratio entre le flux total et la superficie de l'aquifère régional (1250 km²), c'est à dire 43,3 mm.

4.3.7 Modélisation numérique

Le modèle numérique est une représentation mathématique des conditions hydrogéologiques de la région étudiée. Cette représentation est basée sur les données hydrogéologiques disponibles, sur les observations de terrain et sur leur interprétation. Le modèle utilise la discrétisation de la région en polygones interconnectés, les équations décrivant l'écoulement entre ces polygones et la conservation de la masse pour simuler l'écoulement souterrain dans la région. Les étapes de conception d'un modèle numérique sont les suivantes : définition des objectifs, collecte des données, identification des conditions aux limites, élaboration du modèle conceptuel, construction du maillage du modèle, attribution des propriétés hydrauliques, exécution de la simulation, processus de calage, analyse de la sensibilité des divers paramètres, et interprétation et présentation des résultats.

La modélisation numérique est une méthode sophistiquée couramment utilisée en hydrogéologie et il n'y a pratiquement pas de bornes à son utilisation. Elle peut servir autant au calage des propriétés hydrauliques selon les conditions actuelles (piézométrie, taux de pompage) qu'à la prédiction du comportement de l'aquifère pour des conditions futures (recharge par les précipitations, taux de pompage). Pour plus de détails sur la modélisation numérique, voir Anderson et Woessner (1990), et ASTM (1999).

4.4 Intégration des données

4.4.1 Densité de points de contrôle

Il n'y a pas de réponse unique à la question du nombre de points de contrôle nécessaire pour produire une caractérisation hydrogéologique régionale adéquate. D'un côté, ce nombre dépend des conditions hydrogéologiques de la région, notamment de la complexité du système aquifère, du nombre d'unités hydrogéologiques, de leur interconnexion, de la variabilité des propriétés hydrauliques, des conditions aux limites et de la superficie de la région étudiée. D'un autre côté, la densité requise d'information repose sur la précision, la représentativité et le détail avec lequel les propriétés hydrauliques doivent être présentées. Puisque les méthodes d'investigation d'une région peuvent varier largement, les ressources financières disponibles constituent une considération importante pour effectuer les travaux de caractérisation.

Des travaux de terrain s'imposent uniquement lorsque l'information existante ne définit pas adéquatement les propriétés hydrauliques de la région étudiée. Le processus d'interprétation des données disponibles lors de la conceptualisation de l'écoulement souterrain peut parfois indiquer un manque de connaissances pour certains secteurs de la région ou certaines unités hydrostratigraphiques. Une campagne de terrain doit alors être planifiée et réalisée pour compléter la caractérisation à un niveau adéquat. Mentionnons aussi qu'un programme de forage excessif pour évaluer les propriétés hydrauliques ne doit jamais être substitué à l'utilisation des connaissances existantes ou à une campagne de terrain efficace et bien délimitée.

Pour illustrer l'ampleur des ensembles de données caractérisant une étude régionale, nous allons présenter l'exemple du projet de caractérisation du système aquifère du sud-ouest du Québec où



les formations aquifères sont principalement constituées de roches sédimentaires paléozoïques fracturées des Basses-Terres du Saint-Laurent de même que de sable et de gravier d'âge Quaternaire. L'effort de caractérisation a été concentré sur les unités aquifères (tableau 4.4). Le nombre final d'essais hydrauliques utilisés pour connaître la distribution spatiale des propriétés hydrauliques de l'aquifère régional est de 25 pour l'unité de sable et de gravier combinée aux roches très fracturées, et de 179 pour les roches sédimentaires fracturées. La densité totale de points de contrôle est alors de 204 pour une superficie d'environ 1250 km², soit un point de contrôle tous les 6,1 km². Également, la variation verticale de la conductivité hydraulique pour le roc fracturé a été obtenue par 328 essais d'injection à charge constante à l'aide des obturateurs pneumatiques (intervalle de 3,75 m) réalisés dans 20 puits.

De cet exemple, il peut être conclu que si la répartition des points de contrôle est bien équilibrée, une densité d'un point de contrôle tous les 5 à 10 km² serait adéquate pour atteindre les objectifs d'une étude régionale avec une complexité hydrogéologique moyenne, soit un système aquifère régional confiné et constitué de deux unités juxtaposées. Pour s'assurer que la couverture de la région étudiée avec des points de contrôle est adéquate, il est également recommandé de considérer l'écart type des données collectées. Pour les roches sédimentaires, un écart type des logarithmes de la conductivité hydraulique horizontale plus élevé qu'un pourrait suggérer que le nombre des données est insuffisant.

4.4.2 Considérations lors de la comparaison des données hydrauliques

Lors de l'application de divers types d'essais hydrauliques, la présence des hétérogénéités de l'aquifère crée un effet d'échelle. L'effet d'échelle d'un milieu hétérogène signifie que les propriétés et les caractéristiques observées à une échelle donnée ne sont pas nécessairement les mêmes à une autre échelle d'investigation. Si le volume de l'aquifère étudié est très restreint autour du puits, la portion de roches étudiée pourrait être complètement solide, sans aucune fracture ou perméabilité. À l'opposé, si le puits est installé dans une zone de faille, les roches seront très fracturées et perméables. En augmentant l'échelle d'investigation, l'influence des particularités locales diminue et les propriétés hydrauliques mesurées représentent une valeur moyenne pour tout le volume soumis à l'essai. En général, l'effet d'échelle fait en sorte qu'un essai à petite échelle donne des valeurs de conductivité hydraulique plus petites que pour un essai à grande échelle. Les valeurs les plus élevées, dans le cas d'essais à grande échelle, sont attribuées à l'hétérogénéité de l'aquifère. Dans les grands volumes examinés, la possibilité est plus grande de rencontrer des zones interconnectées, des zones à fracturation élevée et des conduits préférentiels pour l'écoulement souterrain. Quant à la dispersion des résultats, elle est habituellement plus grande pour les essais à petite échelle. Ces conclusions sont valables pour un milieu hétérogène où les zones fracturées occupent un volume moindre que les zones de roc sain. À l'inverse, ce sont les essais à petite échelle qui donneront des valeurs de conductivité hydraulique plus grandes. On montre plus loin que le tout dépend de la distribution des points de contrôle et du ratio entre les volumes de roc sain et fracturé.

Avec les données hydrauliques collectées lors de la caractérisation régionale du Sud-Ouest québécois, il est possible d'étudier l'effet d'échelle observé (figure 4.7). Le nombre d'essais par méthode, les valeurs de la conductivité hydraulique minimale et maximale, K_{\min} et K_{\max} , la moyenne géométrique, K_m , et l'écart type des logarithmes, $\sigma_{\log} K$, suggèrent qu'il y a une relation directe entre la conductivité hydraulique et l'échelle du type d'essai (tableau 4.3).

Nous avons vu que les essais d'injection à charge constante à l'aide des obturateurs pneumatiques portent sur un volume très étroit autour de l'intervalle vertical délimité par les obturateurs. Évidemment, ces essais ne donnent pas de valeurs représentatives de la conductivité hydraulique régionale et ils sont biaisés par la fracture la plus perméable dans la section testée. La variation de la conductivité de plus de sept ordres de grandeur (figure 4.8, tableau 4.3) témoigne de l'hétérogénéité extrême due à la fracturation et aux propriétés physiques des roches sédimentaires.



La plage de valeurs de la conductivité hydraulique obtenue grâce aux essais de productivité des puits (capacité spécifique) est également étalée et varie sur plus de quatre ordres de grandeur. Il est à noter que la valeur moyenne est proche de celle qui est obtenue par les essais de pompage sans puits d'observation. Les essais de pompage avec puits d'observation montrent les valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées.

4.4.3 Effet d'échelle et représentativité des données hydrauliques à l'échelle régionale

Le problème lié au changement d'échelle et à la régionalisation des propriétés hydrauliques n'est pas nouveau, et le débat dans la communauté scientifique est loin d'être terminé. Il s'agit d'un sujet de recherche scientifique très actuel visant à créer une méthode de comparaison. Ici, nous allons présenter une procédure relativement simple, telle qu'elle a été établie pour la caractérisation du Sud-Ouest québécois, pour quantifier la dépendance de la conductivité hydraulique par rapport à l'échelle et pour juger de la représentativité des données hydrauliques tirées de divers essais. Notre approche a été de considérer le volume d'aquifère visé lors d'essais hydrauliques.

Le volume d'aquifère étudié lors d'un essai hydraulique est habituellement estimé à l'aide du rayon d'influence et des rabattements observés ou des distances parcourues lors d'essais de traçage. Cependant, beaucoup d'essais hydrauliques (productivité, injection à charge constante à l'aide des obturateurs pneumatiques, etc.) ne génèrent pas cette information. Schulze-Makuch *et al.* (1999) considèrent ce volume comme étant proportionnel à la quantité d'eau pompée ou injectée. Le volume étudié pourrait alors être obtenu par le rapport entre la quantité d'eau pompée et la porosité effective (fracturation efficace de l'aquifère). Cette supposition, bien qu'elle semble valable, peut être contestée en raison de la présence des différentes conditions aux limites et de l'hétérogénéité de l'aquifère, et aussi parce que tous les essais n'ont pas été conduits jusqu'à l'obtention des mêmes conditions d'écoulement (stabilisation des charges, régime permanent, etc.). Mais, en l'absence d'autres estimations, il faut l'adopter ici. Le volume cumulatif d'eau pompée ou injectée pour chaque essai présenté au tableau 4.3 a été calculé comme le produit du taux de pompage et de la durée de l'essai.

La figure 4.8 présente la relation entre le volume cumulatif d'eau pompée et la conductivité hydraulique observée. Onze des 20 essais d'injection à charge constante à l'aide des obturateurs pneumatiques n'ont pas été considérés parce que d'autres essais ont déjà été réalisés dans les mêmes puits. L'effet d'échelle selon le type d'essai hydraulique appliqué est encore plus évident que celui qui est présenté à la figure 4.7. Les valeurs de la conductivité hydraulique estimées au moyen d'un même type d'essai sont regroupées sur l'axe horizontal. Les volumes cumulatifs varient de 0,1 à 1 m³ pour les essais d'injection à charge constante à l'aide des obturateurs pneumatiques, de 1 à 10² m³ pour les essais de productivité et de 10² à 10⁴ m³ pour les essais de pompage. L'axe vertical présente les plages de valeurs obtenues. La régression linéaire par la méthode des moindres carrés montre une corrélation forte avec une dépendance exponentielle (linéaire à l'échelle log-log) de la conductivité hydraulique et du volume cumulatif.

Une autre caractéristique importante peut être déduite en ce qui concerne la comparaison des valeurs de la conductivité hydraulique provenant des essais à diverses échelles (figure 4.8). Certains essais d'injection à charge constante avec les obturateurs pneumatiques (correspondant à un volume cumulatif d'eau injectée d'environ 1 m³) génèrent une conductivité hydraulique plus élevée que certains essais de pompage (correspondant à un volume cumulatif d'eau pompée d'environ 10 000 m³). Pourquoi un tel résultat? Retournons à la caractéristique de base des aquifères fracturés, soit leur hétérogénéité. Supposons un milieu hétérogène comportant deux zones dont l'une, plus petite, est caractérisée par une fracturation, une interconnexion et une perméabilité élevées, et l'autre, beaucoup plus grande, est caractérisée par une fracturation, une interconnexion et une perméabilité faibles (figure 4.9). Deux types d'essais sont réalisés : à grande échelle avec un volume étudié V_1 , et à petite échelle avec un volume étudié V_2 , où $V_1 \gg V_2$. Ainsi, la probabilité qu'un de ces deux types d'essais intercepte la zone de perméabilité élevée est fonction de l'étendue de cette zone et du volume affecté par rapport à l'aire entière étudiée. Cette probabilité est plus grande pour l'es-



sai à grande échelle qui génère habituellement une conductivité hydraulique plus élevée que pour l'essai à petite échelle ($K_1 > K_2$). Ceci est toujours vrai, sauf dans le cas où l'essai à petite échelle coïncide avec la zone à perméabilité élevée. Dans ce cas et dans le cas où l'aire de la zone de perméabilité élevée est plus grande, l'essai à petite échelle génère une conductivité hydraulique plus élevée ($K_3 > K_2 > K_1$). La variabilité de la conductivité hydraulique mesurée résulte donc du jeu entre les volumes examinés par les essais hydrauliques, et l'aire et la perméabilité des zones étudiées.

Sachant que l'effet d'échelle sur la conductivité est un artefact de la répartition des points de contrôle, il est probablement plus approprié de parler d'un échantillonnage biaisé (Hsieh, 1998). Pour amoindrir cet effet, il faut s'assurer que le nombre et la distribution de points de contrôle représentent adéquatement les propriétés hydrauliques sur le terrain pour que les valeurs moyennes de la conductivité hydraulique obtenues par les divers essais soient comparables et dans les mêmes ordres de grandeur. Évidemment, ceci n'est pas une tâche facile parce que les coûts liés aux essais hydrauliques peuvent être élevés et que le temps nécessaire pour leur exécution peut être long. L'évaluation des propriétés hydrauliques représentatives repose donc sur l'expérience, l'intuition et l'imagination de l'hydrogéologue.

Retournons encore une fois aux figures 4.7 et 4.8. Pourquoi les valeurs moyennes de la conductivité hydraulique obtenues par les deux types d'essai de pompage sont-elles beaucoup plus grandes que celles qui sont estimées par les essais d'injection à charge constante à l'aide des obturateurs pneumatiques et des essais de productivité? Est-ce que le nombre et les sites choisis pour ces derniers ne permettent pas d'avoir une représentativité suffisante? La réponse dans ce cas se trouve plutôt dans le choix des sites pour les essais de pompage. Ils sont habituellement réalisés par les municipalités pour l'approvisionnement en eau potable, par les embouteilleurs d'eau ou par une industrie nécessitant une grande quantité d'eau. Lors de la recherche en eau, seulement les puits les plus productifs sont soumis à un essai de pompage. Les conductivités hydrauliques tirées de ces essais peuvent alors constituer les valeurs les plus grandes, qui ne sont pas nécessairement représentatives des moyennes pour la région.

La valeur moyenne régionale de la conductivité hydraulique de l'unité aquifère de roches sédimentaires fracturées est sans doute plus près de la valeur moyenne des essais de productivité qui sont repartis d'une façon non discriminatoire dans la région. Une moyenne géométrique des 179 valeurs de la conductivité hydraulique est de $2,6 \times 10^{-5}$ m/s. Cette valeur a été utilisée pour l'estimation de l'écoulement régional à l'aide de la méthode par réseau d'écoulement (voir le tableau 4.2).

4.4.4 Quel type d'essai hydraulique utiliser?

La méthode graphique par réseau d'écoulement et les modèles numériques utilisent une approche indirecte, soit le calage des propriétés hydrauliques. La fiabilité des estimations dépend beaucoup du jugement et de l'expérience de l'hydrogéologue. Les essais hydrauliques sont des méthodes directes, mais chaque type d'essai possède des avantages et des contraintes pratiques (durée de l'essai, volume étudié, propriétés hydrauliques testées, plage de valeurs, etc.) qui préconisent ou limitent son application. Nous avons vu que les propriétés hydrauliques des aquifères peuvent être obtenues sur le terrain par des essais avec un seul puits ou avec plusieurs puits. Pour les unités ayant une conductivité hydraulique qui va de modérée à faible ($K \leq 10^{-6}$ m/s), des essais avec puits unique ou les essais à l'échelle locale (perméabilité *in situ* et essais d'injection à l'aide d'obturateurs pneumatiques) sont habituellement utilisés. Pour les aquifères ayant une conductivité hydraulique élevée ($K \geq 10^{-5}$ m/s) et où l'évaluation de la productivité, du coefficient d'emmagasinement et des conditions aux limites est souhaitée, les essais de productivité et de pompage peuvent être appliqués. L'interprétation en régime permanent donne la transmissivité et la conductivité hydraulique du milieu. Pour les essais de pompage avec plusieurs puits, l'interprétation en régime transitoire génère entre autres une mesure de l'emmagasinement, des conditions aux limites et la connexion hydraulique entre les diverses unités hydrogéologiques du système aquifère.



Les essais de pompage à grande échelle donnent une information précieuse sur les propriétés hydrauliques d'un système aquifère. De plus, les paramètres hydrauliques sont obtenus pour un grand volume d'aquifère, ce qui convient mieux à l'échelle de l'étude. Le plus grand désavantage de ces essais est leur coût élevé. Ainsi, il est recommandé d'analyser tout essai de pompage existant pour la région étudiée. Dans le cas où aucun essai de pompage n'existe, il est recommandé d'en réaliser au moins un qui servira à approfondir la connaissance de l'aquifère (aire d'alimentation, réponse de l'aquifère au pompage, anisotropie, etc.). Cependant, la réalisation systématique des essais de pompage lors des études de caractérisation hydrogéologique régionale n'est pas recommandée.

Les essais à plus petite échelle (perméabilité *in situ*, productivité du puits) sont beaucoup plus simples et rapides, et moins coûteux. Ils fournissent des mesures de la conductivité hydraulique adéquates pour une étude régionale et, de plus, la plage des valeurs obtenues est plus représentative de l'hétérogénéité du milieu fracturé. Évidemment, la densité et la distribution des points de contrôle doivent être adéquates pour la complexité des conditions hydrogéologiques sur le terrain. Finalement, les essais d'injection à charge constante à l'aide d'obturateurs pneumatiques sont recommandés pour la délimitation verticale des unités aquifères.

4.4.5 Mise en forme des données

La présentation des données de caractérisation des propriétés hydrauliques se fait lors des travaux de compilation et d'interprétation. Les données doivent être placées dans la base de données, avec notamment une description détaillée de la source des données, de la localisation, de la profondeur, de l'unité hydrogéologique étudiée, du type d'essai et de la méthode d'interprétation (chapitre 6). Elles doivent aussi être présentées de façon à être comparées, interprétées et évaluées pour leurs distributions statistique et spatiale dans la région étudiée, et utilisées lors d'études ultérieures. De plus, la présentation des données doit se faire sous formes visuelle et synthétique.

Les études régionales incluent souvent des études plus détaillées, comme des essais de pompage avec puits d'observation. Dans ce cas, il est nécessaire de présenter un plan du site testé (figure 4.10). Le plan doit contenir l'échelle, l'emplacement des puits et des points de repère géographique (rues, rivières, etc.). Il doit être accompagné entre autres d'une description de la construction des puits, de la géologie rencontrée et du niveau de la nappe (figure 4.11). Un résumé des données relatives aux puits doit aussi être fourni (tableau 4.5). De plus, les divers essais hydrauliques réalisés lors des travaux de terrain doivent être annexés au rapport de l'étude régionale. Des exemples sont présentés aux figures 4.12 à 4.14.

Si le nombre de données le permet (habituellement ≥ 30), il est recommandé de calculer les moyennes et les écarts types selon la fonction de la distribution des données. Il est aussi recommandé d'examiner la loi de la distribution des données. En général, si elle n'est pas biaisée par des conditions sur le terrain, la distribution des valeurs des propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique) suit la loi log-normale, c'est-à-dire que les logarithmes de la conductivité hydraulique ont une distribution normale (Gaussienne). Pour la visualisation des données, il est généralement plus approprié de présenter les logarithmes de la conductivité hydraulique. Ainsi, la moyenne des données est estimée par la moyenne géométrique, et l'écart type est celui des logarithmes (habituellement autour d'un ordre de grandeur). La figure 4.15 montre la vérification de la distribution normale des logarithmes des valeurs de la conductivité hydraulique obtenues à l'aide de la capacité spécifique. De plus, il est recommandé de présenter un histogramme des observations de la conductivité hydraulique séparément pour les unités principales de l'aquifère régional de la région d'étude, et un histogramme pour l'aquifère régional entier (figure 4.16). Ces histogrammes des observations devraient également inclure la fonction de probabilité de la densité des données (PDF), la moyenne et l'écart type.

Finalement, un résumé de toutes les propriétés hydrauliques obtenues lors de l'étude doit être présenté sous forme de carte régionale et de tableau global. La carte régionale présente la distribu-



tion spatiale et les contours de la conductivité hydraulique. Dans ce cas, il faut interpoler les valeurs de conductivité hydraulique. Généralement, pour ce type d'application, il n'est pas recommandé d'interpoler directement une variable comme la conductivité hydraulique. L'effet de lissage affecte les valeurs estimées : les valeurs sont très variables près des puits testés, et la surface interpolée devient de plus en plus homogène et lisse à mesure qu'on s'en éloigne. Ainsi, la variabilité spatiale des valeurs devient un artefact de la position des puits, et une telle interpolation peut avoir des conséquences imprévisibles sur l'estimation de l'écoulement. Ce problème est particulièrement grave si les puits ne sont pas distribués de façon uniforme à travers la région étudiée. Pour contourner ce problème, il est toujours recommandé d'utiliser les logarithmes de la conductivité hydraulique pour l'interpolation et de faire par la suite la transformation inverse des valeurs interpolées. L'interpolation des propriétés de l'aquifère peut être exécutée par exemple par krigeage à l'aide de variogrammes (figure 4.17).

Les figures 4.18 et 4.19 présentent les types de cartes utiles pour illustrer la distribution spatiale de la conductivité hydraulique. La figure 4.18 illustre la lithologie de la région avec les points de contrôle et les plages de valeurs de la conductivité hydraulique. La figure 4.19 montre quant à elle les contours de la conductivité hydraulique et les points de contrôle selon les types d'essai hydraulique.

Le tableau global résumant les propriétés hydrauliques d'une étude régionale doit contenir des informations de base pour tous les points de contrôle utilisés et leur distribution spatiale (tableau 4.6) : le nom, le code de la station dans la base des données, les coordonnées, la source de la donnée, l'information de base pour les caractéristiques des forages, l'unité hydrostratigraphique testée, le type d'essai et son interprétation ainsi que les résultats obtenus (transmissivité, conductivité hydraulique, coefficient d'emmagasinement, etc.).

4.5 Recommandations sur les étapes à suivre

À la lumière de la discussion présentée dans ce chapitre et afin d'avoir une caractérisation des propriétés hydrauliques complète et efficace, il est recommandé de suivre les étapes présentées à la figure 4.20 pour la caractérisation des propriétés hydrauliques régionales.

Figure 4. 1 Exemple d'un modèle conceptuel pour le projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec (Nastev *et al.*, 2000).

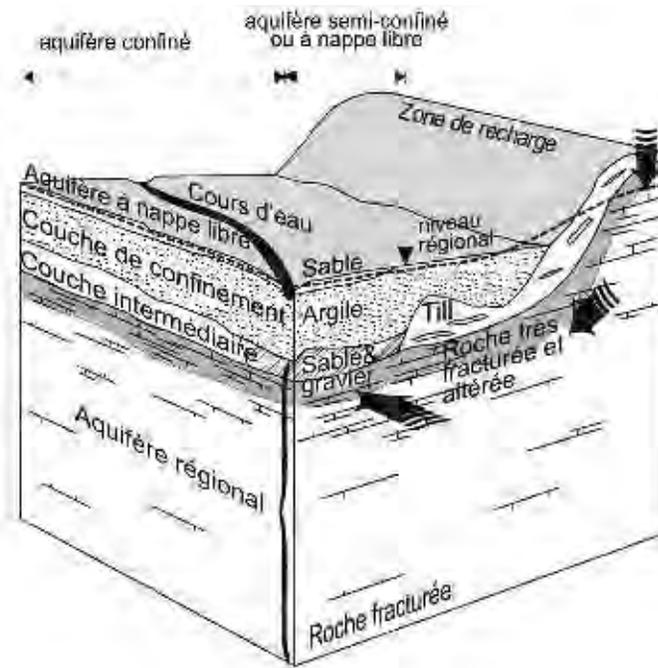


Figure 4. 2 Équipement pour les essais de perméabilité à l'aide d'obturateurs pneumatiques: a) équipement d'injection et d'acquisition des données, b) système de levage (Nastev *et al.*, 2000).

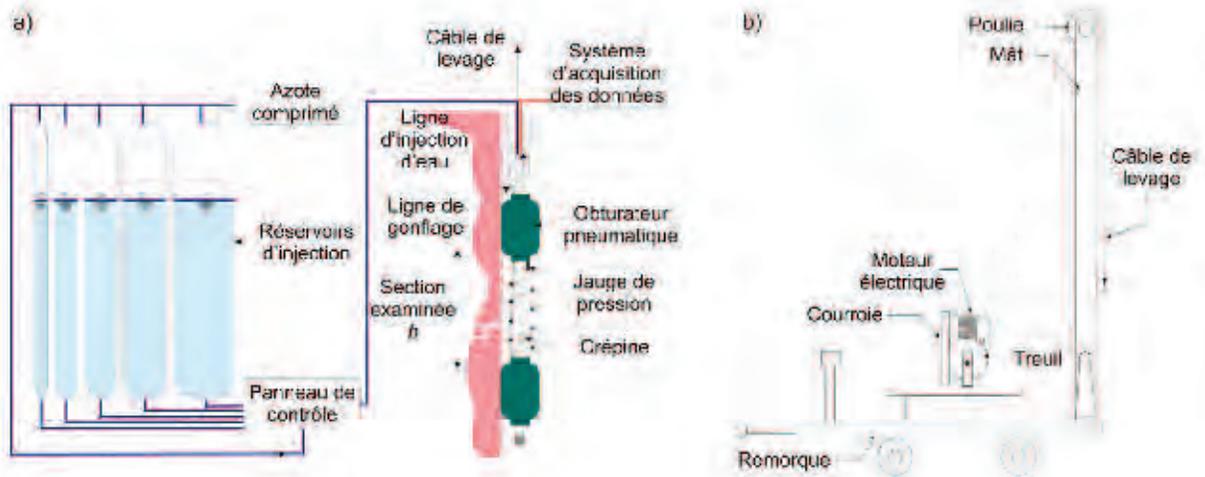


Figure 4.3 Essais d'injection à l'aide des obturateurs pneumatiques – relations entre la charge, h , et le taux d'injection, Q , en fonction du temps (figure modifiée de NRC, 1996).

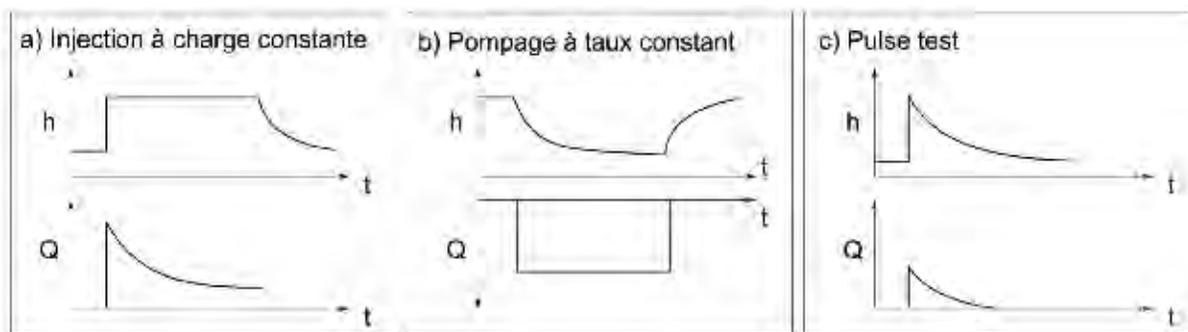


Figure 4.4 Essai de perméabilité *in situ* – réponse oscillatoire mesurée et simulée par la méthode d'Uffink-Van der Kamp. Puits de Rivière du Nord, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

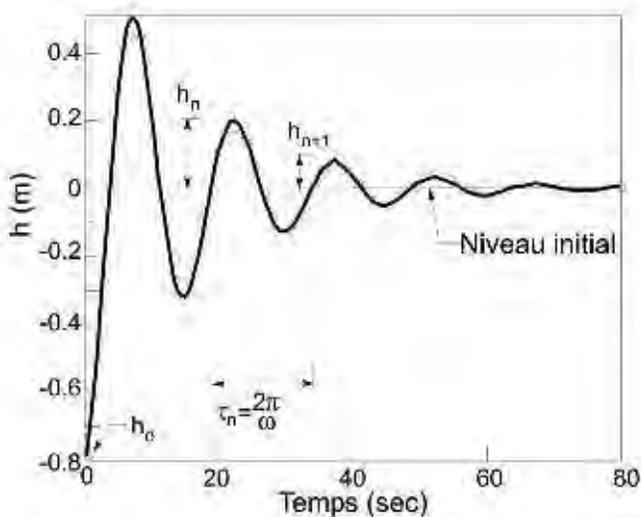


Figure 4.5 Estimation de la transmissivité et de la capacité spécifique. Puits de la Montée Barrette à Sainte-Anne-des-Plaines, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

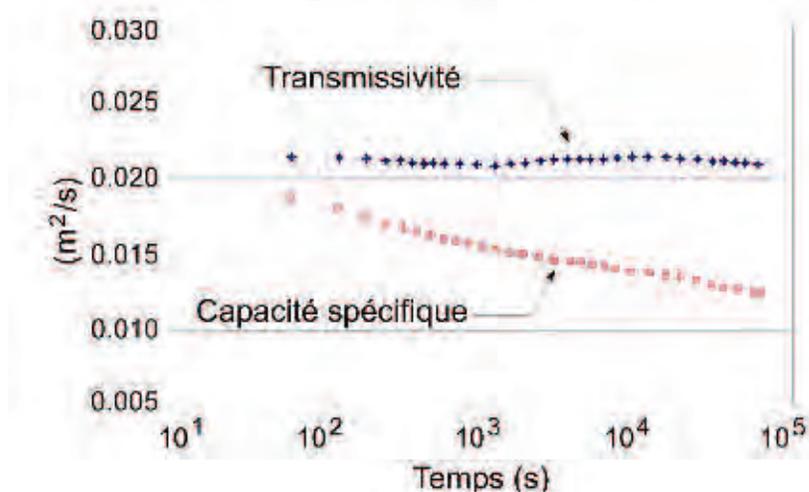


Figure 4.6 Méthode graphique par réseau d'écoulement pour le calcul de l'écoulement souterrain dans un aquifère. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

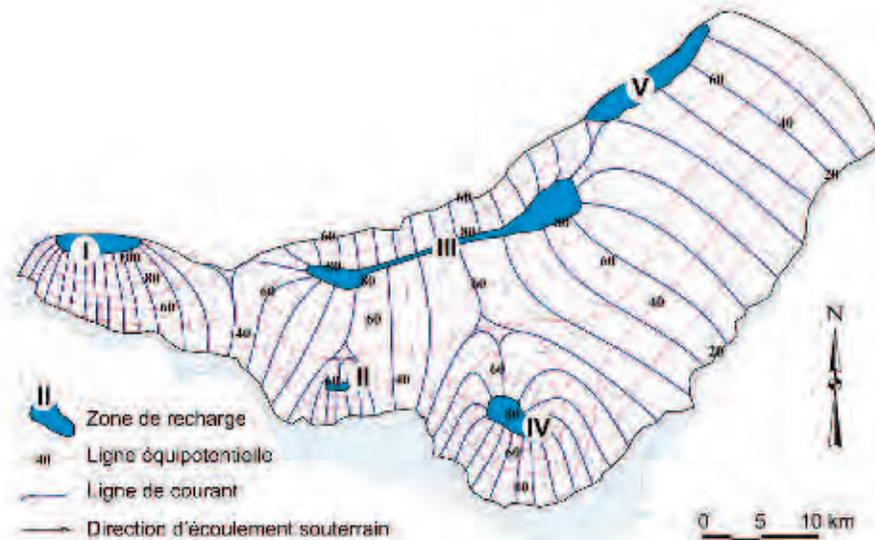


Figure 4.7 Valeurs de conductivité hydraulique pour la caractérisation du système aquifère par différentes méthodes. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

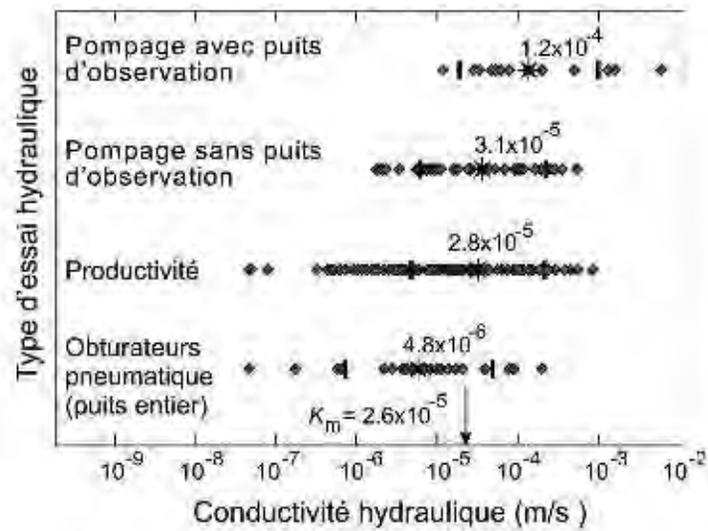


Figure 4.8 Corrélation entre la conductivité hydraulique et le volume cumulé d'eau pompée/injectée. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

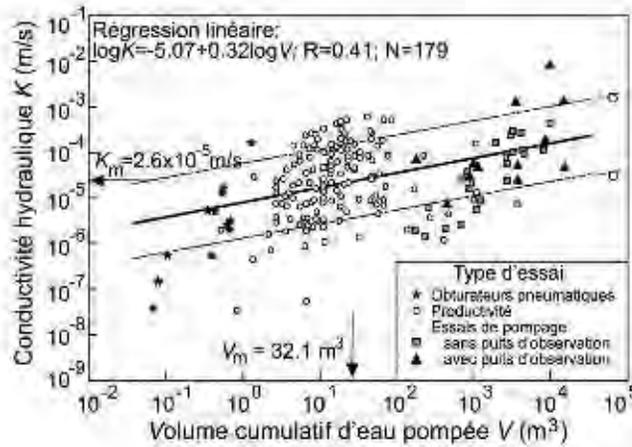


Figure 4.9 Effet d'échelle sur la valeur de la perméabilité mesurée.

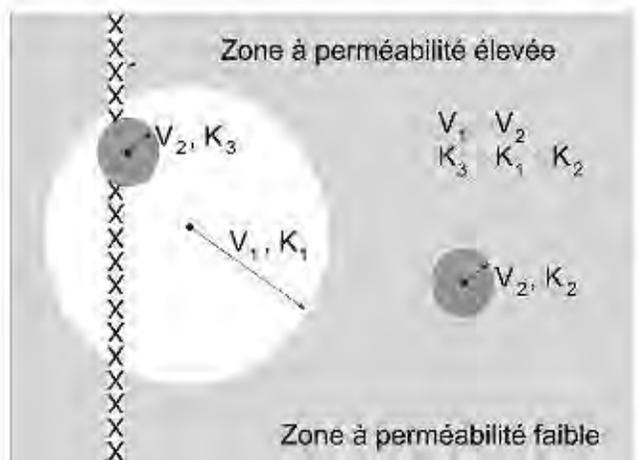


Figure 4 10 Localisation des puits d'observation et de pompage utilisés lors de l'essai de pompage à Saint-Janvier (Karanta *et al.*, 2001).

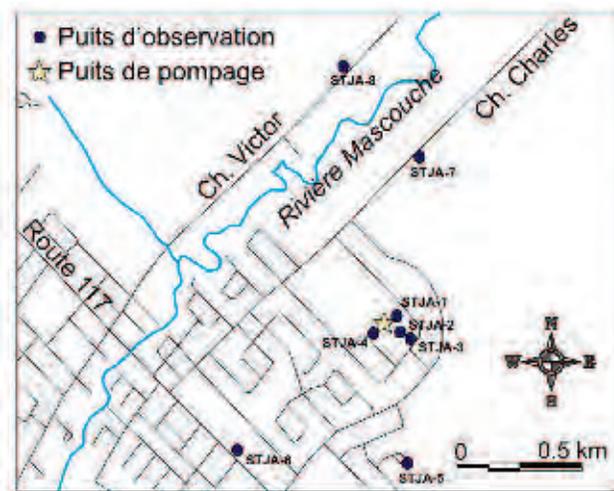


Figure 4.11 Stratigraphie des unités géologiques interceptées par le puits STJA-1 à Saint-Janvier (Karanta *et al.*, 2001).

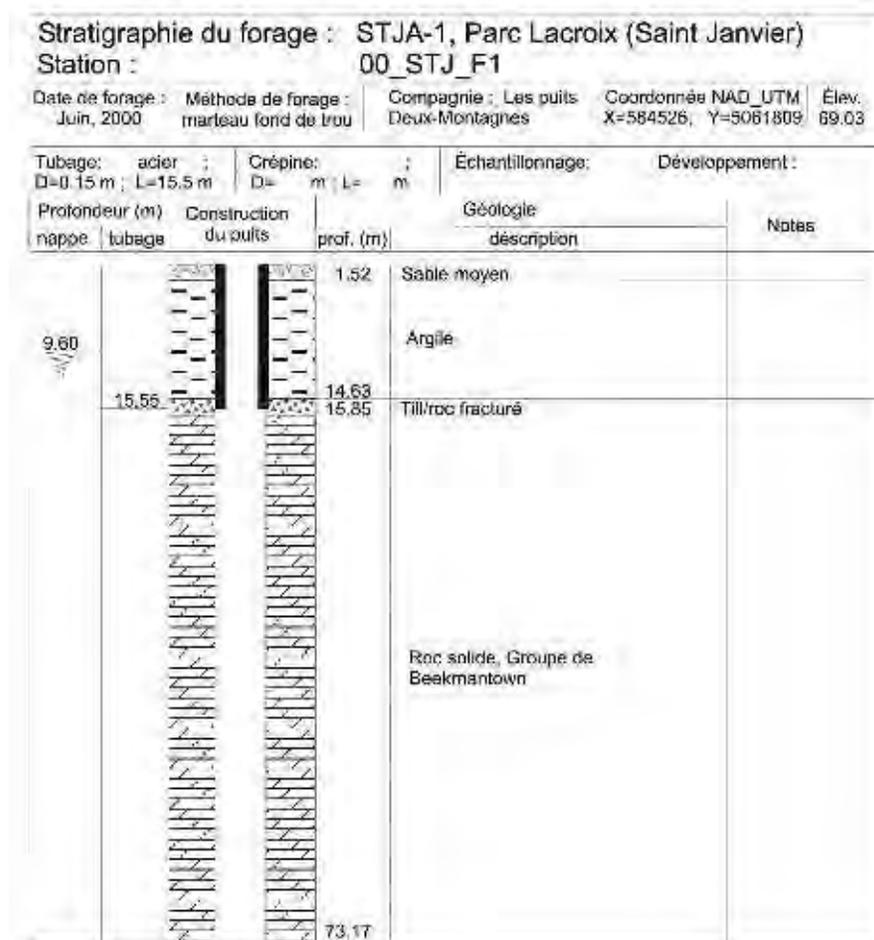


Figure 4.12 Rabattement mesuré en fonction du temps et courbe type de la méthode de Theis ajustée pour une réponse transitoire dans un milieu isotrope.
Puits de la Montée Barette, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

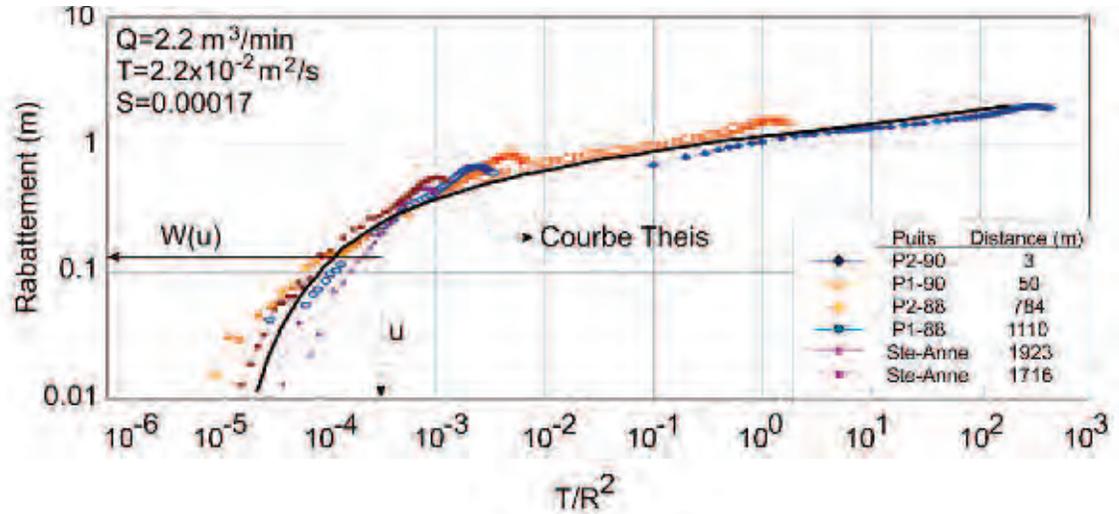


Figure 4.13 Variation de la transmissivité en fonction de la profondeur lors des essais d'injection à charge constante à l'aide des obturateurs pneumatiques.
Puits PE-2, Côte Saint-Louis et RIA-99, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

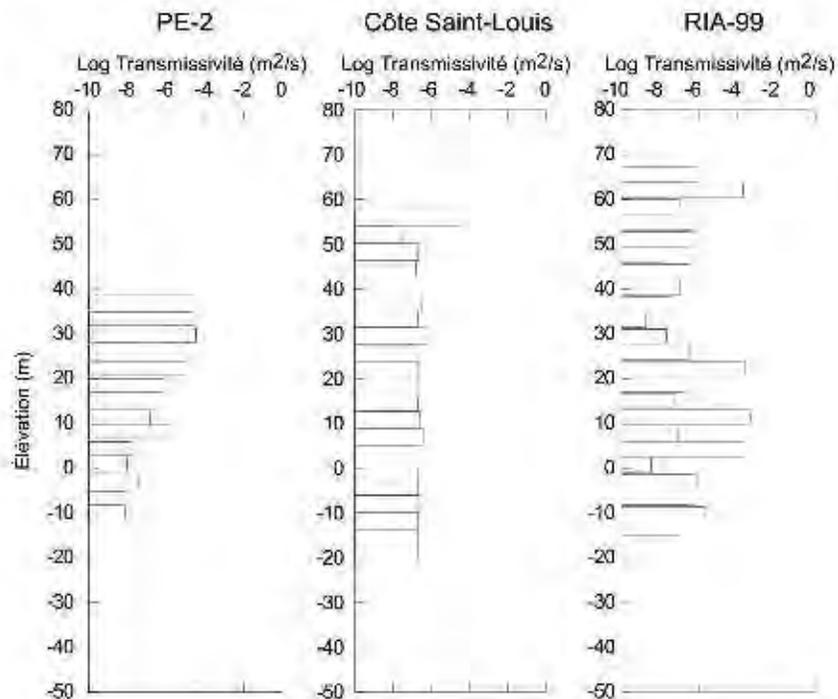


Figure 4.14 Sud-ouest du Québec. Variation de la transmissivité en fonction de la longueur de la section ouverte du puits dans le roc lors d'essais à charge constante à l'aide d'obturateurs pneumatiques. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

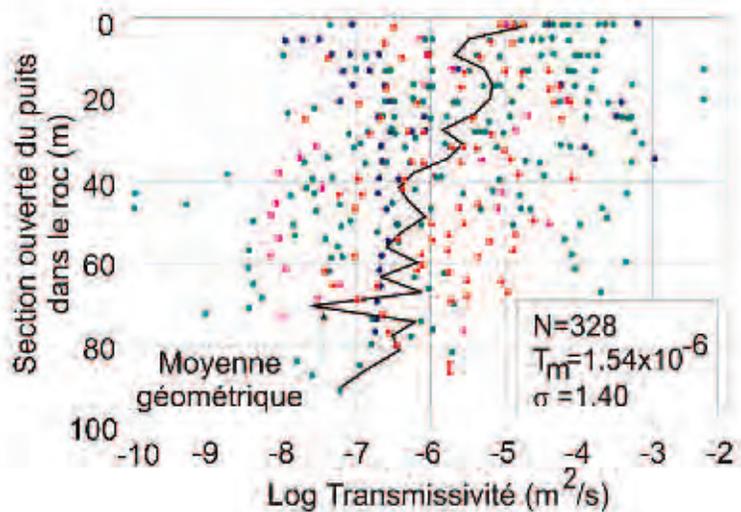


Figure 4.15 Distribution normale des logarithmes de la conductivité hydraulique des formations rocheuses. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

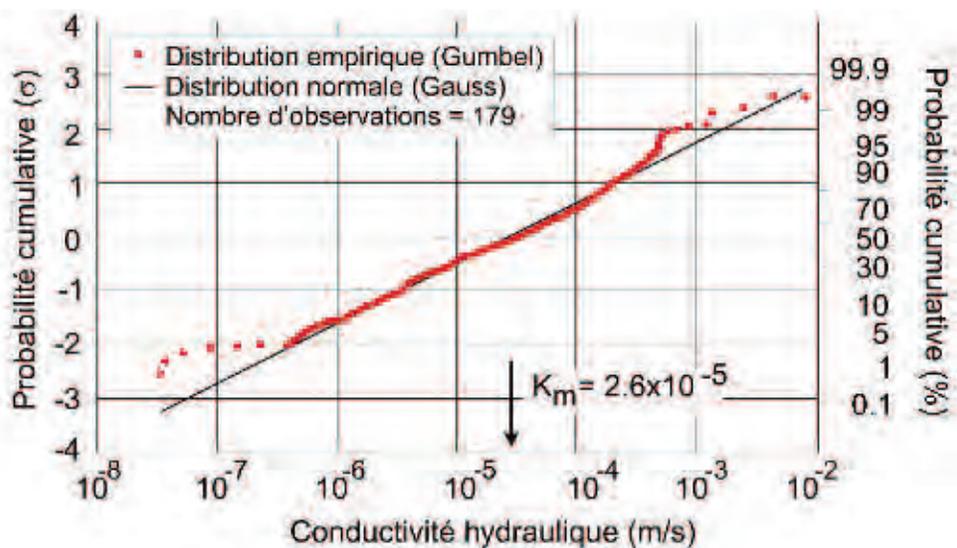


Figure 4.16 Histogramme des observations des conductivités hydrauliques dans les formations rocheuses. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

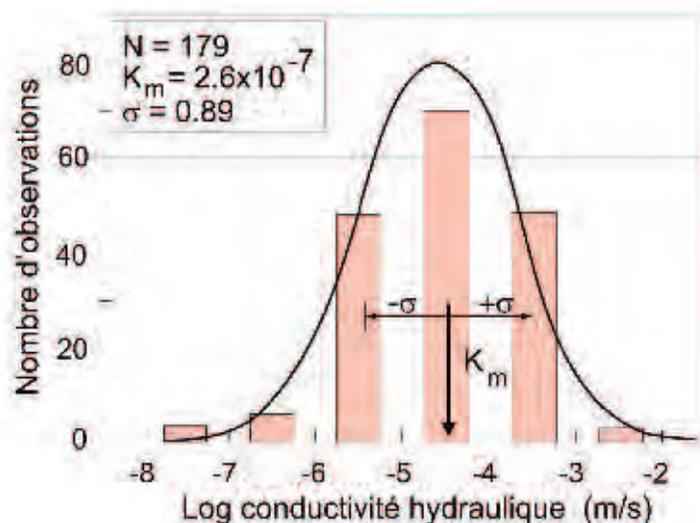


Figure 4.17 Variogrammes pour le krigeage de la conductivité hydraulique des formations rocheuses. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

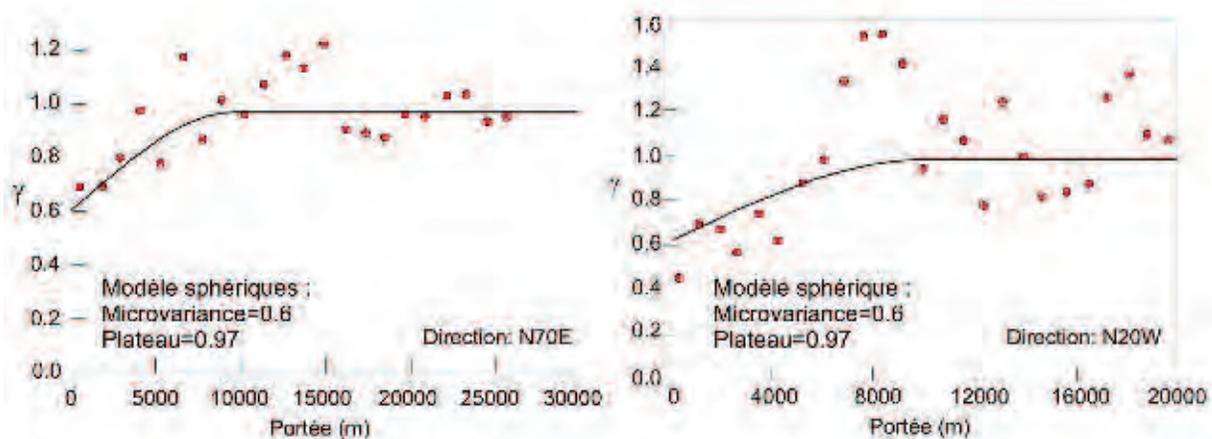


Figure 4.18 Présentation de la distribution spatiale de la conductivité hydraulique du roc fracturé du système aquifère du Sud-Ouest québécois. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

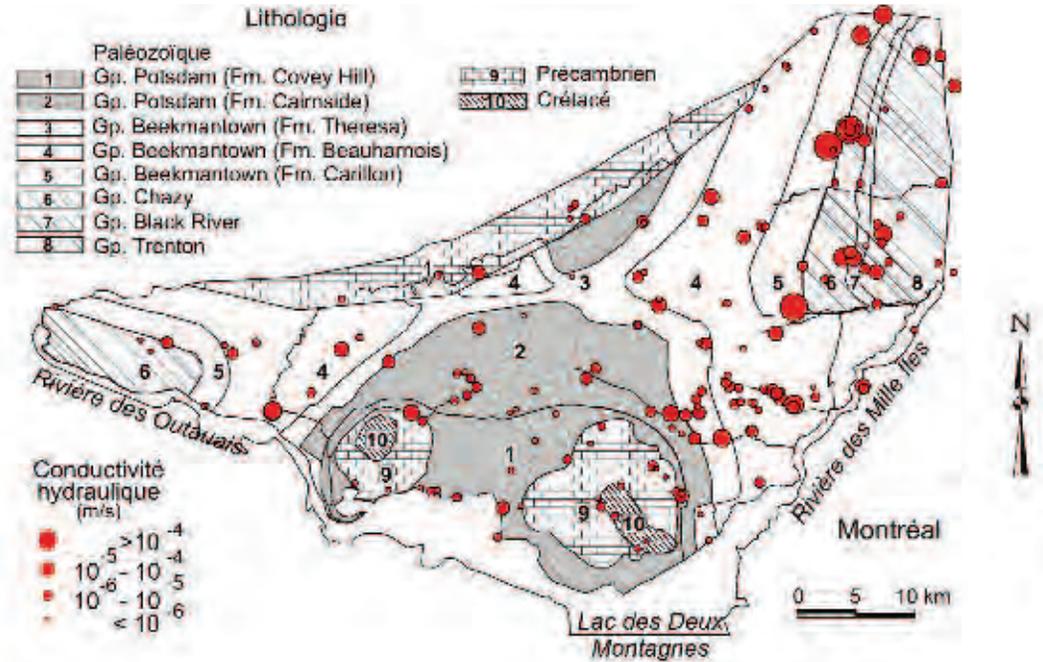


Figure 4.19 Contours des logarithmes de la conductivité hydraulique du roc fracturé et types d'essais utilisés. Projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

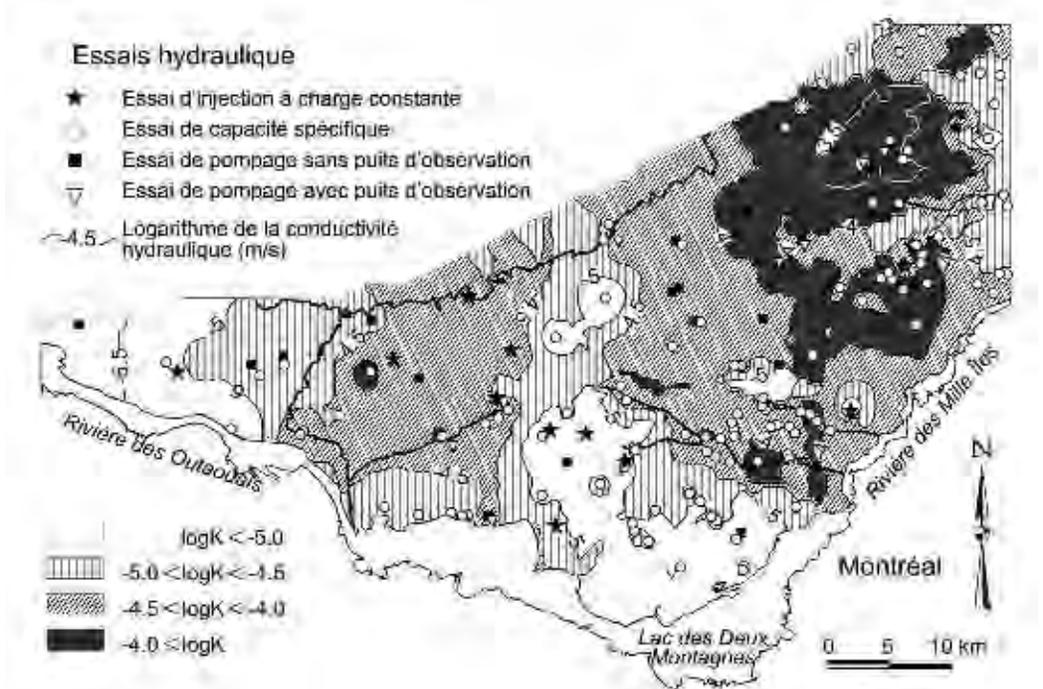


Figure 4. 20 Arbre décisionnel pour la caractérisation des propriétés hydrauliques.

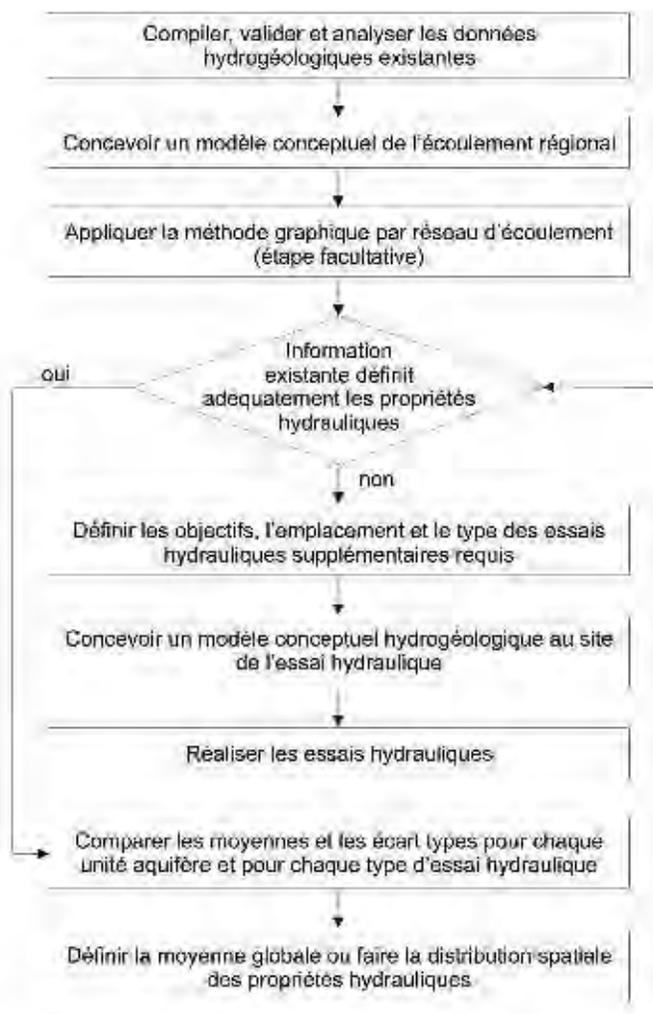


Tableau 4. 1 Comparaison des caractéristiques de certains essais hydrauliques.

TYPE D'ESSAI	OBTURATEURS PNEUMATIQUES	PERMÉABILITÉ IN SITU (SLUG TEST)	PRODUCTIVITÉ/CAP. SPÉCIFIQUE	ESSAIS DE POMPAGE
ÉCHELLE	LOCALE	LOCALE	LOCALE/INTERMÉD.	INTERMÉDIAIRE/AQUIFÈRE
Avantages	- données précises et détaillées	- simple, rapide - peu dispendieux - faible volume d'eau	- relativement simple et rapide - peu dispendieux	- données complètes - longue durée assure bonne représentativité - valeurs moyennes sur grands volumes
Inconvénients	- essais ponctuels - dispendieux - appareillage sophistiqué - injection d'eau dans les formations	- essais ponctuels - élimination d'eau pompée - injection d'eau pour l'essai à niveau descendant	- milieux perméables seulement - élimination d'eau pompée	- milieux perméables seulement - élimination d'eau pompée - puits d'observation - long et dispendieux - logistique complexe

Tableau 4. 2 Calcul de l'écoulement souterrain par le calage de la conductivité hydraulique.

No	ZONE DE RECHARGE	M	N	B (m)	ΔH (m)	K (m/s)	FLUX SOUTERRAIN (M ³ /AN)	%
1		2	5		50		1,639,872	
2	I	4	6	100	60	2,6x10 ⁻⁵	3,279,744	21,2
3		8	7		70		6,559,488	
4	II	6	3	100	30	2,6x10 ⁻⁵	4,919,616	9,1
5		7	5		50		5,739,552	
6	III	15	2	100	20	2,6x10 ⁻⁵	12,299,040	42,4
7		6	6		60		4,919,616	
8		1	6		60		819,936	
9	IV	13	5	100	50	2,6x10 ⁻⁵	10,659,168	21,2
10	V	4	5	100	50	2,6x10 ⁻⁵	3279744	6,1
Flux total (m ³ /an)							54,1x10 ⁶	
Recharge (mm)							43,3	

Tableau 4. 3 Exemples de conductivité hydraulique pour la caractérisation régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec.

ESSAI HYDRAULIQUE	N	K_{MIN} (M/S)	K_{MAX} (M/S)	K_M MOYENNE GÉOMÉTRIQUE (M/S)	$\sigma_{LOG K}$
1 Obturateurs pneumatiques (3,75 m)	328	$1,3 \times 10^{-10}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-7}$	1,40
2 Obturateurs pneumatiques (puits entier)	20	$3,8 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-6}$	0,90
3 Productivité du puits	132	$3,5 \times 10^{-8}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-5}$	0,83
4 Pompage sans puits d'observation	23	$1,4 \times 10^{-6}$	$6,7 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-5}$	0,79
5 Pompage avec puits d'observation	12	$1,0 \times 10^{-6}$	$7,9 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-4}$	0,86
Total (2+3+4+5)* 179	$3,5 \times 10^{-8}$	$7,9 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-5}$	0,89	

* Pour les puits où plusieurs types d'essais ont été appliqués, seulement la valeur provenant de l'essai de plus grande échelle a été retenue.

Tableau 4. 4 Nombre de points de contrôle par unité hydrogéologique pour la caractérisation du système aquifère régional du sud-ouest du Québec.

UNITÉ	NOUVEAUX FORAGES	CAPACITÉ SPÉCIFIQUE	ESSAI DE POMPAGE	<i>IN SITU SLUG TEST</i>	OBTURATEURS PNEUMATIQUES
Sable-gravier et roches très fracturées	9	6	6	13	-
Roches fracturées	23	132	35	27	328 intervalles (20 puits)
Total	32	138	41	40	328

Tableau 4. 5 Paramètres de forage. Étude locale de Saint-Benoît, projet sur les Basses-Terres du Saint-Laurent du sud-ouest du Québec.

FORAGE	STATION No	ÉLÉV. (m)	COORDONNÉES		D (m)	PROFONDEUR			STRATIGRAPHIE		LONGUEUR TROU OUVERT (m)
			X (m)	Y (m)		TOTALE (m)	AU ROC (m)	NAPPE (m)	ARGILE (m)	TILL (m)	
PZ-1	00_STB_P1	51,0	568843	5048325	0,15	29,3	29,2	29,2	27,1	2,1	1,5 *
PZ-2	00_STB_P2	50,0	568940	5048430	0,15	35,7	31,4	31,4	29	2,4	3,0 *
PZ-3	00_STB_P3	53,0	568585	5048460	0,15	25,8	24,3	24,3	21,9	2,4	1,5 *
PZ-4	00_STB_P4	51,0	568949	5048097	0,15	25,0	25,0	25,0	20,7	4,3	1,5 *
PZ-5	00_STB_P5	51,0	569273	5048677	0,15	36,3	34,5	34,5	22,9	11,6	1,5 *
F-1	00_STB_F1	51,0	569150	5049150	0,15	73,0	20,4	20,4	12,2	8,2	51,5
F-2	00_STB_F2	52,0	568859	5048850	0,15	49,7	35,3	35,3	21,3	14	13,8
F-3	00_STB_F3	50,0	569250	5048776	0,15	37,2	32,9	32,9	21,3	11,6	3,5
F-4	00_STB_F4	53,0	568573	5049045	0,15	103,6	21,3	21,3	15,2	6,1	81,2

*Crépine CPV 2"

Tableau 4. 6 Localité et caractéristiques des points de contrôle utilisés pour la définition de la distribution spatiale de la conductivité hydraulique des roches fracturées.

No	SOURCE	IDENTIFICATION DU PUIS	COORDONNÉES		ALTITUDE (m)	PROFONDEUR		UNITÉ HYDROSTRATIGRAPHIQUE	CONDUCTIVITÉ HORIZONTALE MOYENNE (m/s)	COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT	TYPE D'ESSAI - INTERPRÉTATION
			X (m)	Y (m)		DU PUIS (m)	DE LA NAPPE (m)				
1	BP	1982_4386	591 529	507 112	381,0	12,2	3,7	Dolomie	2,11E-04	-	Capacité spéc.
2	BP	1978_24580	590 129	505 862	74,7	26,8	0,9	Dolomie	2,15E-06	3,10E-03	Theis
3	BP	1978_25216	590 879	506 512	190,5	25,0	2,1	Grès	4,12E-06	-	Bower-Rice

5. CARACTÉRISATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE

Édith Bourque, Vincent Cloutier, René Lefebvre, Martine M. Savard et Richard Martel

L'eau souterraine provient de l'infiltration des eaux de pluie et de la fonte de la neige, et circule à travers un milieu perméable fait de matériaux géologiques granulaires ou fracturés. Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau souterraine sont fonction de la composition initiale de l'eau s'infiltrant dans l'aquifère, mais également des réactions de l'eau avec les minéraux et les gaz présents dans les zones non saturées et saturées des unités géologiques. Lors de son parcours, l'eau est impliquée dans de nombreux processus géochimiques (altération, dissolution, précipitation et sorption) qui modifient sa composition. Les modifications de composition chimique sont également fonction du temps de résidence de l'eau dans l'aquifère, qui peut varier de quelques mois à plusieurs décennies ou siècles, selon le contexte. Le cheminement de l'eau souterraine à travers les formations géologiques est évalué en définissant le contexte hydrogéologique et hydraulique du système. Il peut aussi en principe être déduit indirectement par l'étude des caractéristiques géochimiques des eaux résultant des interactions du milieu géologique avec l'eau.

5.1 Objectifs de l'évaluation de la qualité de l'eau souterraine

Une étude de caractérisation hydrogéologique régionale comporte inévitablement un volet hydrogéochimique, puisque la qualité de l'eau souterraine est tout aussi importante que sa quantité. Ainsi qu'il est décrit dans le texte qui suit, le programme de caractérisation hydrogéochimique régionale proposé compte trois volets.

5.1.1 Mesurer les concentrations naturelles des constituants de l'eau souterraine

La mesure des concentrations naturelles ou de la teneur de fond des constituants de l'eau souterraine est essentielle à l'évaluation de la qualité naturelle de cette eau et constitue le point de départ nécessaire au suivi ultérieur de sa qualité.

5.1.2 Évaluer la variabilité de la qualité de l'eau

La représentation graphique et cartographique des caractéristiques géochimiques de l'eau permet de visualiser les données et d'évaluer la variabilité régionale de la qualité de l'eau souterraine. Elle permet également d'ajouter des éléments à la compréhension de l'écoulement souterrain et des processus géochimiques déterminant la composition de l'eau souterraine (altération, dissolution, précipitation, échange ionique et sorption).

5.1.3 Cerner les problématiques de la qualité de l'eau d'origine naturelle ou anthropique

La géologie (contexte minéralogique) peut affecter la qualité naturelle des eaux souterraines. En effet, certains éléments comme le fer, le soufre, le manganèse, les carbonates de calcium et de magnésium (dureté totale), les fluorures, le baryum, l'arsenic, le sélénium, l'uranium, le cuivre, le zinc, le plomb et autres sont parfois présents dans les eaux à des concentrations particulièrement élevées sans que des sources de contamination anthropique ne soient mises en cause.

La qualité de l'eau souterraine peut également être compromise par des activités humaines potentiellement polluantes d'origine diverse : domestique et municipale (ex. : installations septiques, aménagement de lieux d'enfouissement sanitaires, épandage de sels déglacants, cimetières), agricole (ex. : épandage d'engrais chimique ou organique et de pesticides) ou industrielle (ex. : fuites de réservoirs d'hydrocarbures, contamination atmosphérique, sites d'enfouissement de déchets dangereux). Le tableau 5.1 présente, à titre d'exemple, une liste de problèmes relatifs à la qualité de l'eau souterraine qui peuvent survenir.

Les problématiques de contamination sont déterminées par la comparaison des concentrations d'éléments aux teneurs de fond et à des critères de qualité. Il est par la suite possible de découvrir les aquifères contenant des eaux de bonne qualité et pour lesquels des mesures de protection et de conservation de la ressource peuvent être nécessaires afin de préserver la qualité de l'eau souterraine (chapitre 7).



5.2 Choix des paramètres à mesurer et à analyser

Le choix des différents paramètres concernant les contrôles microbiologiques et les substances inorganiques, organiques, radiologiques ou isotopiques à mesurer doit permettre d'évaluer la qualité de l'eau relativement à des critères préétablis. Le choix des paramètres doit aussi permettre de découvrir les sources de contamination naturelles et anthropiques et les types d'eau.

Les usages pour lesquels la qualité de l'eau doit être évaluée sont les suivants : approvisionnement en eau potable, abreuvement d'animaux et irrigation. Les critères proposés sont ceux du gouvernement du Québec (2001), du Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable, du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail (2001) et du Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME, 1999). Les critères du CCME, contrairement aux critères du gouvernement du Québec, n'ont pas force de loi, à moins qu'il n'en ait été décidé autrement par les autorités provinciales, territoriales ou fédérales appropriées.

Des exemples de dépassements des critères de qualité d'eau pour les contrôles microbiologiques, les paramètres physico-chimiques à analyser en laboratoire, à calculer et à mesurer sur place sont présentés aux tableaux 5.2 à 5.4.

5.2.1 Paramètres microbiologiques

Le tableau 5.2 présente les paramètres microbiologiques qui permettent d'évaluer la qualité de l'eau, les critères de qualité correspondants et le nombre de dépassements des critères de qualité d'eau obtenus sur le territoire d'étude du Sud-Ouest québécois. Il est important de noter que la détermination de la présence de ces organismes doit être effectuée sur des échantillons d'eau brute avant la circulation de l'eau dans les systèmes de traitement.

5.2.2 Paramètres physico chimiques

Les principaux paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine qui permettent d'atteindre les objectifs mentionnés à la section 5.1 sont présentés aux tableaux 5.3 et 5.4. Des critères de qualité établis pour les différents usages de l'eau et le nombre de dépassements obtenus sur le territoire d'étude du Sud-Ouest québécois y sont aussi décrits.

Par ailleurs, certains paramètres doivent préférablement être mesurés directement sur le terrain lors du prélèvement des échantillons (tableau 5.4) puisque certaines propriétés chimiques de l'eau souterraine changent suite à l'échantillonnage.

Tous les paramètres pour lesquels des recommandations existent quant aux différents usages – eau potable, irrigation et abreuvement des animaux (CCME, 1999) – ne font pas partie des paramètres présentés aux tableaux 5.2 à 5.4. Une sélection des paramètres a été faite de façon à limiter le nombre de paramètres à analyser et les coûts d'analyse lors d'une étude régionale. Les critères qui ont guidé le choix des différents paramètres à analyser, à mesurer ou à calculer afin de réaliser une caractérisation hydrogéochimique régionale sont présentés au tableau 5.5.

Pour connaître les méthodes d'analyse en laboratoire, les agents de conservation et les limites de détection correspondants à ces paramètres, il faut se référer au document du gouvernement du Québec (2000) intitulé *Modes de prélèvement et de conservation des échantillons relatifs à l'application du Règlement sur la qualité de l'eau potable*.

5.3 Utilisation des données existantes

Des rapports et des bases de données contenant des résultats d'analyses géochimiques sont généralement disponibles et doivent être consultés. L'information puisée dans les bases de données géochimiques du MDDEP (analyses chimiques faites pour des échantillons de puits municipaux) et du MRNF (ex. : atlas géochimiques des eaux souterraines pour différentes régions du Québec), et dans les études hydrogéologiques réalisées par des firmes de consultants ou des ministères permet de déterminer les problématiques de la qualité de l'eau qui prévalent dans une région donnée. Les rapports et les bases de données fournissent aussi des indications utiles pour orienter la campagne d'échantillonnage. La consultation d'intervenants municipaux et de puisatiers ayant effectué des travaux dans le secteur à l'étude est également importante pour cerner les problématiques locales.

Les résultats d'analyses disponibles peuvent constituer des données géochimiques valables. Si les résultats sont récents et si les analyses chimiques sont effectuées sur des échantillons d'eau non traitée, ils peuvent être intégrés dans la base de données géochimiques qui sera utilisée pour la cartographie hydrogéochimique. Les analyses réalisées de façon périodique pour les sources d'approvisionnement en eau potable existantes et inventoriées par le MDDEP afin de surveiller la qualité de l'eau potable des réseaux de distribution municipaux ne concernent habituellement que les paramètres inorganiques régis par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (tableaux 5.2 à 5.4). Elles correspondent principalement aux analyses des métaux effectuées sur des échantillons d'eau traitée. Ces résultats sont souvent insuffisants pour atteindre tous les objectifs de caractérisation hydrogéochimique (section 5.1).

Les données géochimiques existantes qui ne sont pas valables pour la cartographie hydrogéochimique peuvent toutefois être utiles pour étudier l'évolution de la qualité de l'eau en fonction du temps et d'une problématique particulière.

5.4 Paramètres à analyser pour des cas particuliers

Cette section décrit des outils de caractérisation des eaux souterraines ou de leurs matières dissoutes qui pourraient s'avérer nécessaires, après la caractérisation régionale d'un système aquifère, dans des cas précis de dépassement de critères de qualité ou de besoin de modélisation de la dynamique des eaux. Le lecteur deviendra ainsi informé des types de travaux hydrogéochimiques possibles dans ces contextes.

5.4.1 Paramètres organiques et radiologiques

Les paramètres organiques (pesticides, hydrocarbures et autres) et radiologiques ne sont habituellement pas mesurés lors d'études régionales sur la qualité de l'eau souterraine. Dans certains cas, il peut toutefois être intéressant de profiter de campagnes d'échantillonnage régional pour étudier une problématique particulière. On recommande de consulter des représentants du MDDEP et du département de santé publique pour vérifier si des problèmes de qualité d'eau ont été relevés dans le secteur à l'étude, et s'il existe un intérêt pour effectuer des analyses pour des paramètres organiques ou radiologiques (voir aussi la section 5.3.2).

5.4.2 Paramètres isotopiques

Les changements dans l'abondance des isotopes d'un élément chimique permettent de comprendre les processus environnementaux produisant les phases naturelles telles que l'eau. En conséquence, l'application de la géochimie isotopique à l'hydrologie et à l'hydrogéologie permet d'aborder une vaste gamme de problématiques (tableau 5.6). La présente section vise à montrer des exemples courants de caractérisation des eaux souterraines. Pour les bases théoriques, les types d'échantillons à prélever, les interprétations détaillées et la modélisation, le lecteur pourra consulter les ouvrages cités plus loin, traitant des diverses thématiques de façon exhaustive.

Causes du changement dans l'abondance des isotopes d'un élément

Les variations de l'abondance des isotopes dans les matrices naturelles résultent de deux processus : l'effet isotopique, responsable de la distribution des isotopes dont le noyau atomique est stable, et la radioactivité, responsable du changement dans l'abondance des éléments dont le noyau atomique est instable (voir le lexique à l'annexe A). L'effet isotopique régit la distribution des isotopes stables des éléments légers, comme les H, C, N, O et S, par un fractionnement inhérent à des molécules de masses différentes, de même comportement chimique mais de comportement physique différent. La radioactivité entraîne quant à elle un changement dans l'abondance de l'isotope père, qui se désintègre, et de l'isotope fils, qui s'accumule (Mook, 2001).

La reconnaissance de l'origine des eaux souterraines et de leur mélange fait classiquement l'objet d'études isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène. Ces rapports isotopiques expriment les changements dus au processus de distillation des masses nuageuses lors de leur déplacement sur les continents et en altitude (Clark et Fritz, 1997). La droite des précipitations mondiales possède une position immuable dans l'espace $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ (Rozanski et autres, 1993; figure 5.1). Lors d'études régionales, il est généralement requis d'établir la droite des eaux de précipitations locales afin de la comparer avec les attributs des eaux souterraines. L'éloignement des courbes locales de la droite mondiale dépend des conditions climatiques au moment de l'évaporation, du début du cycle hydrologique et de l'endroit des précipitations (exemple de la droite du sud-ouest du Québec, figure 5.1). Ces attributs isotopiques seront transmis localement aux eaux souterraines. Plusieurs processus peuvent par la suite modifier les rapports isotopiques des eaux souterraines. Parmi les processus les plus communs des conditions climatiques québécoises, il y a l'interaction eau-roche de basses températures en bassin sédimentaire et le mélange avec des eaux plus salines (Clark et Fritz, 1997; voir les courbes hypothétiques de la figure 5.1).

En ce qui concerne la contamination des eaux souterraines par les nitrates, la combinaison des isotopes de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) facilite la discrimination des sources potentielles et la caractérisation des processus de dénitrification lorsqu'ils sont effectifs (Kendall, 1998; figure 5.2). Les rapports isotopiques des nitrates définissent clairement des champs variés selon leur source : précipitations, fertilisants et fumiers ou fosses septiques. De plus, la dénitrification bactériologique progressive entraîne un enrichissement graduel en isotopes lourds chez les nitrates résiduels (valeurs $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{18}\text{O}$ plus élevées). Pour les aquifères en zones rurales et agricoles, la méthode couplée à une mise en contexte judicieuse permet donc de distinguer les nitrates provenant de l'épandage de fertilisants chimiques ou des fosses septiques et des fumiers. L'analyse de plusieurs échantillons de nitrates dissous dans l'eau souterraine et sélectionnés le long d'une ligne d'écoulement permettra quant à elle de reconnaître si l'atténuation naturelle a lieu et, le cas échéant, d'estimer la proportion des nitrates d'origine qui est encore présente (Aravena *et al.*, 1993; Kendall, 1998).

Finalement, la datation des eaux souterraines utilisant les isotopes radioactifs et radiogènes permet à la fois d'estimer l'âge des eaux et d'étudier leur dynamique (tableau 5.7). Les eaux souterraines peuvent avoir des âges très variables et donc, des taux de recharge et des vitesses d'écoulement fort variables à l'intérieur d'un même secteur. Les résultats isotopiques – stables et radioactifs combinés ou non – peuvent servir à modéliser le cycle hydrologique d'une région, l'écoulement souterrain et le transport des substances dissoutes.

5.5 Programme d'échantillonnage de l'eau souterraine

5.5.1 Objectifs du programme d'échantillonnage

Les objectifs du programme d'échantillonnage sont nombreux :

- 1) caractériser les aquifères exploités ou exploitables comme sources d'approvisionnement en eau (municipales et privées), tant en conditions libres que captives;
- 2) caractériser l'eau souterraine dans les différentes unités hydrogéologiques des zones de recharge ou d'émergence;
- 3) obtenir les données géochimiques nécessaires à la compréhension des problématiques de qualité régionale liées aux sources naturelles ou anthropiques de contamination.

5.5.2 Nombre d'échantillons à prélever

Plusieurs facteurs sont à considérer pour évaluer le nombre minimal de puits à échantillonner sur un territoire donné lors d'une étude de caractérisation hydrogéochimique. Il faut en effet tenir compte :

- du contexte géologique (diversité des formations géologiques à caractériser : formations granulaires ou rocheuses, captives ou à surface libre);
- des objectifs particuliers de l'étude de caractérisation (ex. : études de problématiques de contamination comme la salinité de l'eau causée par la présence d'eau marine ou l'épandage de sels déglaçants, la présence de nitrates attribuable à l'épandage de fertilisants et la présence de pesticides ou d'autres composés organiques);
- de la distribution des puits sur le territoire à l'étude;
- du budget disponible;
- de la quantité des rapports d'analyses chimiques disponibles et utilisables.

À la section 3.1, la division du territoire à caractériser en sous-bassins hydrogéologiques (à l'aide de la carte piézométrique préliminaire) est proposée pour déterminer les sites de mesure des niveaux piézométriques. Ces sous-bassins sont aussi utiles pour déterminer les zones de recharge et d'émergence, et les lignes d'écoulement de l'eau souterraine. Des cartes géologiques des formations superficielles, du socle rocheux et des épaisseurs de dépôts meubles, combinées à des coupes stratigraphiques, permettent de bâtir un modèle conceptuel d'écoulement de l'eau souterraine qui guidera le choix des sites où il est nécessaire de prélever des échantillons d'eau afin de bien caractériser le système d'écoulement.

5.5.3 Sélection des puits à échantillonner

Pour limiter les coûts, l'évaluation de la qualité de l'eau de puits existants est recommandée. Le système d'information hydrogéologique (SIH), communément appelé *base de données des puisatiers du MDDEP*, constitue la principale source d'information disponible pour identifier des sites potentiels d'échantillonnage en ce qui concerne les puits tubulaires privés ou municipaux aménagés dans des aquifères rocheux ou granulaires. On y retrouve plusieurs informations relatives aux caractéristiques d'un puits. Cette base de données ne contient toutefois pas d'information relative aux autres installations de captage aménagées dans les formations granulaires de type pointes filtrantes, puits de surface ou captage de sources. Les secteurs desservis par ce type d'installation peuvent être déterminés par les inspecteurs municipaux, et pour les puits privés il est nécessaire de consulter les propriétaires des puits pour obtenir les informations requises quant à la construction de leur puits.



Lorsqu'on désire caractériser les ressources en eau souterraine de façon régionale, la représentativité des puits à échantillonner est importante. Les avantages et les inconvénients de la sélection des différents types d'ouvrages de captage pouvant être utilisés pour l'échantillonnage sont présentés au tableau 5.8.

5.6 Protocole d'échantillonnage

5.6.1 Prélèvement et conservation des échantillons

Pour évaluer la qualité des ressources en eau souterraine, des précautions doivent être prises afin d'assurer l'intégrité des échantillons prélevés, de minimiser la contamination lors de l'échantillonnage et d'obtenir les résultats d'analyse les plus représentatifs possible. Le document *Modes de prélèvement et de conservation des échantillons relatifs à l'application du Règlement sur la qualité de l'eau potable* du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2000) et le *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* rédigé par le MEF (cahier 1 : Généralités et cahier 3 : Échantillonnage des eaux souterraines, 1994) fournissent des informations pertinentes quant aux procédures d'échantillonnage à suivre. Ils renseignent sur l'élaboration du programme d'échantillonnage, le matériel à utiliser, la filtration, la conservation (type de bouteilles et agents de conservation), l'entreposage et le transport des échantillons, les délais d'analyses à respecter, et les contrôles de qualité. Certaines informations contenues dans ces documents sont présentées succinctement à l'annexe B, mais il est fortement recommandé de lire ces documents avant de conduire des études de caractérisation hydrogéochimique.

5.6.2 Contrôle de la qualité de l'échantillonnage et des analyses

Un programme d'assurance qualité est essentiel afin de s'assurer que les procédures d'échantillonnage, d'analyse et de mesure sont adéquates. Ce programme doit être documenté et vérifiable. La qualité des échantillons, des dosages et du matériel d'échantillonnage est habituellement évaluée par l'analyse de duplicata. Le pourcentage d'échantillons à prélever en duplicata jugé suffisant est de 5 % pour des études régionales. Des blancs de transport et de lavage des équipements doivent être effectués lorsque des analyses pour des composés organiques volatils sont effectuées (MEF, 1994).

5.6.3 Informations à noter

Plusieurs informations doivent être notées lors de l'échantillonnage de façon à faciliter l'interprétation des résultats d'analyse. La plupart de ces informations devraient être transcrites ultérieurement dans une base de données et seront utiles pour le traitement et l'analyse des résultats (chapitre 6)

5.7 Traitement des données géochimiques

5.7.1 Outils informatiques

Divers logiciels permettent de traiter les données géochimiques. Ils servent principalement à intégrer les données sur la qualité de l'eau, à créer une base de données géochimiques, à vérifier la qualité des résultats d'analyse (l'électroneutralité de la solution, section 5.6.2), à calculer certains paramètres (ex. : matières dissoutes totales, dureté totale, taux d'adsorption du sodium), à effectuer des calculs statistiques et à présenter les données sous forme de graphiques et de diagrammes. Les données géochimiques devraient être géoréférencés de façon à réaliser des cartes hydrogéochimiques (Waterloo Hydrogeologic, 1999).

5.7.2 Vérification de la qualité des résultats d'analyses chimiques

Des vérifications de l'équilibre chimique (électroneutralité de la solution) sont nécessaires pour chaque échantillon afin de détecter des erreurs d'analyse. Lorsque l'équilibre cations/anions représente une erreur inférieure à 5 %, les résultats sont considérés fiables, entre 5 et 10 % les résultats peuvent être utilisés avec réserve et lorsque l'erreur se trouve supérieure à 10 %, on conseille habituellement de rejeter les résultats. Le contrôle de la qualité des données est aussi réalisé par la comparaison des résultats d'analyse des échantillons prélevés en duplicata.

5.7.3 Traitement statistique des données

Il est utile d'effectuer des calculs statistiques (moyennes, médianes, minimum, maximum, écart-type) afin de faire ressortir les caractéristiques physico-chimiques des différentes formations aquifères (tableau 5.9). Il est recommandé d'élaborer des statistiques respectives pour les échantillons d'eau provenant de différents types d'unités hydrogéologiques (ex. : formations granulaires de surface, sédiments enfouis et roc) afin de distinguer les particularités hydrogéochimiques de chacune des unités. La variabilité de la qualité de l'eau relative aux différents paramètres peut ainsi être évaluée. Lorsque les valeurs des paramètres mesurés sont inférieures aux limites de détection (ex. : pour le fer, le manganèse, etc.), il est nécessaire de supposer pour ces échantillons des concentrations égales aux limites de détection ou à la demie de la limite de détection afin de pouvoir faire des calculs statistiques.

Soulignons que les statistiques sont utilisées à titre indicatif parce que les données ne suivent pas nécessairement une distribution normale et que le nombre de données est parfois limité.

5.8 Évaluation de la qualité de l'eau

5.8.1 Dépassements des critères de qualité d'eau

Les dépassements des critères de qualité d'eau doivent être comptabilisés et peuvent être présentés sous forme de tableaux où les critères, le nombre de dépassements et le nombre total d'échantillons analysés sont notés (tableaux 5.2 à 5.4).

5.8.2 Signalement des dépassements des critères de qualité d'eau

À la suite de l'évaluation de la qualité de l'eau au moyen des critères de qualité, il est important de signaler le problème aux propriétaires de puits pour lesquels des dépassements des critères CM et CMA de qualité d'eau ont été mesurés pour les paramètres microbiologiques et inorganiques et les référer à des intervenants du MDDEP qui leur fourniront les informations nécessaires quant aux mesures à prendre (ex. : désinfecter le puits, faire bouillir l'eau, traiter l'eau ou abandonner le puits). Le dépassement de critères OE n'a pas à être signalé puisqu'il ne comporte pas de risques pour la santé, mais il peut être indiqué à titre informatif.

5.9 Représentation graphique et cartographique de la qualité de l'eau

La représentation graphique et cartographique des résultats d'analyses physico-chimiques aide à la compréhension des caractéristiques hydrogéochimiques qui ont une variabilité spatiale, lithologique (relativement au type de formation géologique) et hydrogéologique (aquifères granulaires, rocheux, libres ou captifs). Différentes façons de présenter de façon graphique et cartographique des résultats d'analyses chimiques sont proposées dans les sections qui suivent. Aucune illustration de carte isoligne (avec des courbes d'isoconcentration) n'est présentée. Les cartes d'isoconcentration sont surtout utilisées lorsqu'une grande quantité de résultats d'analyses ou de mesures physico-chimiques sont disponibles pour un secteur donné. Une campagne de caractérisation régionale permet rarement d'obtenir assez de mesures physico-chimiques pour



produire des cartes d'isoconcentration qui sont valables. On recommande donc de réaliser des cartes à points. Dans le cas où des cartes d'isoconcentration sont faites, il est très important de présenter les points de contrôle qui ont servi à réaliser la carte afin de faciliter l'interprétation des courbes.

5.9.1 Cartes à points

Les cartes à points montrent de façon géographique les concentrations d'éléments chimiques présents dans l'eau. L'utilisation de points dont la grosseur est proportionnelle à la concentration d'un élément chimique présent dans l'eau (figure 5.4), et qui sont placés à l'emplacement des sites d'échantillonnage, permet ainsi d'évaluer la variabilité régionale d'un paramètre particulier. La proportionnalité entre les points ou les symboles et la concentration d'un élément peut être constante, ou fonction de son logarithme, de sa racine carrée ou de son carré. Il est ainsi possible de déterminer les principales caractéristiques géochimiques de l'eau et de distinguer des tendances particulières pour certains secteurs. Ces cartes fournissent des indices quant aux facteurs déterminants de la qualité de l'eau et des particularités géochimiques. On recommande de réaliser des cartes à points pour tous les paramètres mesurés ou analysés et de les utiliser comme documents de travail. Par la suite, les cartes qui fournissent des informations intéressantes, par exemple celles qui montrent les variations liées aux contextes géologiques et hydrogéologiques, sont choisies pour le rapport d'étude. Les principaux paramètres qu'il est généralement intéressant de cartographier sont les suivants : les paramètres pour lesquels des dépassements des critères de qualité sont souvent observés tels que les chlorures, le sodium, le fer, le manganèse, la dureté totale, les fluorures et les sulfures; les paramètres qui fournissent des indices relatifs aux conditions hydrogéologiques (zones de recharge/d'émergence, nappes libres/confinées) tels que l'oxygène dissous; et les paramètres qui permettent de détecter une contamination possible par les activités agricoles (utilisation de fertilisants, irrigation) ou les installations septiques tels que les nitrates, l'azote ammoniacal et le taux d'adsorption du sodium (TAS).

5.9.2 Statistiques présentées à l'aide de diagrammes en boîte (box plot)

La distribution et les caractéristiques statistiques de la concentration d'un constituant de l'eau pour divers regroupements d'échantillons (ex. : unités géologiques ou hydrogéologiques) peuvent être représentées à l'aide de diagrammes en boîte. Le choix des paramètres à présenter avec les diagrammes en boîtes peut être fait au moyen des cartes à points (section 5.9.1). La boîte est délimitée par les percentiles 25 et 75 et une droite est tracée à la valeur médiane (figure 5.5). La médiane fournit une mesure de la tendance centrale des données qui n'est pas influencée par les valeurs extrêmes. Si la médiane est placée au milieu de la boîte, la distribution des données est normale et l'étendue de la boîte indique l'étalement des données. Dans l'exemple présenté, seules quelques analyses excèdent la concentration en F acceptable dans l'eau potable. De plus, il est clair que les concentrations en Sr les plus élevées sont associées à certaines unités calcaires.

5.9.3 Représentation cartographique des types d'eau relativement aux contextes hydrogéologiques

Il est fort utile de classifier les eaux souterraines par types sur la base de leur composition chimique (tableau 5.10). Les types d'eau se distinguent par leurs ions dominants caractérisant des faciès chimiques qui sont calculés en convertissant les concentrations en mg/l des cations et des anions majeurs (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4 et HCO_3) en milliéquivalents par litre (még/l), et finalement en milliéquivalents (%).

Le type d'eau devrait être identifié par tous les cations et les anions importants. L'UNESCO (1975) mentionne que la valeur de 20 % (még/l) du total des cations et des anions est une valeur éprouvée en pratique pour identifier les éléments majeurs qui servent à déterminer le type d'eau. On parle par exemple d'eau « chlorurée sodique » ou « bicarbonatée calcique » pour des eaux dont les chlorures et le sodium ou les bicarbonates et le calcium sont respectivement les ions majeurs (Hem, 1989). Un exemple de détermination de type d'eau est présenté au tableau 5.10.



Pour visualiser la variabilité régionale de la composition chimique de l'eau, les types d'eau déterminés sont présentés à l'aide de symboles différents (figure 5.6). De façon à limiter le nombre de types d'eau et de symboles à utiliser, seuls le cation et l'anion dominants ont été utilisés pour décrire le type d'eau. Une carte des contextes hydrogéologiques par rapport au type d'aquifère est utilisée comme fond de carte pour illustrer ces résultats. La distribution des types d'eau fournit des informations générales et ne doit pas être considérée comme étant précise. Les types d'eau donnent en fait des indices quant à la compréhension du contexte hydrogéologique et du système d'écoulement de l'eau souterraine comme l'identification des zones de recharge et des enclaves d'eau saline. Une suggestion de symboles et de couleurs est présentée au tableau 5.11.

5.10 Représentation cartographique des types d'eau relativement aux contextes géologiques par les diagrammes radiaux et de Stiff

Une autre façon de visualiser la variation régionale des types d'eau est de représenter la composition chimique (ions majeurs) de l'eau à l'aide de diagrammes radiaux (McNeely et Neimanis, 1978) placés aux sites d'échantillonnage sur un fond de carte géologique du socle rocheux (figure 5.7) ou sur des unités hydrogéologiques par exemple (figure 5.6). Le choix du fond de carte dépend de la provenance des échantillons d'eau. Les diagrammes radiaux permettent de voir la distribution des différents types d'eau, grâce à l'orientation des apex du polygone, selon le principe d'une rose des vents. Ces diagrammes ont été réalisés à l'aide de l'application DGMEau (Boies, 2001) conçue à la CGC-Québec.

La grosseur des cercles composant les diagrammes radiaux est proportionnelle à la racine carrée des concentrations en matière dissoute totale (MDT). Ceci permet de distinguer la minéralisation des eaux et de les comparer, même lorsque les concentrations en MDT sont très variables. Le rayon de la bissectrice des polygones est ainsi proportionnel à la racine carrée de la concentration d'un ion de même que le polygone résultant. Un autre type de diagramme radial (figure 5.8a) peut être réalisé à l'aide d'Aquachem (Waterloo Hydrogeologic, 1999). On recommande d'utiliser les couleurs correspondantes aux types d'eau présentés au tableau 5.11 pour chaque diagramme.

DGMEau permet aussi de réaliser des diagrammes de Stiff (figure 5.8b) qui peuvent remplacer les diagrammes radiaux. Les diagrammes de Stiff présentent les données géochimiques sous forme de polygones dont les apex correspondent aux concentrations des ions en $\text{m}\mu\text{g/l}$; les données sont placées sur trois à quatre axes horizontaux (échelle linéaire ou logarithmique) s'étendant de chaque côté d'un axe central vertical qui sépare les concentrations des cations d'un côté et celles des anions de l'autre. Les couples de cations-anions sont Na-Cl ou Na-K-Cl, Ca-HCO₃, Mg-SO₄ et parfois Fe-NO₃; ils se trouvent souvent en concentration très faible. Ces polygones de formes distinctes illustrent bien les variabilités et les similarités chimiques de l'eau de façon géographique, mais il peut être difficile de les représenter tous sur une même carte lorsque la quantité d'analyses à comparer est importante.

Pour la localisation des points d'échantillonnage, il est recommandé d'utiliser des symboles différents (figure 5.9) de façon à faire ressortir schématiquement les particularités (nappes libres, captives, sources, etc.). À ces symboles sont ajoutés les attributs du puits (profondeur, type de puits, etc.) et de l'échantillon (conductivité).

5.10.1 Présentation graphique des types d'eau à l'aide de diagrammes de Piper

Les diagrammes de Piper sont utiles pour présenter visuellement, sur un même diagramme, les concentrations des ions majeurs sur une base de pourcentage et pour déceler des regroupements d'échantillons (figure 5.10a). Ces diagrammes permettent d'identifier les types d'eau. En effet, des eaux dont le type est différent apparaîtront à des endroits distincts à l'intérieur du losange qui constitue une partie d'un diagramme de Piper (Appelo et Postma, 1993). De façon à préciser les ions dominants, on doit se reporter aux triangles. À l'intérieur du losange, les cercles sont proportion-



nels aux concentrations en matières dissoutes totales (MDT). L'évolution de la qualité de l'eau le long d'une ligne d'écoulement peut aussi être déterminée au moyen de ces diagrammes, et le mélange de deux types d'eau peut également être déduit de la position des échantillons sur le diagramme. L'échantillon constitué du mélange d'eaux de types différents devrait en effet être situé sur une ligne droite entre les deux types d'eaux mélangés (Hounslow, 1995). Par exemple, les concentrations en ions majeurs de 146 échantillons d'eau sont présentées à l'aide d'un diagramme de Piper à la figure 5.10b (projet de caractérisation du sud-ouest du Québec).

5.11 Qualité de l'eau pour l'irrigation

5.11.1 Taux d'adsorption du sodium (TAS)

Le taux d'adsorption du sodium (TAS) exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange avec les ions calcium et magnésium adsorbés des sols argileux. Ces échanges causent des dommages à la structure du sol. Le TAS sert donc à déterminer si l'eau est appropriée aux fins d'irrigation agricole. Une carte des valeurs de TAS (figure 5.4) permet de découvrir les secteurs où le TAS est élevé et où l'irrigation agricole peut être problématique. Les valeurs de TAS qui peuvent être problématiques varient avec les types de sols et de cultures.

5.11.2 Diagramme de Wilcox

Les diagrammes de Wilcox (figure 5.11) permettent de classer les eaux d'irrigation selon le risque de salinisation (conductivité électrique ou MDT) et le risque de sodification (taux d'adsorption du sodium) (Hounslow, 1995).

5.12 Recommandations relatives à la conservation de la ressource

Le processus de cartographie hydrogéochimique peut mener à cerner des problématiques régionales de qualité d'eau et les aquifères qui doivent être protégés. Des mesures préventives pour éviter la contamination de l'eau souterraine peuvent alors être appliquées. Elles peuvent consister à aménager et à échantillonner périodiquement un réseau de puits d'observation ou à instaurer des mesures de protection locales. Dans certains cas, des limitations en ce qui concerne l'utilisation du sol peuvent être recommandées à l'intérieur de périmètres de protection autour de puits municipaux (voir le chapitre 7). Dans d'autres cas, il peut être nécessaire de recommander le traitement de l'eau souterraine avant son usage ou d'en proscrire l'utilisation.

Figure 5.1 Caractérisation d'eaux souterraines à l'aide des rapports isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$. À titre d'exemple, la droite faite de tirets représente les rapports isotopiques des précipitations locales et la droite pointillée, un mélange hypothétique des eaux fraîches et salines.

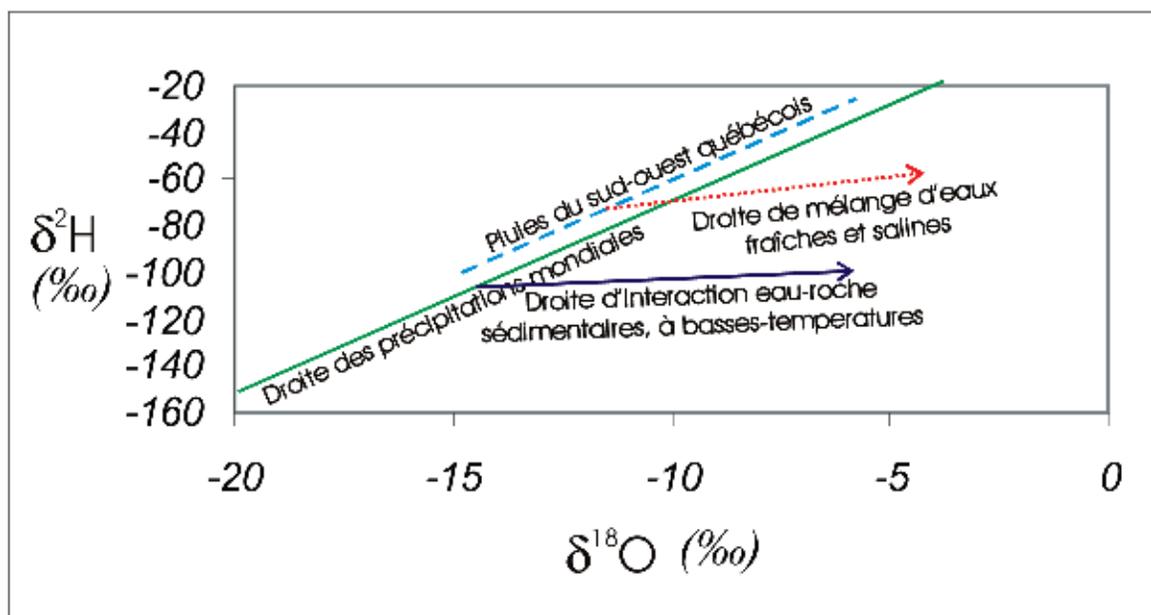


Figure 5.2 Caractérisation des nitrates dans l'environnement à l'aide des rapports isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (figure modifiée de Kendall, 1998).

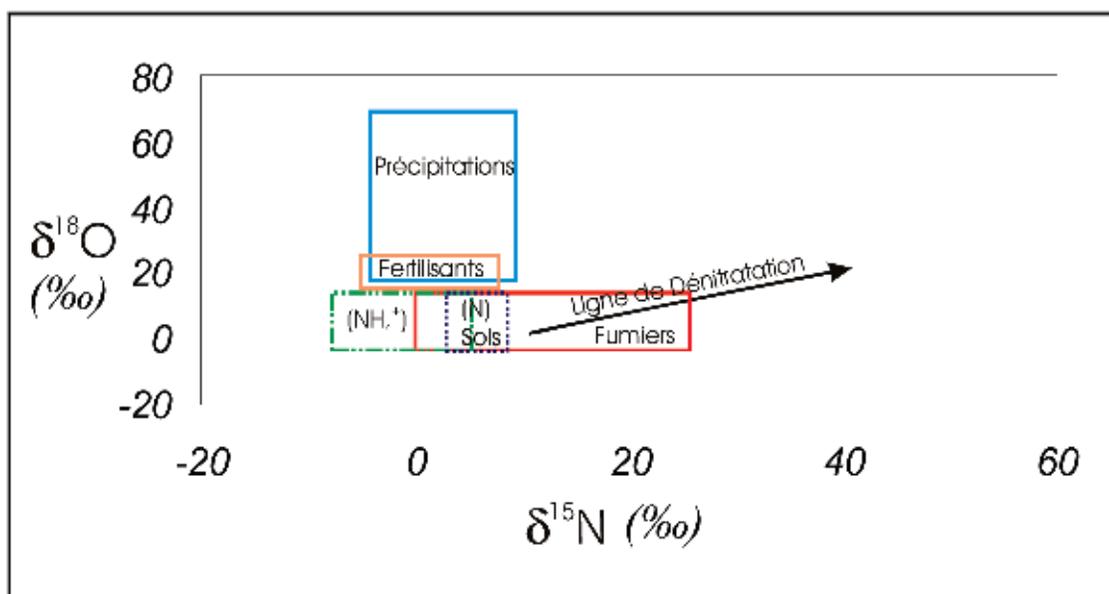


Figure 5.3 Distribution régionale des âges obtenus par datation ^3H et ^{14}C des eaux souterraines du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec.

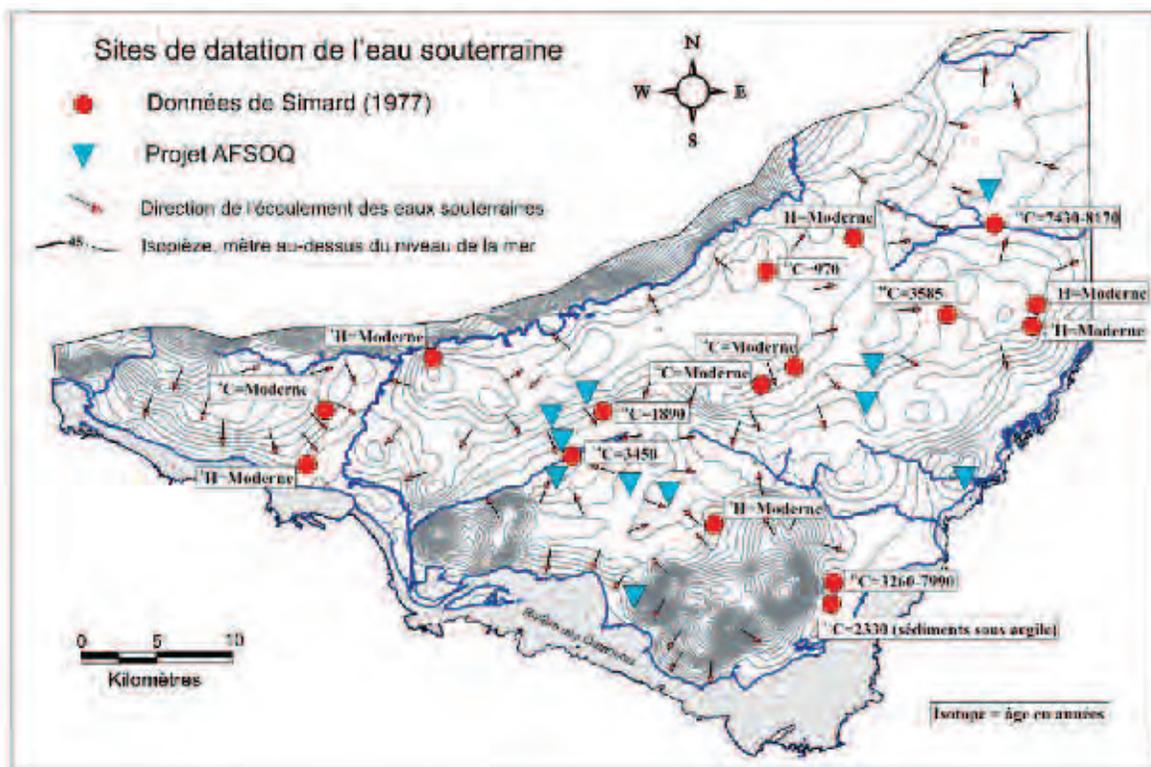


Figure 5.4 Carte à points du taux d'adsorption du sodium (TAS) des eaux souterraines du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (modifiée de Savard *et al.* [sous presse]).

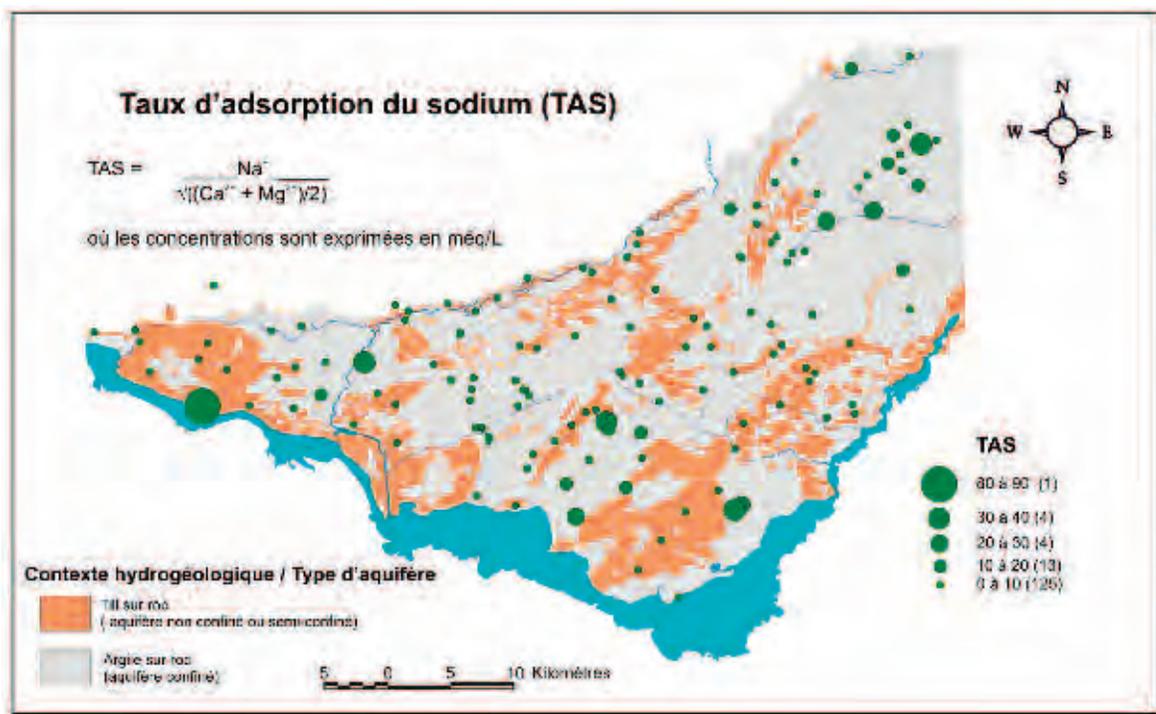


Figure 5.5 Diagramme des concentrations en fluorures et en strontium des eaux souterraines du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec pour différentes unités géologiques d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (modifié de Cloutier *et al.*, 2001).

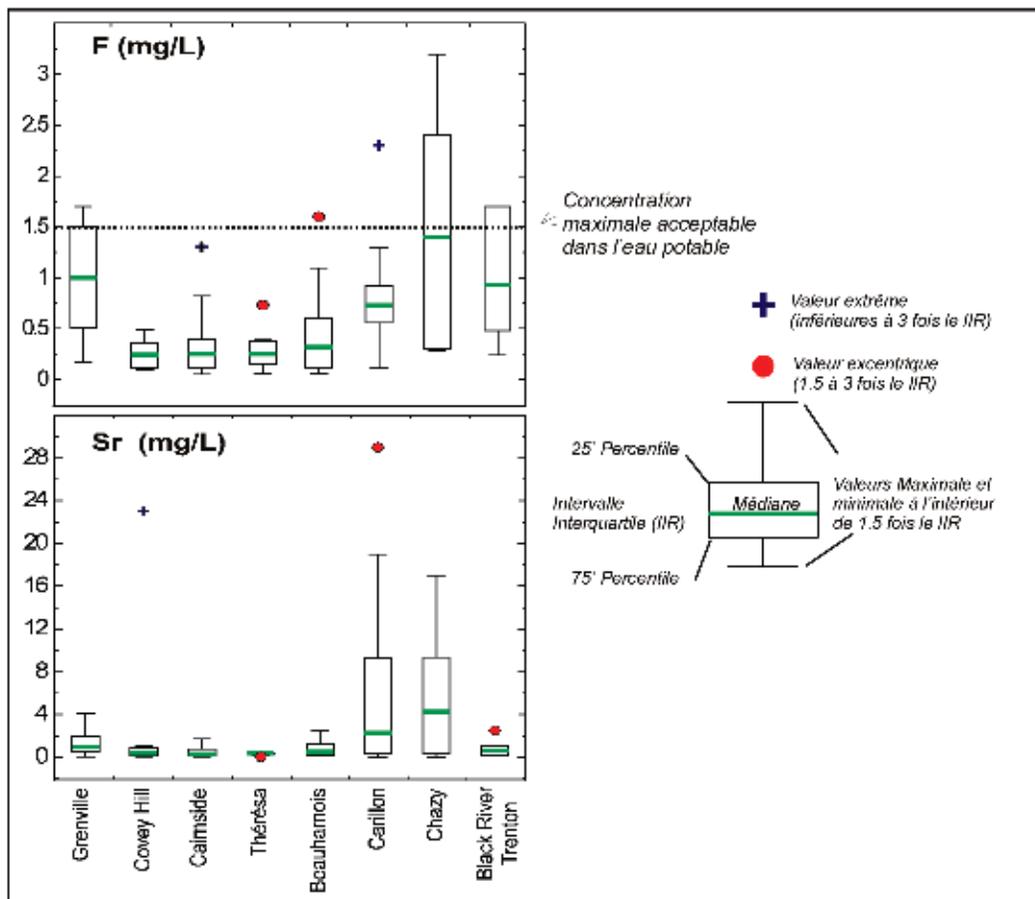


Figure 5.6 Carte des types d'eau souterraine du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (modifiée de Savard *et al.* [sous presse]).

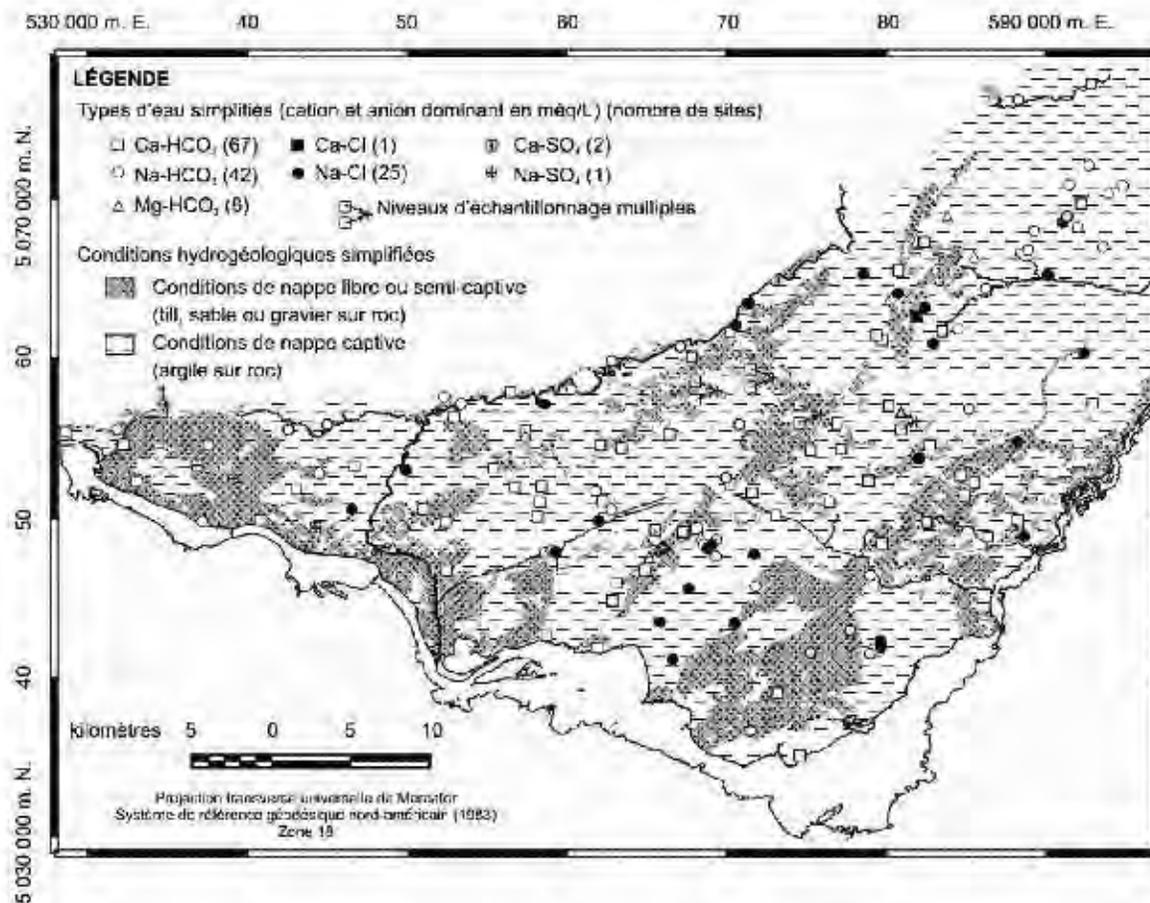




Figure 5.7 Diagrammes radiaux des types d'eau souterraine du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (figure modifiée de Savard *et al.* [sous presse]).

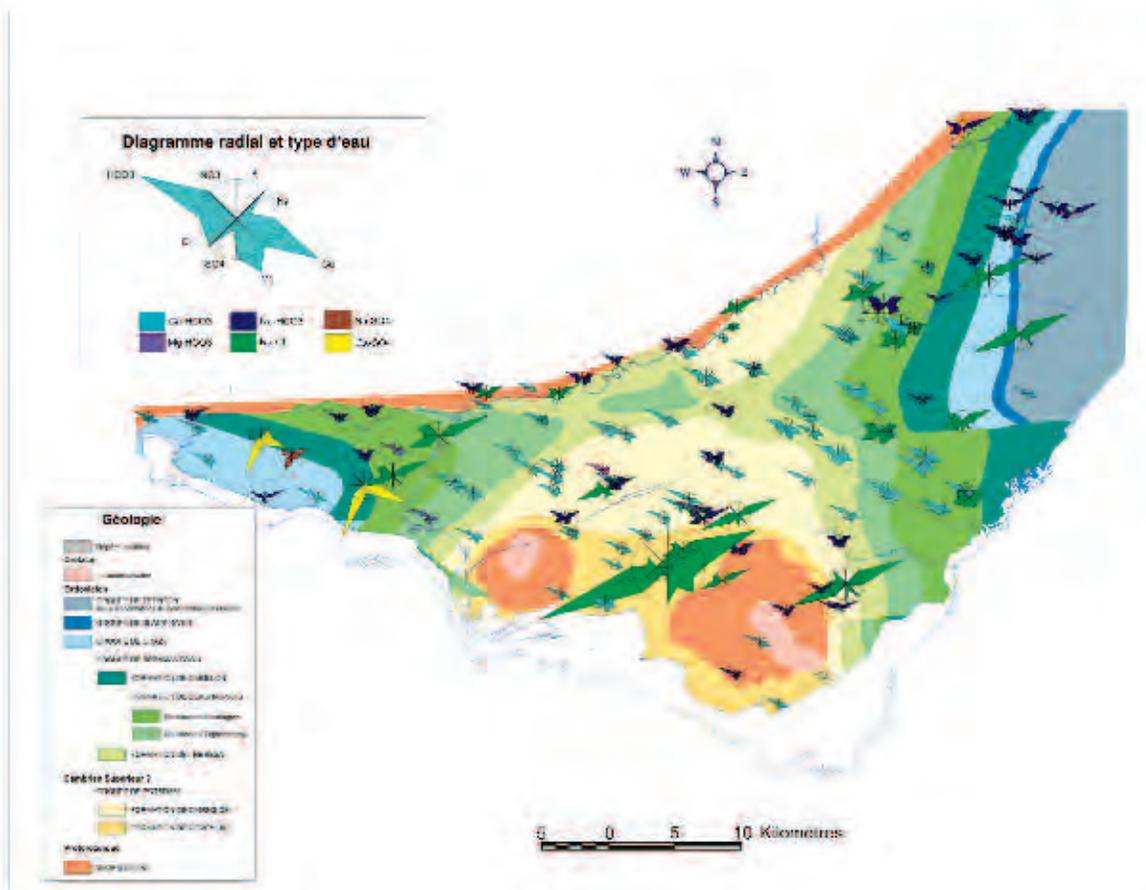


Figure 5.8 Exemple de diagrammes montrant les résultats pour l'échantillon JOSE11 : a) diagramme radial ; b) diagramme de Stiff.

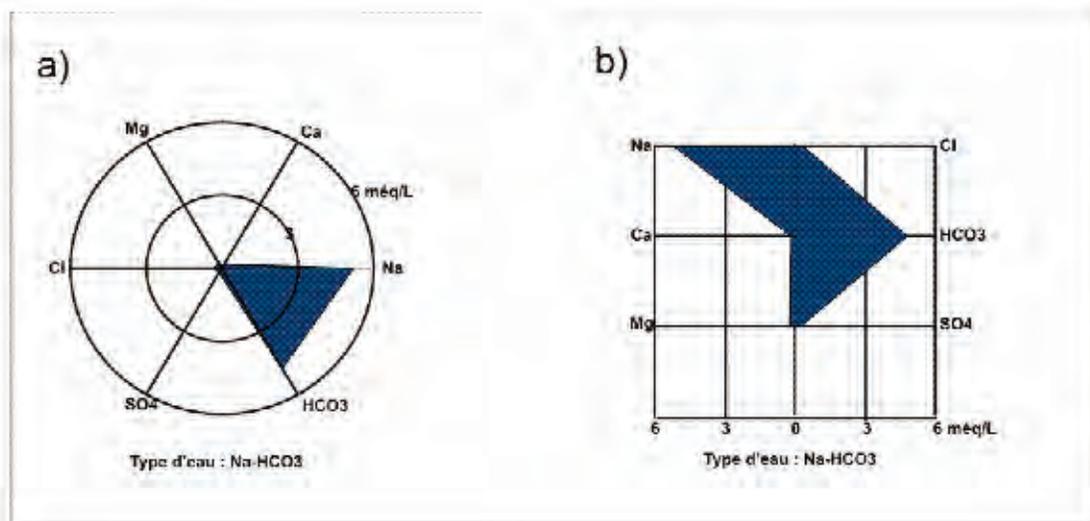


Figure 5.9 Symboles à utiliser pour représenter la localisation d'un point d'échantillonnage d'eau sur une carte.

Point d'échantillonnage

puits terminé dans les dépôts meubles (nappe libre)
 puits terminé dans les dépôts meubles (nappe captive)

source non-captée
 source captée

Exemple

1- nom de l'échantillon
 2- conductivité spécifique (microS/cm)
 3- type de puits/ouvrage de captage**
 4- profondeur du puits/ouvrage de captage (m)

****Type de puits/ouvrage de captage**

PP: puits/ouvrage de captage privé
 AM: puits/ouvrage de captage relié à un aqueduc municipal
 AP: puits/ouvrage de captage relié à un aqueduc privé
 PS: puits de surface
 PF: puits filtrante
 PT: puits tubulaire
 PO: puits d'observation
 PZ: piézomètre
 D: digue
 PSD: puits de surface et drains horizontaux
 E: excavation
 F: fossé

Figure 5.11 Diagramme de Wilcox des classes d'eau souterraine du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec d'après les résultats des campagnes de 1999 et 2000 (figure modifiée de Savard *et al.* [sous presse]).

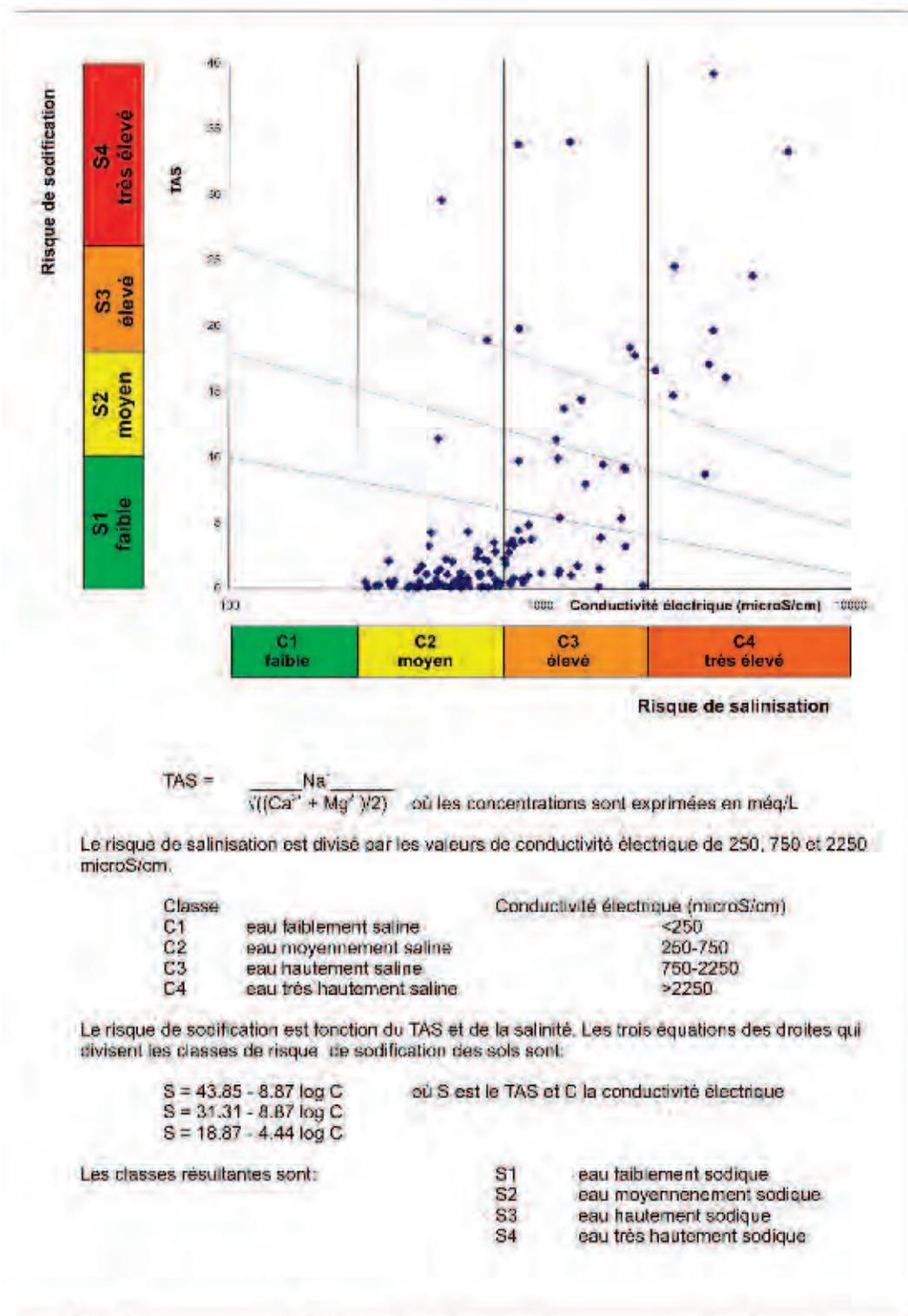


Tableau 5.1 Problèmes fréquents de la qualité de l'eau souterraine.

PARAMÈTRE ESTHÉTIQUE	CM (MG/L) ^a	OE (MG/L) ^a	PROBLÈMES DE QUALITÉ LORSQUE LE CM OU L'OE NE SONT PAS RESPECTÉS	PRINCIPALES SOURCES DE CONTAMINATION
Chlorures		≤250	Goût désagréable	Naturelle, sels déglaçants
Dureté Totale			<80 : corrosion de la tuyauterie >200 : qualité médiocre mais tolérée par les consommateurs >500 : inacceptable pour la plupart des usages domestiques : dépôts dans les chauffe-eau et la tuyauterie et utilisation plus importante de savon pour la lessive (l'effet dépend du pH et de l'alcalinité de l'eau)	Naturelle
Fer		≤0,3	Colore l'eau, tache le linge et la plomberie, favorise la croissance de bactéries dans les canalisations, entraînant des problèmes d'odeur et de goût	Naturelle
Fluorures	1,5		Fluorose dentaire	Naturelle
Manganèse		≤0,05	Colore l'eau, tache le linge et la plomberie, favorise la croissance de bactéries dans les canalisations, entraînant des problèmes d'odeur et de goût	Naturelle
MDT		≤500	Goût désagréable Problème de qualité dépend des constituants	Sels de Ca, Mg, NaCl...
NO ₃ +NO ₂	10 (en N)		Méthémoglobinémie ^b ; possiblement cancérogène bien que les éléments de preuve soient faibles	Fertilisants chimiques ou organiques
pH		6,5 ≤pH ≤8,5	pH trop bas : eau corrosive, favorise la dissolution des métaux de la tuyauterie ou des soudures pH trop élevé : entartrage	Naturelle
Sodium		≤200	Préjudiciables aux personnes souffrant d'hypertension ou d'insuffisance cardiaque; goût désagréable	Naturelle, (roc, eau de mer...)
Sulfures		≤0.05	Odeur/goût œufs pourris, caractéristiques de conditions réductrices	Naturelle

^a Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail (2001); **OE** : objectif esthétique (lié à l'acceptation de la qualité de l'eau, pour son goût et son odeur, ou à une nuisance particulière). Si une concentration donnée dans l'eau potable dépasse de beaucoup un OE, un danger pour la santé peut exister (Santé Canada, 1996); **CM** : concentration maximale (fixée afin de protéger la santé des consommateurs);

^b méthémoglobinémie : diminution du transport de l'oxygène par le sang chez les nourrissons (Santé Canada, 1996).

Tableau 5.2 Critères de qualité de l'eau pour les paramètres microbiologiques et dépassements mesurés pendant les campagnes d'échantillonnage des étés 1999 et 2000 à l'occasion du projet sur les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec (tableau modifié de Savard *et al.*, 2002).

ORGANISME	CRITÈRES DE QUALITÉ DE L'EAU (NOMBRE DE DÉPASSEMENTS DU CRITÈRE)				NOMBRE TOTAL DE RÉSULTATS D'ANALYSES
	NORME ^a	RECOMMANDATIONS POUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE AU CANADA ^b	RECOMMANDATIONS CANADIENNES POUR LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT ^c		
	EAU POTABLE CM	EAU POTABLE CMA	IRRIGATION	ABREUVAGE DES ANIMAUX D'ÉLEVAGE	
Coliformes totaux	10/100 ml (12)	10/100 ml (12)	1000/100 ml (0)	aucune	80
Coliformes fécaux ou Escherichia coli	0/100 ml (0)	0/100 ml (0)	100/100 ml (4)	aucune	80
Bactéries entérocoques	0/100 ml (n.a.)	aucune	aucune	aucune	0
Virus coliphages	0/100 ml (n.a.)	aucune	aucune	aucune	0

CM : concentration maximale; CMA : concentration maximale acceptable;

n.a. : non applicable;

^a Gouvernement du Québec (2001);

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

^c Conseil canadien des ministres de l'Environnement (1999).

Note: le dénombrement des BHAA (bactéries hétérotropes aérobies et anaérobies facultatives) recommandé par le gouvernement du Québec (2001) est plutôt utile pour évaluer l'efficacité du traitement de l'eau (désinfection) et cerner des problèmes de recroissance ou d'infiltration dans le réseau de distribution. Le but d'une étude hydro-géologique régionale n'étant pas de vérifier l'efficacité d'installations de traitement, le dénombrement des BHAA n'est pas recommandé dans le cadre de telles études.

Tableau 5.3 Critères de qualité de l'eau pour les paramètres physico-chimiques analysés en laboratoire puis calculés, et dépassements obtenus pendant les campagnes d'échantillonnage du projet sur les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec (tableau tiré de Savard *et al.*, 2002).

PARAMÈTRES (MG/L)	CRITÈRES DE QUALITÉ DE L'EAU (NOMBRE DE DÉPASSEMENTS DU CRITÈRE ^a)					NOMBRE TOTAL DE RÉSULTATS D'ANALYSES
	NORME ^b		RECOMMANDATIONS POUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE AU CANADA ^c		RECOMMANDATIONS CANADIENNES POUR LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT ^d	
	EAU POTABLE, CM	EAU POTABLE, CMA/CMAP	EAU POTABLE, OE	IRRIGATION	ABREUVAGE DES ANIMAUX D'ÉLEVAGE	
Alcalinité totale (en CaCO ₃)						142
Ammoniac						144
Antimoine	0,006 (n.a.)	CMAP 0,006 (n.a.)				0
Arsenic	0,025 (0)	CMAP 0,025 (0)		0,1 (0)	0,025 (0)	132
Baryum	1 (2)	1 (2)				146
Bore	5 (0)	CMAP 5,0 (0)		0,5-6,0 (9)	5,0 (0)	145
Bromures						144
Cadmium	0,005 (0)	0,005 (0)		0,0051 (0)	0,08 (0)	133
Calcium					1000 (0)	146
Carbone organique dissous						143
Chlorures			≤250 (21)	100-700 (36)		146
Chrome	0,05 (0)	0,05 (0)				146
Cyanures	0,2 (0)	0,2 (0)				111
Dureté totale ^e (en CaCO ₃)						146
Fer			≤0,3 (47)	5,0 (2)		143
Fluorures	1,5 (10)	1,5 (10)		1,0 (9)	1,0-2,0 (6)	142
Magnésium						146
Manganèse			≤0,05 (48)	0,2 (18)		146
Mercure	0,001 (0)	0,001 (0)			0,003 (0)	127
Nitrates + nitrites (en N)	10 (1)	10,0 (1)			22 (0)	144
Phosphore total						142
Plomb	0,01 (0)	0,01 (0)		0,2 (0)	0,1 (0)	132
Potassium						146
Sélénium	0,01 (0)	0,01 (0)		0,02-0,05 (0)	0,05 (0)	122

Tableau 5.3 Critères de qualité de l'eau pour les paramètres physico-chimiques analysés en laboratoire puis calculés, et dépassements obtenus pendant les campagnes d'échantillonnage du projet sur les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec (tableau tiré de Savard *et al.*, 2002). (Suite)

PARAMÈTRES (MG/L)	CRITÈRES DE QUALITÉ DE L'EAU (NOMBRE DE DÉPASSEMENTS DU CRITÈRE ^a)					NOMBRE TOTAL DE RÉSULTATS D'ANALYSES
	NORME ^b	RECOMMANDATIONS POUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE AU CANADA ^c		RECOMMANDATIONS CANADIENNES POUR LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT ^d		
	EAU POTABLE, CM	EAU POTABLE, CMA/CMAP	EAU POTABLE, OE	IRRIGATION	ABREUVAGE DES ANIMAUX D'ÉLEVAGE	
Silice						146
Sodium			≤200 (25)			146
Strontium						145
Sulfates			≤500 (2)		1000 (1)	144
Sulfures			≤0,05 (28)			142
Turbidité (UTN)	0,5 (eau filtrée) (n.a.)	1 (n.a.)	≤5 (n.a.)			0
Uranium	0,02 (0)	0,1 (0)		0,01 (4)	0,2 (0)	115
Paramètres à calculer						
Bicarbonates, HCO ₃ (à l'aide de l'alcalinité totale) ^f						146
MDT (matières dissoutes totales) ^g			≤500 (43)	500-3500 (43)	3000 (2)	146
TAS (Taux d'adsorption du sodium) ^h						146

CM: concentration maximale; CMA: concentration maximale acceptable; CMAP: concentration maximale acceptable provisoire; OE: objectif esthétique;

n.a.: non applicable;

UTN: unité de turbidité néphélométrique;

^a Lorsque le critère est un intervalle, le nombre de dépassements est calculé à partir de la limite inférieure de l'intervalle et constitue donc un nombre de dépassements maximal;

^b Gouvernement du Québec (2001);

^c Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail (2001);

^d Conseil canadien des ministres de l'Environnement (1999);

^e Les concentrations en Ca et en Mg permettent de calculer la dureté totale; on considère qu'une eau dont le degré de dureté est supérieur à 200 mg/l est de qualité médiocre mais tolérée par les consommateurs, et que lorsqu'elle est supérieure à 500 mg/l, elle est inacceptable pour la plupart des usages domestiques (Santé Canada, 1996);

^f La concentration en HCO₃ = 1,219* d'alcalinité totale en CaCO₃ composée par des HCO₃;

^g La concentration en MDT est calculée au moyen de la somme des concentrations des ions et du SiO₂ (Hounslow, 1995) et n'est qu'une approximation des MDT mesurées en laboratoire (résidus d'évaporation à une température donnée), l'objectif de 500 doit donc n'être considéré qu'à titre indicatif;

^h Le TAS est calculé à l'aide des concentrations en Na, en Ca et en Mg (voir la section 5.9.1).

Tableau 5.4 Critères de qualité de l'eau pour les paramètres physico-chimiques mesurés sur place et dépassements obtenus pendant les campagnes d'échantillonnage des étés 1999 et 2000 à l'occasion du projet sur les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec (tableau tiré de Savard *et al.*, 2002).

PARAMÈTRES MESURÉS AU SITE D'ÉCHANTILLONNAGE	CRITÈRES DE QUALITÉ DE L'EAU (NOMBRE DE DÉPASSEMENTS DU CRITÈRE ^a)					NOMBRE TOTAL DE RÉSULTATS D'ANALYSES
	NORME ^a	RECOMMANDATIONS POUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE AU CANADA ^b		RECOMMANDATIONS CANADIENNES POUR LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT ^c		
	EAU POTABLE, CM	EAU POTABLE, CMA/CMAP	EAU POTABLE, OE	IRRIGATION	ABREUVAGE DES ANIMAUX D'ÉLEVAGE	
Silice						146
Température (°C)			≤ 15°C			129
pH (unités)	Entre 6,5-8,5 unités (11)		6,5 ≤ pH ≤ 8,5 (11)			146
Conductivité électrique (mS/cm)						
Conductivité électrique spécifique à 25°C (mS/cm)						146
Potentiel d'oxydoréduction Eh (mV)						123
Oxygène dissous (mg/l)						129
Oxygène dissous (%)						129
Odeur (évaluation subjective)						0

CM: concentration maximale; CMA: concentration maximale acceptable; CMAP: concentration maximale acceptable provisoire; OE: objectif esthétique;

MV: millivolt;

mS/cm: milliSiemens/cm;

^a Gouvernement du Québec (2001);

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

^c Conseil canadien des ministres de l'Environnement (1999).

Tableau 5.5 Principaux intérêts de l'analyse de la mesure ou du calcul de paramètres physico-chimiques.

PARAMÈTRE (UNITÉ EN MG/L LORSQUE NON SPÉCIFIÉE)	COMPARAISON À DES NORMES ^a	COMPARAISON AUX CRITÈRES ESTHÉTIQUES ^a	IDENTIFICATION DU TYPE D'EAU	UTILITÉ POUR LE CALCUL DE PARAMÈTRES	TRAITEMENT DE L'EAU SOUVENT NÉCESSAIRE	INDICE DE CONTAMINATION POTENTIELLE D'ORIGINE AGRICOLE (FERTILISANTS) SANITAIRE (FOSSE SEPTIQUE)	INDICE DE CONTAMINATION POTENTIELLE PAR DES SELS DÉGLAÇANTS	POTENTIEL DE SALINISATION DES SOLS PAR L'IRRIGATION	INDICE DE LA POSSIBILITÉ DE MÉLANGE AVEC DE L'EAU ANCIENNE D'ORIGINE MARINE	INTÉRÊT GÉOCHIMIQUE (INTERACTION EAU-ROCHE)	INDICE DES CONDITIONS DE NAPPE LIBRE OU CONFINÉE
Alcalinité totale			x	HCO ₃							
Ammoniac						x					
Antimoine	x										
Arsenic	x										
Baryum	x										
Bore	x										
Bromures									x		
Cadmium	x										
Calcium			x	Dureté tot., EN, TAS, MDT	x					x	
Chlorures		x	x	EN, MDT	x		x	x	x	x	
Chrome	x										
Conduct. élect.							x	x	x	x	
Cyanures	x										
Dureté totale					x						
Fer		x			x						
Fluorures	x										
HCO ₃ ^b			x	MDT, EN						x	
Magnésium			x	Dureté, EN, TAS, MDT						x	
Manganèse		x			x						
MDT		x									
Mercure	x										
Nitrates + nitrites (en N)	x					x					
Oxygène dissous											x
pH		x									
Phosphore total						x					

Tableau 5.5 Principaux intérêts de l'analyse de la mesure ou du calcul de paramètres physico-chimiques. (Suite)

PARAMÈTRE (UNITÉ EN MG/L LORSQUE NON SPÉCIFIÉE)	COMPARAISON À DES NORMES ^a	COMPARAISON AUX CRITÈRES ESTHÉTIQUES ^a	IDENTIFICATION DU TYPE D'EAU	UTILITÉ POUR LE CALCUL DE PARAMÈTRES	TRAITEMENT DE L'EAU SOUVENT NÉCESSAIRE	INDICE DE CONTAMINATION POTENTIELLE D'ORIGINE AGRICOLE (FERTILISANTS) SANITAIRE (FOSSE SEPTIQUE)	INDICE DE CONTAMINATION POTENTIELLE PAR DES SELS DÉGLAÇANTS	POTENTIEL DE SALINISATION DES SOLS PAR L'IRRIGATION	INDICE DE LA POSSIBILITÉ DE MÉLANGE AVEC DE L'EAU ANCIENNE D'ORIGINE MARINE	INTÉRÊT GÉOCHIMIQUE (INTERACTION EAU-ROCHE)	INDICE DES CONDITIONS DE NAPPE LIBRE OU CONFINÉE
Plomb	x										
Potassium			x	EN, MDT						x	
Potentiel redox											x
Sélénium	x										
Silice				MDT						x	
Sodium		x	x	EN, TAS, MDT	x		x	x	x	x	
Strontium										x	
Sulfates		x	x	EN, MDT						x	
Sulfures		x			x						
TAS								x			
Température		x									
Turbidité (UTN)	x				x						
Uranium	x										

UTN: unité de turbidité néphélométrique; TAS (calculé): taux d'adsorption du sodium;

MDT (mesurées ou calculées): matières dissoutes totales; EN: électroneutralité (calculée)

^a Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail (2001);

^b La concentration en $\text{HCO}_3^- = 1,219^*$ d'alcalinité totale en CaCO_3 composée par des HCO_3^- .

Tableau 5.6 Sommaire sur l'application de la géochimie des isotopes stables et légers en hydrogéologie.

TRACEURS (NOTATION)	MATRICE	SUJETS D'ÉTUDE
$^2\text{H}/^1\text{H}$ ($\delta^2\text{H}$ ou δD) <i>généralement combiné à $\delta^{18}\text{O}$</i>	H_2O	Caractérisation des précipitations locales Nature et source de l'eau souterraine Identification des zones de recharge Processus de salinisation Échanges entre eau de surface et eau souterraine
($\delta^2\text{H}$ ou δD)	Solvants chlorés	Sources des polluants
$^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$	$\text{B}(\text{OH})_4$ $\text{B}(\text{OH})_3$	Sources des polluants (fuites provenant de sites d'enfouissement) Salinité de l'eau souterraine
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$)	CID	Source du carbone inorganique dissous Interaction eau-roche Dynamique des eaux souterraines
	Solvants chlorés	Sources des polluants
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ($\delta^{15}\text{N}$) idéalement combiné à $\delta^{18}\text{O}$	NO_3^-	Source des nitrates Processus de dénitrification
$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$) <i>généralement combiné à $\delta^2\text{H}$ ou $\delta^{15}\text{N}$</i>	H_2O	Caractérisation des précipitations locales Nature et source des eaux souterraines Zones de recharge Processus de salinisation Échanges entre eau de surface et eau souterraine
	NO_3^-	Source des polluants nitrates Processus de dénitrification
$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ ($\delta^{34}\text{S}$)	Sulfures, SO_4^- , H_2S et matières organiques	Source du soufre – acidification Interaction eau-roche
$\delta^{37}\text{Cl}$ ($^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$)	Cl- des eaux Solvants chlorés	Source de la salinité des eaux souterraines Source des contaminants (solvants)

Informations compilées d'après Mook, 2001; Causse et Gasse, 1998; Clark et Fritz, 1997; Kendall et McDonnell, 1998; Krouse et Grinenko, 1991; Sherwood Lollar *et al.*, 2001.

Tableau 5.7 Isotopes utiles à la datation et à l'étude de la dynamique des eaux souterraines.

TRACEURS	DEMI-VIE (ANNÉES)	MATRICE
^3H	12,4	H_2O
^7Be	0,15	H_2O
^{14}C	5 730	HCO_3^- , CO_2 , COD, CaCO_3 , CH_2O
^{35}S	0,24	SO_4^{2-}
^{36}Cl	301 000	Cl, sels ou hydrocarbures chlorés
^{39}Ar	269	Ar
^{81}Kr	210 000	Kr
^{85}Kr	10,6	Kr
^{129}I	$1,6 \times 10^7$	I ⁻ et I des matières organiques
^{222}Rn	3,8 j	Radon (gaz)
^{226}Ra	16 010	Ra^{2+} , carbonates, argiles
^{230}Th	75 200	Carbonates, matières organiques
^{234}U	248 000	UO_2^{2+} , carbonates, matières organiques
^{238}U	$4,51 \times 10^9$	UO_2^{2+} , carbonates, matières organiques

Informations compilées d'après Attendorf et Bowen, 1997; Causse et Gasse, 1998; Clark et Fritz, 1997; Mook, 2001; Kraemer et Genereux, 1998; Shanley *et al.*, 1998.

Les méthodes de datation basées sur les propriétés du tritium (^3H) et du ^{14}C sont les plus fréquemment utilisées en hydrogéologie.

Tableau 5.8 Types d'ouvrages de captage pouvant être utilisés pour une étude de caractérisation hydrogéochimique.

TYPE D'OUVRAGE	AVANTAGES	DÉSAVANTAGES
Ouvrages de captage liés à des réseaux municipaux ou privés	Déjà existants (diminution des coûts).	Peuvent parfois être alimentés par différentes formations géologiques ou unités hydrostratigraphiques (mélange d'eaux) en raison du pompage d'eau important ou de l'aménagement du puits; L'information sur l'aménagement du puits peut être manquante.
Puits d'observation ou de surveillance existants ou aménagés dans le cadre de l'étude	Sont habituellement construits afin de capter l'eau d'une formation particulière; Les détails de construction et d'aménagement des puits sont connus, ce qui facilite l'analyse et l'interprétation des résultats; Permettent d'évaluer la qualité de l'eau de l'aquifère.	Coûteux s'il est nécessaire de les construire; Doivent être développés et purgés adéquatement avant l'échantillonnage.
Puits de surface, pointe filtrante	Approprié pour l'étude d'un aquifère de surface ou pour étudier la recharge d'un aquifère rocheux.	
Puits tubulaire		Souvent ouvert sur une grande profondeur, ce qui rend difficile l'identification de la provenance de l'eau échantillonnée.
Source	Facile à échantillonner, pas nécessaire de purger ou de pomper; Permet de caractériser l'eau de zones de résurgence.	Ouvert à l'atmosphère, pas étanche.
Bassin de captage	Facile à échantillonner.	Eau peut y être stagnante; Ouvert à l'atmosphère.
Réservoir	Facile à échantillonner.	Qualité de l'eau peut être modifiée pour certains paramètres lors de sa résidence dans le réservoir; Ouvert à l'atmosphère.

Tableau 5.9 Statistiques physico-chimiques de différents types d'unités hydrogéologiques.

PARAMÈTRES (UNITÉ = mg/l LORSQUE NON SPÉCIFIÉE)	SÉDIMENTS DE SURFACE (7 SITES)						SÉDIMENTS SOUS L'ARGILE (13 SITES)						FORMATIONS ROCHEUSES ET MIXTES (124 SITES)					
	NOMBRE DE RÉSULTATS	MOYENNE	MÉDIANE	MINIMUM	MAXIMUM	ÉCART TYPE	NOMBRE DE RÉSULTATS	MOYENNE	MÉDIANE	MINIMUM	MAXIMUM	ÉCART TYPE	NOMBRE DE RÉSULTATS	MOYENNE	MÉDIANE	MINIMUM	MAXIMUM	ÉCART TYPE
Conductivité spécifique (mS/cm)	7	0,573	0,65	0,279	0,803	0,197	13	0,811	0,678	0,34	1,952	0,457	124	1,144	0,68	0,265	18,53	1,837
Couleur (UCV: unité de couleur vraie)	4	7	7	6	10	2	10	6	1	1	43	13	88	7	2	0	94	14
Potentiel d'oxydoréduction, Eh (mV)	5	+ 47	+ 46	- 30	+ 94	48	11	- 46	- 50	+ 159	82	105	- 15	+ 12	- 223	+ 196	104	104
Oxygène dissous	5	2,95	1,96	0,26	8,95	3,45	12	2,83	1,97	0,85	8,46	2,18	110	2,94	2,1	0,12	11,48	2,59
pH (sans unité)	7	7,48	7,50	7,14	8	0,28	13	8	8,01	6,3	9,26	0,76	124	7,6	7,59	6,4	8,85	0,46
Température (°C)	5	11,1	10,5	8,2	16,3	3,1	12	9,1	8,8	8,1	10,5	0,8	110	9,5	9,1	7,6	16,9	1,6
Alcalinité totale (mg/l CaCO ₃)	7	271	310	96	430	117	13	260	250	140	500	97	120	267	260	33	810	99
Ag	4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0	12	0,0003	0,0003	0,0002	0,0003	0	114	0,0003	0,0003	0,0001	0,0023	0,0002
Al	7	0,011	0,007	0,007	0,02	0,006	13	0,012	0,01	0,007	0,03	0,009	122	0,024	0,008	0,007	0,7	0,068
As	4	0,001	0,001	0,001	0,001	0	12	0,001	0,001	0,001	0,002	0,0004	114	0,001	0,001	0,001	0,005	0,0004
B	7	0,006	0,002	0,002	0,02	0,007	13	0,15	0,1	0,02	0,57	0,17	123	0,159	0,07	0,002	1,40	0,22
Ba	7	0,07	0,06	0,01	0,22	0,07	13	0,15	0,14	0,008	0,32	0,08	124	0,198	0,14	0,001	1,1	0,2
Br	6	0,014	0,01	0,008	0,026	0,007	13	0,41	0,15	0,01	1,5	0,5	123	0,864	0,04	0,002	23	2,89
Ca	7	69,1	81	31	95	24,9	13	31,7	32	1,2	61	19,8	124	59,4	44,5	0,2	790	83,8
Cd	4	0,0012	0,0013	0,0006	0,0018	0,0005	13	0,0008	0,0006	0,0003	0,0014	0,0004	114	0,0012	0,0012	0,0003	0,005	0,001
Cl	7	12,6	6,1	0,6	49	16,9	13	110	35	2,5	430	137	124	192	37	0,1	6500	639
CN	2	0,003	0,003	0,003	0,003	0	11	0,004	0,003	0,003	0,008	0,001	97	0,004	0,003	0,003	0,03	0,003
Cr	7	0,0017	0,002	0,0009	0,003	0,0008	13	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	124	0,002	0,001	0,001	0,03	0,003
Cu	7	0,001	0,001	0,001	0,002	0,0004	13	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	124	0,002	0,001	0,001	0,03	0,005
Carbone inorganique dissous	7	68	76	23	110	30	12	63	58	33	110	22	110	65	62	0	180	24
Carbone organique dissous	7	1,6	1,5	0,3	4	1,2	13	1,6	0,8	0,2	7,4	2,1	121	2,6	1,3	0,2	16,2	3
Dureté totale (mg/l CaCO ₃)	7	296	344	122	423	109	13	162	172	9	280	84	124	270	221	0,7	3575	343
F	7	0,15	0,12	0,04	0,34	0,1	12	0,38	0,34	0,13	0,83	0,19	121	0,59	0,35	0,05	3,2	0,63
Fe	7	0,5197	0,34	0,0007	1,4	0,52	12	0,14	0,097	0,002	0,57	0,16	122	0,527	0,13	0,001	15	1,57
HCO ₃ (calculé)	7	330	378	117	524	143	13	317	305	171	610	119	124	322	305	40	987	121

Tableau 5.9 Statistiques physico-chimiques de différents types d'unités hydrogéologiques. (Suite)

PARAMÈTRES (UNITÉ = mg/l LORSQUE NON SPÉCIFIÉE)	SÉDIMENTS DE SURFACE (7 SITES)						SÉDIMENTS SOUS L'ARGILE (13 SITES)						FORMATIONS ROCHEUSES ET MIXTES (124 SITES)					
	NOMBRE DE RÉSULTATS	MOYENNE	MÉDIANE	MINIMUM	MAXIMUM	ÉCART TYPE	NOMBRE DE RÉSULTATS	MOYENNE	MÉDIANE	MINIMUM	MAXIMUM	ÉCART TYPE	NOMBRE DE RÉSULTATS	MOYENNE	MÉDIANE	MINIMUM	MAXIMUM	ÉCART TYPE
Hg	2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0	12	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0	111	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003	0,0003
I	4	0,1	0,1	0,1	0,10	0	12	0,1	0,1	0,1	0,3	0,06	114	0,1	0,1	0,1	0,6	0,06
K	7	4,02	3,7	0,76	13	4,2	13	6,7	5,7	2,7	16,5	4,4	124	8,1	6	0,13	34	6,7
Li	5	0,004	0,004	0,001	0,009	0,003	11	0,01	0,01	0,001	0,02	0,006	112	0,017	0,01	0,001	0,4	0,04
MDT (calculées)	7	361	392	218	455	93	13	407	326	191	944	223	124	647	369	138	11356	1108
Mg	7	30,1	26	10,9	47	12,8	13	20,2	23	1,4	31	9,7	124	29,6	26	0,4	390	35,5
Mn	7	0,1485	0,13	0,0003	0,44	0,1678	13	0,16	0,05	0,0003	0,93	0,28	124	0,0703	0,017	0,0003	0,64	0,126
N total	7	0,7	0,2	0,1	3,7	1,3	13	0,39	0,31	0,10	1,25	0,32	120	0,79	0,35	0,03	11,7	1,58
Na	7	10	7	3	26	8	13	119	73	12,6	400	120	124	147	48	1,6	3100	334
NH ₄	7	0,04	0,02	0,02	0,11	0,03	13	0,3	0,22	0,02	1,25	0,34	122	0,35	0,1	0,02	7	0,74
Ni	7	0,0029	0,002	0,0008	0,007	0,0023	13	0,001	0,001	0,001	0,006	0,001	122	0,002	0,001	0,001	0,02	0,003
NO ₃ (en N)	7	0,57	0,02	0,02	3,7	1,38	13	0,07	0,02	0,02	0,6	0,16	122	0,37	0,02	0,02	11,7	1,45
P total dissous	7	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	12	0,08	0,03	0,01	0,33	0,1	120	0,16	0,02	0,01	2,2	0,38
Pb	4	0,004	0,004	0,004	0,004	0	12	0,004	0,004	0,004	0,004	0	114	0,004	0,004	0,004	0,04	0,003
PO ₄	7	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01	13	0,11	0,04	0,01	0,4	0,13	122	0,18	0,02	0,01	2,1	0,43
HS	7	0,03	0,02	0,02	0,05	0,01	12	0,05	0,03	0,02	0,2	0,05	121	0,16	0,02	0,02	4,7	0,62
Se	4	0,001	0,001	0,001	0,001	0	11	0,001	0,001	0,001	0,001	0	105	0,001	0,001	0,001	0,001	0
SiO ₂	7	13,2	11,9	9,3	20	3,6	13	13	11,5	9,3	18,1	3	124	12,9	12,2	5,5	24	3,7
SO ₄	7	41	49	15	75	21	13	17,5	16	0,5	43	11,8	122	61,8	33,5	0,5	1200	128,4
Sr	7	0,18	0,14	0,06	0,42	0,12	12	0,52	0,33	0,09	1,7	0,49	124	1,948	0,5	0,005	29	4,46
TAS (calculé)	7	0,25	0,21	0,09	0,6	0,18	13	6,79	2,08	0,33	33,82	9,86	124	5,36	1,29	0,05	80,1	10,32
U	2	0,005	0,005	0,005	0,005	0	11	0,006	0,005	0,005	0,01	0,001	100	0,006	0,005	0,005	0,01	0,002
Zn	7	0,015	0,005	0,005	0,078	0,028	13	0,022	0,005	0,005	0,096	0,03	124	0,034	0,005	0,005	1,2	0,117

Tableau 5.10 Exemple de détermination d'un type d'eau.

IONS MAJEURS	CONCENTRATION (mg/l)	FACTEUR DE CONVERSION DE mg/l À MÉQ/L	CONCENTRATION (MÉQ/L)	CONCENTRATION (MÉQ, %)	TYPE D'EAU CRITÈRE : CONCENTRATION MÉQ (%) > 20
Anions					Ca-Mg-HCO ₃ bicarbonaté calcique-magnésien
Cl ⁻	1,9	0,02820	0,054	0,55	
HCO ₃ ⁻	280,4	0,01639	4,596	46,43	
SO ₄ ²⁻	9,5	0,02082	0,198	2,0	
Cations					
Ca ²⁺	57,0	0,0499	2,844	28,73	
Mg ²⁺	25,0	0,08224	2,056	20,78	
Na ⁺	1,7	0,04350	0,074	0,75	
K ⁺	0,6	0,02558	0,015	0,15	

Tableau 5.11 Représentation des types d'eau à l'aide de symboles et de couleurs.

TYPE D'EAU	ION PRÉDOMINANT		SYMBOLE	COULEUR REPRÉSENTATIVE*
	ANION	CATION		
Eaux bicarbonatées	HCO ₃ ⁻ ou (HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻)			bleu
calciques		Ca ²⁺	triangle	bleu clair
magnésiennes		Mg ²⁺	carré	bleu violet
sodiques		Na ⁺ ou	cercle	bleu foncé
		(Na ⁺ +K ⁺)	cercle	bleu de Prusse
Eaux sulfatées	SO ₄ ²⁻			jaune et brun
calciques		Ca ²⁺	triangle	jaune
magnésiennes		Mg ²⁺	carré	brun clair
sodiques		Na ⁺ ou	cercle	brun foncé
		(Na ⁺ +K ⁺)	cercle	brun foncé
Eaux chlorurées	Cl ⁻			vert
calciques		Ca ²⁺	triangle	vert clair
sodiques		Na ⁺ ou	cercle	vert foncé
		(Na ⁺ +K ⁺)	cercle	vert foncé

*Unesco (1975)

Les couleurs proposées peuvent aussi être utilisées pour les diagrammes radiaux et de Stiff (section 5.8.4). Dans le cas où on désirerait présenter des types mixtes, d'autres couleurs devraient être utilisées. On recommande des tons qui s'harmonisent avec ceux qui sont présentés dans le tableau ci dessus.

6. PROCÉDURE DE SAISIE DES DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES

Kathleen Lauzière, Daniel Paradis, Édith Bourque, Michel Ouellet, Éric Boisvert, Martin Ross

6.1 Introduction

La première étape dans le développement d'une base de données hydrogéologiques en milieu fracturé est de discuter avec les intervenants locaux afin de bien cerner la problématique liée à ce genre d'étude. Il faut déterminer quelles données doivent être compilées et quels traitements elles auront à subir. À la différence de projets d'hydrogéologie régionale sur les aquifères granulaires, les projets traitant des aquifères en roches sédimentaires fracturées doivent intégrer à la structure de base de données la géologie des roches sédimentaires et les caractéristiques qui s'y rattachent. De plus, puisque les systèmes aquifères rocheux sont en profondeur et que plusieurs types d'eau peuvent être rencontrés, les notions relatives à l'échantillonnage sur plusieurs niveaux verticaux doivent également s'ajouter à la base de données. Le modèle conceptuel de données présenté à l'annexe C découle de nombreuses discussions touchant à ces facettes. Le modèle conceptuel constitue le fondement de la mise en forme des tables et des formulaires de saisie dans Access, qui sont ensuite transférés dans une base de données GIMS qui permet la visualisation et la manipulation des données.

Le modèle conceptuel de données comprend tous les types de données recueillies lors de l'exécution d'un projet. Dans le cas présent, l'exemple utilisé représente le système aquifère du sud-ouest du Québec (Savard *et al.*, sous presse). Pour des compilations ultérieures, on peut envisager de recueillir d'autres types de données; le modèle de données est flexible et permet des ajouts. Il est aussi possible que certains types d'information ne fassent pas l'objet de compilation : en effet, certaines données sont essentielles, certaines sont souhaitables, tandis que d'autres ne sont intéressantes que dans le contexte du projet en cours de compilation et ne seront pas utiles dans la base de données GIMS.

Après avoir déterminé quelles seront les données à collecter, le plus grand défi consiste à produire une base de données standardisées. Pour atteindre cet objectif, une série de fiches hydrogéologiques de terrain accompagnées de dictionnaires de données ont été préparées. Ces fiches permettent de cerner les informations à recueillir à une station, et de les saisir dans un format standard, facile à intégrer à la base de données. Après avoir saisi les données de terrain, celles-ci doivent être compilées dans une base de données. Pour ce faire, il est essentiel de recourir à l'expertise d'un gestionnaire de base de données afin d'assurer l'intégrité des données, de faciliter leur manipulation, de les intégrer dans les SIG et d'obtenir des conseils et de l'information technique.

Ce chapitre présente deux outils pour effectuer la saisie dans une base de données à l'aide de formulaires créés au moyen d'Access et de formulaires Internet créés par ColdFusion Studio. Après la vérification et la validation des données, la dernière étape consiste à transférer les données pertinentes dans la base de données configurée pour GIMS, un outil de visualisation des données ponctuelles et de forages.

L'accent de ce chapitre sera mis sur les fiches de terrain qui illustrent bien les données qu'on peut recueillir. Des dictionnaires accompagnent les fiches, ce qui permet de standardiser les données à la source et d'assurer leur cohérence.

6.2 Stratégie d'acquisition des données

Lors d'un projet hydrogéologique, les données sont tirées de différentes sources. Une grande partie des données proviennent de bases de données déjà existantes, par exemple de la banque de données des puisatiers, d'autres sont compilées à l'aide de rapports et de nouvelles sont collectées sur le terrain. La première partie de cette section traite de l'acquisition de nouvelles données sur le terrain grâce à la fiche de terrain; la seconde présente l'intégration de données numériques par les outils d'acquisition numériques et par l'ajout de fichiers numériques.

6.2.1 Acquisition des données sur le terrain

Les quatre fiches de terrain qui ont été créées pour la saisie de données hydrogéologiques sont présentées à l'annexe C. Chaque fiche est subdivisée en blocs qui sont identifiés par un chiffre en arrière plan et qui correspondent à un thème de la base de données. Pour faciliter la saisie, les champs obligatoires sont indiqués par une trame grise et les champs accompagnés d'un dictionnaire ont un motif à point.

La fiche 1 inclut les informations générales dont la localisation, la description générale du site visité, sa description physique (infrastructure), des informations sur les captages et leur propriétaire s'il y a lieu, et une section sur les activités polluantes environnantes. La fiche 2 renferme quant à elle la description géologique de la station (contacts et lithologie). Pour ce qui est de la fiche 3, elle décrit les échantillons de divers matériaux, les photos de terrain, les niveaux d'échantillonnage d'eau et la perception de la qualité de l'eau. Enfin, la fiche 4 comprend tous les renseignements sur l'échantillonnage d'eau.

Le bloc 1 de la première fiche comprend les informations sur la station (figure 6.1). Par définition, une station est un site visité par une personne x à un temps t . Ceci implique donc qu'un site peut être visité à plusieurs reprises et qu'il portera le même numéro de station. Le numéro d'une station doit être unique étant donné qu'il représente la clé primaire de la table des stations (tblstat). Par convention, dans le projet décrivant le système aquifère du Sud-Ouest québécois, le numéro de la station commence par les deux derniers chiffres de l'année, suivi de deux à quatre lettres représentant soit les initiales de la personne ayant visité la station, soit celles du projet ou de l'endroit visité. Lorsqu'une seule équipe de travail exécute la saisie de données, il y a peu de chance que les numéros de stations soient répétés. Si toutefois les données proviennent de plusieurs sources, il faut s'assurer que le numéro de station est unique en déterminant à l'avance une série de numéros à utiliser par source ou en s'assurant que les initiales utilisées sont uniques à une source.

Les champs obligatoires à remplir sont le numéro de la station (# STATION), l'identification de la personne qui remplit la fiche (GEOL), le PROJET et la DATE. Les informations concernant la température sont facultatives, mais elles permettent de comprendre les conditions de la visite. Le champ INTÉRÊT correspond à l'objectif de la visite : par exemple, si la personne veut mesurer les niveaux d'eau et prendre des échantillons, le champ INTÉRÊT sera rempli par KB (voir le lexique à l'annexe A). Ce champ indique donc quelles sections de la fiche seront remplies.

Le bloc 2 est sans doute le plus important de tous les blocs des fiches (Figure 6.1). Il correspond au thème de la localisation de la station : sans localisation, aucune donnée collectée n'est utilisable. Les champs obligatoires de cette partie de la fiche sont les coordonnées X et Y, l'ALTITUDE, la projection utilisée (UTM, MTM, etc.), le datum (NAD27, NAD83, etc.), la ZONE et la façon dont la station a été localisée (carte 1 : 50 8000, carte 1 : 20 000, GPS, etc.). Il est très important de noter la projection et le datum ; avec un GPS, on doit sélectionner ces informations sur l'appareil pour obtenir les coordonnées X et Y, mais si la localisation se fait sur une carte, ces informations figurent au pourtour de la carte. Entre le NAD 27 et le NAD 83, il peut y avoir jusqu'à 200 m de différence dans l'axe des Y, et entre la projection MTM et UTM les coordonnées X ne sont pas du tout les mêmes. Il est recommandé de toujours saisir les données de localisation dans la même projection et le même datum.

Il est aussi très utile de savoir comment une station a été localisée pour anticiper l'erreur sur les mesures. Le champ ALTITUDE représente l'altitude du sol et il doit aussi être compilé. Sur le terrain, l'altitude peut être déterminée à l'aide d'une carte à l'échelle 1 : 20 000, au 1 : 50 000 en positionnant la station et en estimant l'altitude, ou elle peut être mesurée (nivellement). Si une mesure est déterminée sur le terrain, l'unité de mesure doit être indiquée (mètre ou pied). Si aucune information sur l'altitude n'est disponible, il est possible de faire l'intersection entre une couverture de points correspondant aux stations et le modèle numérique de terrain, afin d'extraire la valeur d'altitude de chaque point.



Quand une station est visitée pour la première fois, et qu'on ne sait pas si le site a déjà fait l'objet d'une description, le numéro de la station devient l'identifiant de la localisation. Si un site a déjà fait l'objet d'une description, son identifiant doit figurer au champ # LOCALISATION de référence. De cette façon, toutes les informations rattachées à un site peuvent être extraites par requête. Si pour une raison ou une autre une station est mieux identifiée par un autre nom, par exemple *puits municipal de Sainte-Thérèse*, ce nom peut figurer dans le champ ALIAS.

Le bloc 3 comprend l'information concernant le PROPRIÉTAIRE du puits/captage ou, si elle n'est pas disponible, l'ADRESSE du puits/captage. Si le propriétaire réside à l'endroit où se trouve le puits, la case adresse du puits doit être cochée. Si le propriétaire n'est pas joint, l'ADRESSE du puits peut figurer dans ce bloc et la case adresse du puits est cochée à ce moment. Les informations de ce bloc sont très utiles en cours de projet, entre autres pour fixer un rendez-vous afin de recueillir des informations complémentaires sur le captage. Elles seront saisies dans la base de données de terrain, mais elles ne seront pas transférées à la base de données GIMS, sauf pour l'adresse civique du puits (voir figure 6.2)

Dans le bloc 4, les données qui ont trait à l'UTILISATION de l'eau et à la CAPACITÉ du puits (figure 6.3) sont inscrites. La collecte de ces données n'est pas obligatoire, et les informations ne sont pas toujours disponibles, mais leur acquisition est souhaitable puisqu'elle permet de faire le choix des points de mesure de niveau d'eau (voir le chapitre 3) et d'évaluer les conditions des niveaux d'eau mesurés et saisis dans la section 11. Il est recommandé d'utiliser des unités de mesure uniformes. Les facteurs de conversion sont joints au carnet de fiches de terrain (voir l'annexe C).

Le bloc 5 comprend les données sur l'INFRASTRUCTURE DU CAPTAGE OU DU FORAGE (figure 6.4). Ces données sont recueillies lorsque le puits est foré ou visité. L'ensemble des levés de ce bloc correspond à des mesures linéaires; il est possible de les relever en mètres ou en pieds sur la fiche, mais au moment de la saisie dans la base de données, les mesures devront être converties en mètres pour la plupart des champs et en centimètres pour le diamètre.

Dans le bloc 6, on peut indiquer les informations générales concernant l'historique du puits: par exemple, qui l'a foré et s'il existe des rapports ou des données d'essais de pompage pour ce puits. Comme pour les informations du bloc 3, ces informations ne sont là qu'à titre informatif pendant la période du projet et elles ne feront pas partie de la base de données GIMS.

Le bloc 7 de la deuxième fiche permet de faire un schéma et de prendre des notes supplémentaires aux descriptions déjà saisies. Cet espace peut être utilisé pour faire un SCHÉMA DE LA LOCALISATION DU PUIITS en rapport avec la DESCRIPTION DU MILIEU (activités potentiellement polluantes) ou pour faire un SCHÉMA de l'infrastructure DU PUIITS ET DE LA STRATIGRAPHIE (figure 6.5). Un dessin vaut mille mots et constitue un aide-mémoire qui peut servir de référence lorsque des champs n'ont pas été remplis.

Le bloc 8 comprend les informations sur les ACTIVITÉS POTENTIELLEMENT POLLUANTES. Les données recueillies dans cette section mettent en contexte les résultats d'analyse d'échantillons d'eau et orientent la sélection des analyses à effectuer. Ces observations sont représentatives du moment de la visite et peuvent être variables au cours des années. Un exemple de cette section remplie est présenté à la figure 6.6.

Le bloc 9 permet quant à lui de faire une description sommaire de la stratigraphie telle qu'elle est décrite par le propriétaire du puits.

Le bloc 10 (figure 6.7) de la troisième fiche permet de faire une évaluation qualitative de la QUALITÉ DE L'EAU et d'établir si l'approvisionnement en eau est déficient. L'objectif de la saisie de ces données est le même que pour les données du bloc 8, c'est-à-dire donner un contexte aux résultats d'analyse d'échantillons d'eau.



Le bloc 11 (figure 6.8) a trait aux mesures de NIVEAUX D'EAU. La première valeur est la profondeur d'eau dans le puits (PROF EAU). Cette profondeur doit être mesurée en mètres et, par convention, elle doit être faite relativement au tubage le plus bas ou à la section la plus basse du tubage si celui-ci est coupé en biais. Les trois points de référence possibles sont représentés dans le schéma du bloc 11. La HAUTEUR de la MARGELLE doit être indiquée dans la case appropriée; s'il y a deux margelles, le DELTA MARGELLES (tubage/pvc) doit aussi être noté, toujours selon la convention du point le plus bas. Lors d'une visite, il est possible de mesurer plus d'un niveau d'eau : par exemple, une mesure effectuée sans pompage peut être suivie d'une mesure avec pompage. Lorsqu'un niveau d'eau est mesuré, les CONDITIONS DU Niveau d'Eau doivent être notées, la condition 1 étant sa position, la condition 2 son état, et la condition 3 ce qu'il représente. Les codes à utiliser pour remplir ces champs sont présentés dans l'index. Si l'ALTITUDE DU SOL au point d'observation est connue, il est possible de déterminer l'altitude du niveau d'eau sur place, sinon cette information peut être calculée plus tard à l'aide de l'altitude extraite des cartes. L'ALTITUDE DU NIVEAU d'EAU correspond à l'altitude du sol plus la hauteur du point de référence, moins la profondeur du niveau d'eau. Si le propriétaire connaît la VARIATION ANNUELLE DU NIVEAU d'EAU, on peut l'indiquer dans le champ à cet effet. L'unité de cette mesure doit également être le mètre.

Inspiré des fiches de terrain du CGQ, adapté de celles du MRNF pour la cartographie du substratum rocheux (Sharma *et al.*, 1998), le bloc 12 a été modifié pour intégrer les données stratigraphiques de sédiments non consolidés (figure 6.9).

Un forage comprend plusieurs intervalles lithologiques pour lesquels il est possible de faire plus d'une description; l'intervalle est identifié dans le champ INTERVAL. Pour un même intervalle, il est possible de vouloir décrire plus d'un corps géologique; chaque ligne correspondante doit donc contenir un ID unique qui peut servir, avec l'identifiant de l'intervalle, de référence ultérieure. Le champ DESC permet de catégoriser le corps géologique décrit. On peut par exemple vouloir décrire un fragment, une lentille ou une lithologie. Le champ R/Q permet de préciser s'il s'agit d'une description de roches (R) ou de sédiments non consolidés (Q). Le champ lib permet d'indiquer la librairie utilisée pour décrire la lithologie ou le matériau. De façon générale, on utilise la librairie du MRNQ (M) pour les roches, tandis qu'on peut utiliser la librairie simplifiée des puisatiers (P) ou la librairie simplifiée de la CGC-Q pour les roches non consolidées (annexe C). Le champ CONTACT représente les profondeurs limites inférieures et supérieures d'un intervalle. L'unité de mesure de profondeur sera de préférence métrique. Les valeurs possibles du TYPE de contact se trouvent dans une librairie. Les champs STRATI/FACIÈS, LITHO/MATÉRIAU P, QUALIF/MATÉRIAU S, TEX-STRUC, COULEUR et ÉPAISSEUR servent à décrire la lithologie. Pour la description de lithologies du substratum rocheux, le champ STRATI renvoie aux appellations locales stratigraphiques, de groupes, de formations ou de membres. Les codes du champ LITHO comprenant quatre cases se trouvent dans la librairie de lithologie du MRNF. Le champ QUALIF comprenant également quatre cases modifie le nom de la roche : par exemple, pour un grès calcareux, les codes de ce champ se trouvent également dans la librairie du MRNF. Pour les sédiments non consolidés, le champ FACIÈS renvoie à une liste de l'environnement de déposition, les champs MATÉRIAU P et MATÉRIAU S concerne la lithologie primaire et secondaire, et les codes utilisés proviennent de la librairie des puisatiers ou de celle du CGQ, tel qu'il est indiqué dans la case lib. Des librairies de couleur et de texture permettent de remplir les champs TEX/STRUC et COULEUR. L'ÉPAISSEUR du corps géologique comprend six cases : deux pour l'épaisseur minimale (MIN), deux pour l'épaisseur moyenne (MOY) et deux pour l'épaisseur maximale (MAX). La première des deux cases sert à quantifier l'épaisseur de l'unité de mesure indiquée dans la seconde case. Les abréviations des unités de mesure se trouvent dans la librairie correspondante.

Le champ REF-ID lie ensemble des descriptions lithologiques. Il est le plus souvent rempli pour montrer qu'un corps lithologique décrit sur une ligne fait partie d'un corps plus vaste, par exemple un fragment dans un till. Le champ COMMENT permet d'indiquer qu'un commentaire est annexé à cette description lithologique (figure 6.9).



Le bloc 13 (figure 6.10) porte pour sa part sur les échantillons de roc/matériau. Les champs INTERVAL et REF_ID doivent contenir l'identifiant de l'intervalle échantillonné qui est décrit dans le bloc 12 sur les lithologies. Un identifiant est ajouté pour référence ultérieure (ID). Le numéro d'échantillon (NO ÉCHAN) doit être unique dans la base de données. Il existe deux conventions pour la numérotation des échantillons. Certains utilisent les deux derniers chiffres de l'année et les initiales de la personne qui échantillonne, suivis d'un numéro séquentiel, d'autres préfèrent utiliser le numéro de la station additionné de la lettre ou du chiffre qui identifie la lithologie échantillonnée. Le but de l'échantillonnage est indiqué dans le champ BUT par des codes qui se trouvent dans une librairie. La position relative de l'échantillon par rapport au niveau de référence (profondeur ou élévation dans la section) est indiquée dans le champ ELEV DS SECTION.

Le bloc 14 (figure 6.11) sur les photos est rempli de la même façon que le bloc 13 sur les échantillons, c'est à dire que les champs INTERVAL et REF_ID doivent contenir l'identifiant du corps géologique photographié. Si la photo représente l'ensemble de la station, on inscrira 0 dans ces deux champs. Le nom du rouleau figure dans le champ ROULEAU et le numéro de la photo, dans le champ NO.

Un espace est alloué au bloc 15 pour les notes et les commentaires sur les lithologies, les échantillons et les photos (figure 6.12).

La quatrième fiche comprend les informations recueillies lors de l'ÉCHANTILLONNAGE D'EAU. Le bloc 16 sert à l'identification de l'échantillon d'eau. Le numéro de la station est répété dans le champ # STATION (figure 6.13). Le Nom de l'échantillon doit être unique; on utilise donc l'une des conventions suivantes : les deux derniers chiffres de l'année suivis des initiales de la personne qui échantillonne ou les deux premières lettres de l'endroit (municipalité, MRC) où l'échantillon est prélevé, suivies d'un numéro séquentiel. Si plusieurs personnes échantillonnent la même année, il serait préférable d'utiliser la convention des initiales de la personne qui échantillonne pour éviter des problèmes de duplication. Si un duplicata a été pris, son nom doit être indiqué dans le champ NOM DU DUPLICATA.

Le bloc 17 (figure 6.14) permet de saisir les informations sur le calibrage des appareils et la mesure des standards pour vérifier ce calibrage. Étant donné que la valeur du standard utilisé pour le calibrage dépend de la température (T), celle-ci est intégrée au formulaire; on saisit d'abord la valeur du standard utilisé (VAL_Utilisée), puis celle du paramètre mesuré (VAL_Mesurée). Une fois le calibrage fait, on indique si la mesure est relative à la calibration ou à sa Vérification en inscrivant X dans la case appropriée.

Le bloc 18 (figure 6.15) a trait à la PURGE d'un puits avant de prélever un échantillon d'eau souterraine. Il est obligatoire de remplir toutes ses cases, y compris les unités de mesure. Toutefois, ces données ne seront pas transférées dans la base de données GIMS, mais elles permettront d'assurer la validité des résultats d'analyse. Une librairie est disponible pour le champ MÉTHODE qui concerne le type de pompe utilisé pour réaliser la purge.

Le bloc 19 (figure 6.16) permet de préciser le type d'analyse (Inorganique, bactériologique, Isotopique) qui sera effectué sur l'échantillon d'eau ainsi que le nombre de bouteilles (NB BOUTEILLES) recueillies.

Certains paramètres physico-chimiques sont évalués sur place et notés dans le bloc 20. Dans l'exemple de cette fiche (figure 6.17), les paramètres mesurés ou évalués lors de la visite sont explicites. Il est possible que d'autres paramètres soient mesurés; de nouvelles lignes pourraient par conséquent être ajoutées pour compléter la fiche. Pour la mesure de l'ALCALINITÉ en ppm de CaCO_3 , un bloc spécial a été fait afin d'indiquer la quantité de RÉACTIF et le pH pour la valeur de CaCO_3 obtenue.

6.2.2 Acquisition des données numériques

Ce dernier bloc complète la description des fiches de terrain et des différentes données pouvant être collectées. La prochaine étape consiste à faire la saisie de données sous format numérique. Les technologies employées actuellement à la CGC pour acquérir les données sous format numérique seront discutées dans cette section. Ce ne sont ni les seuls logiciels ni les plus performants qui ont servi à la gestion de données, mais ceux qui s'avéraient les meilleurs, compte tenu des budgets et des ressources humaines alloués au projet. Lors des projets en hydrogéologie, deux méthodes de saisie des données de terrain ont été utilisées : la première consistait en des formulaires conçus grâce à Access et la seconde consistait en des formulaires ressemblant aux fiches de terrain et se trouvant sur Internet. Ces derniers ont été créés à l'aide du logiciel ColdFusion.

La base de données pour l'aquifère fracturé du sud-ouest du Québec a été complétée grâce aux formulaires Access. Dans ce cas, le formulaire d'entrée (figure 6.18) donne accès à cinq formulaires principaux. Le premier formulaire intitulé LOCALISATIONS (figure 6.19) permet de gérer les informations sur les stations. Il regroupe les données qui sont compilées dans les blocs 1, 2 et 3, c'est-à-dire celles qui concernent la station elle-même, sa localisation et l'information sur le propriétaire du puits.

Le second formulaire nommé FORAGES comprend les informations géologiques et hydrogéologiques rattachées à la station, et les données d'infrastructure liées à un puits. Donc, une fois la station créée, il est possible de faire la saisie des données relatives à la géologie, c'est-à-dire les contacts et les intervalles lithologiques (consolidés ou non consolidés), et dans le cas d'un puits, les informations relatives à l'infrastructure et aux niveaux d'eau (les informations dans les blocs 5, 11, 12). Le formulaire OBSERVATIONS sert surtout à faire la saisie des informations liées aux échantillons et aux photos (les informations des blocs 13, 14 et 16). On doit retourner dans le formulaire FORAGE pour faire le lien entre l'intervalle échantillonné ou photographié et y indiquer les profondeurs échantillonnées. Dans le formulaire CAPTAGE, l'onglet *captage* permet de faire la saisie des données du bloc *Info Captage* (bloc 4) et l'onglet *environnement*, celle des informations sur les activités polluantes (bloc 8) et sur la perception de la qualité de l'eau (bloc 10). Le formulaire ANALYSES permet quant à lui de faire la saisie des données d'analyse.

Un dernier formulaire, qui ne sert pas vraiment à saisir les données géologiques ou hydrogéologiques, est utilisé pour garder un log des corrections faites à la base de données. Ce formulaire sert à la gestion des données. Par exemple, lors de la visite d'un puits, si la localisation s'avère inexacte, on en fait la modification dans la table de localisation et on indique ce changement dans le formulaire LOG-CORRECTIONS. Ce formulaire permet de spécifier qui a fait les changements, leur envergure, quelle information est touchée par le changement et pour quelle raison la donnée a été changée. Avant de modifier une information dans la base de données, il faut d'abord consulter ce formulaire pour vérifier si cette information a déjà fait l'objet d'un changement ainsi que quand et pourquoi elle a été changée. Cette procédure permet d'évaluer si la nouvelle modification est pertinente.

Les avantages d'utiliser Access sont nombreux : le logiciel est très peu coûteux, il peut contenir une assez grande quantité de données et il est facile d'utilisation, particulièrement pour les requêtes. Par contre, des notions de programmation VBA sont nécessaires pour préparer les formulaires.

Cependant, les formulaires Access présentent quelques inconvénients. La synchronisation des formulaires n'est pas toujours parfaite. Il faut parfois quitter un formulaire et y revenir pour que toutes les données soient accessibles et liées. Par exemple, si une station n'a pas été saisie dans le formulaire FORAGES de la base de données, on doit insérer l'information dans le formulaire LOCALISATIONS, le fermer et ouvrir de nouveau le formulaire FORAGES pour que la station figure sur la liste. Par ailleurs, Access est un logiciel multi-usagers, mais des problèmes peuvent survenir si les usagers essaient de modifier le même enregistrement en même temps. Ceci ne devrait certes pas arriver très souvent, mais la possibilité existe. De plus, Access est parfois instable : il arrive que la



base de données ne se ferme pas correctement et il devient alors impossible d'y accéder. Par contre, dans la plupart des cas, il est possible d'ouvrir une nouvelle base de données et d'y importer toutes les tables, les requêtes et les formulaires de la base de données endommagée.

Une mise en garde relative à l'utilisation d'Access doit également être faite, car Access est un logiciel très convivial et facilement utilisable. Il est donc impératif d'avoir une seule copie active de la base de données, même pendant la période d'acquisition des données sur le terrain. En outre, avec Access, un manque de précaution peut entraîner des modifications non désirées aux champs de saisie. C'est pourquoi seuls des utilisateurs avertis devraient avoir accès à la base de données. Enfin, il est important que le numéro de station saisi reste le même, car il sert de lien à toutes les informations saisies dans les différentes tables. Changer le numéro de station implique que les données qui se rapportaient à l'ancien nom de station ne lui sont plus liées.

La base de données d'un projet régional peut aussi se faire à l'aide d'une série de formulaires créés pour saisir les données de terrain par Internet (Rivard *et al.*, sous presse). Dans ce cas, la base de données réside sur un serveur installé avec un logiciel générant des pages Internet dynamiques. Les données sont compilées dans une base de données Access ou dans n'importe quel logiciel de base de données. L'ajout de données se fait par ODBC. Les pages Internet créées à l'aide d'un éditeur de page Internet permettent d'ajouter à la base de données les champs remplis sur la page Internet. Ces pages sont créées de façon à ressembler aux fiches de terrain. Un exemple de ce type de formulaire est présenté à la figure 6.20. La première étape consiste à saisir les données de station et de localisation. Ensuite, les autres informations obtenues des travaux de terrain sont saisies. Une fois les données soumises, il faut prévoir un mécanisme qui assure qu'elles ont bel et bien été ajoutées à la base de données. Dans le cas du projet MGWI, le retour d'un numéro de confirmation indique la réception des données dans la base. Ce numéro peut être noté sur la fiche de terrain.

La saisie de données par Internet comporte un certain nombre d'avantages : une seule base de données existe et elle réside sur le serveur. De plus, les utilisateurs n'y ont pas accès directement, ce qui évite les erreurs pouvant être faites par mégarde. Enfin, avec cette méthode, il n'y a pas de problèmes de synchronisation.

Toutefois, il y a certains inconvénients à la saisie de données par Internet. Comme la base de données ne se trouve pas sur place, il devient difficile de préparer des cartes pendant le terrain. Par contre, avec un peu de planification, certaines cartes pourraient être disponibles par Internet, particulièrement celles qui nécessitent peu de traitements.

6.2.3 Transfert de données provenant de fichiers numériques

Les deux premières sections portaient sur la saisie de données à la pièce, c'est-à-dire d'une donnée à la fois. Mais, dans certains cas, les données proviennent de fichiers numériques comme la base de données des puisatiers ou les fichiers Excel contenant des résultats d'analyse chimique. Pour la base de données des puisatiers, il existe actuellement une série de macros à exécuter afin d'intégrer les données à la base de données, les entrées de la base de données des puisatiers étant déjà validées et vérifiées par le MDDEP. Par contre, les fichiers de résultats d'analyse parviennent souvent en format de fichiers Excel. La saisie des données dans une base de données assure leur intégrité, ce qui n'est pas le cas dans des fichiers Excel. Pour cette raison, on doit vérifier que toutes les informations du fichier Excel sont cohérentes. Pour ce faire, une série d'étapes doit être accomplie avant l'intégration des données à la base numérique :

1. la vérification du nom de l'échantillon. Il faut vérifier que les numéros d'échantillon du fichier Excel correspondent bien à ceux des échantillons dans la base de données;
2. l'identification des différents paramètres mesurés avec leur méthode d'analyse respective. À l'aide de la liste des paramètres et de leur méthode, il faut vérifier si leur liste dans la table est complète (tblelem) et en vérifier l'écriture;

- 
3. la vérification des unités de mesure des éléments. On vérifie que l'unité de mesure spécifiée dans le fichier Excel correspond à celle de la table des éléments (*tbl элем*), sinon on fait la conversion nécessaire au fichier Excel;
 4. la vérification des types de codes selon les résultats d'analyse chimique. On vérifie les différents codes qui devront être insérés dans la table des résultats (voir la table *tblcode*). Par exemple, un résultat inférieur à la limite de détection portera un code différent de celui qui est relatif à un résultat plus grand que la limite de détection;
 5. l'ajout des données. Lorsque toutes les vérifications sont faites, on peut faire l'ajout des données à l'aide de requêtes. On ajoute les éléments manquants à la table des éléments, le type de détermination faite sur l'échantillon dans la table *tblдет* et les résultats d'analyse à la table *tblres* en fonction des différents codes.

L'ajout de données à l'aide de fichiers Excel n'est pas toujours simple, et pour une personne qui possède peu de notions sur les bases numériques, il est courant de faire des erreurs. Si les fichiers Excel sont toujours structurés de la même façon, il est possible de créer des procédures qui faciliteront l'ajout des informations dans une base numérique. Mais comme les analyses peuvent provenir de différents laboratoires, il est peu probable qu'une procédure unique puisse être adéquate.

6.3 Conclusion et recommandations

Une base de données telle que la base numérique produite pour le projet sur le système aquifère du Sud-Ouest québécois est très complexe et nécessite un certain nombre d'outils afin d'assurer son intégrité. La conception de fiches de terrain est une première étape dans la standardisation des données à la saisie. Ces fiches de terrain sont d'abord un aide mémoire utile lors d'une visite de terrain. Elles permettent aussi de recueillir les données de façon cohérente tout en facilitant leur saisie sur ordinateur, de même qu'elles constituent un système d'archives pour références futures. L'utilisation des fiches de terrain devrait être obligatoire, et les fiches et la base de données complétées devraient être remises au MDDEP à la fin d'un projet de caractérisation régionale.

Pour éviter tous les tracas liés à une base de données inconsistante, il est fortement recommandé d'avoir un gestionnaire attribué à la base. Une base de données exploitée avec Access est facile à reproduire. Si personne n'a la responsabilité de la gérer, il est probable que des copies différentes soient produites, ce qui peut entraîner des erreurs substantielles et des pertes de temps considérables par la suite. De plus, le transfert d'une série de données à l'aide de fichiers numériques contenant par exemple des résultats d'analyse ou de tables de données de terrain vers la base de données GIMS, demande une bonne connaissance de la structure de la base numérique. Mentionnons aussi qu'un gestionnaire de base de données a comme responsabilité d'être à l'affût des nouvelles technologies de l'information, de choisir la méthode appropriée pour la saisie des données et de fournir des conseils et de l'information technique.

Figure 6.1 Exemple de champs remplis pour les blocs 1 et 2.

Dans ce cas, la station est visitée dans le but de prendre un échantillon d'eau et de mesurer le niveau d'eau. Cette station a été visitée auparavant; sa localisation de référence a donc été ajoutée et il existe un rapport relatif à cette station dont le numéro de dossier est A-Bro-001.

LOCALISATION # LOCALISATION DE RÉFÉRENCE 89 3050 300		ALBU
ZONE 18 CARTE NTS 031G/04 325604 5263005	# PUIXS dossier A-Bro-001 URM <input checked="" type="checkbox"/> 50 000 APT <input type="checkbox"/> 20 000 MDS <input type="checkbox"/> 10 000 NAD <input type="checkbox"/> AUTRES	STATION # STATION 0,0 EB 0,0,2,1 GEOL PROJET INTÉRÊT EB A/09 KB DATE 0,0,0,70,7 PRECIPITAT <input type="checkbox"/> PLUIE <input type="checkbox"/> RESSAISON <input type="checkbox"/> NEVE NOUVELLE
DESCRIPTION DE LA STATION : CAPTAGE DT FORAGE HY NOTES : 1	ALTITUDE : 00 000 m <input type="checkbox"/> 20 000 m <input type="checkbox"/> Niveau p <input type="checkbox"/>	

Figure 6.2 Exemple de champs remplis pour le bloc 3.

Dans ce cas, l'adresse du propriétaire n'est pas celle du puits/captage.

PROPRIÉTAIRE NOM Tremblay NOM DE L'ORGANISME / INDUSTRIE / MUNICIPALITÉ	PRÉNOM Charles ADRESSE 3830 3 ^{ème} Ave	# TÉLÉPHONE (418) 693-2890 CODE POSTAL VILLE Dolbe
		<input type="checkbox"/> adresse dupliée

Figure 6.3 Exemple de champs remplis pour le bloc 4.

Dans ce cas, le puits est privé et il sert à l'approvisionnement en eau potable domestique ainsi qu'à l'agriculture. De plus, il sert à alimenter 6 personnes et une ferme comprenant 60 vaches laitières. L'eau n'est pas traitée.

INFO CAPTAGE <input checked="" type="checkbox"/> PRIVÉ <input type="checkbox"/> MUNICIPAL	UTILISATION MI AG VAL SO	ÉLEVAGE TÊTE RELIÉ AUN ACQUEDUC <input checked="" type="checkbox"/>	NOM DE L'ACQUEDUC 4	POPULATION DESSERVIE 6 7 7
AQUIFÈRE NAPPES CA RÉSERVOIR <input checked="" type="checkbox"/>	CAPACITÉ UNITÉ LITRES	DÉBIT MOYEN été hiver annuel	UNITÉ	DÉBIT POTABLE UNITÉ
NOM PROPRIÉTAIRE	TRAITEMENT <input checked="" type="checkbox"/>	TYPE DE TRAITEMENT	NOTES :	

Figure 6.4 Exemple de champs remplis pour le bloc 5.

Souvent, le propriétaire du puits détient le rapport de forage et peut fournir la plupart des informations qui figurent dans ce bloc. Ces données appartiennent aussi à la base de données des puisatiers.

INFRA STRUCTURE DU CAPTAGE OU DU FORAGE										UNITES MESURES <input checked="" type="checkbox"/> mètre <input type="checkbox"/> pied	
DATE CO NSTRUCTION (MM/AN/AN) 18/07/07	PROF 12 m	DIAM 20 cm	LONG TUBAGE 5	LONG TUB/ROC	TYPE <input type="checkbox"/> MASSIF <input checked="" type="checkbox"/> CREPINE						
1-LONG CREPINE <input type="checkbox"/>	1-PROF CREPINE <input type="checkbox"/>	2-LONG CREPINE <input type="checkbox"/>	2-PROF CREPINE <input type="checkbox"/>	PROF POMPE <input type="checkbox"/>	TYPE DE POMPE						
1-PROF VENUE <input type="checkbox"/>	1-VENUE DETAIL:			2-PROF VENUE <input type="checkbox"/>	2-VENUE DETAIL:						

Figure 6.5 Exemple illustrant la relation entre les activités potentiellement polluantes et le puits, dans le schéma de gauche, et la stratigraphie du puits, dans le schéma de droite.

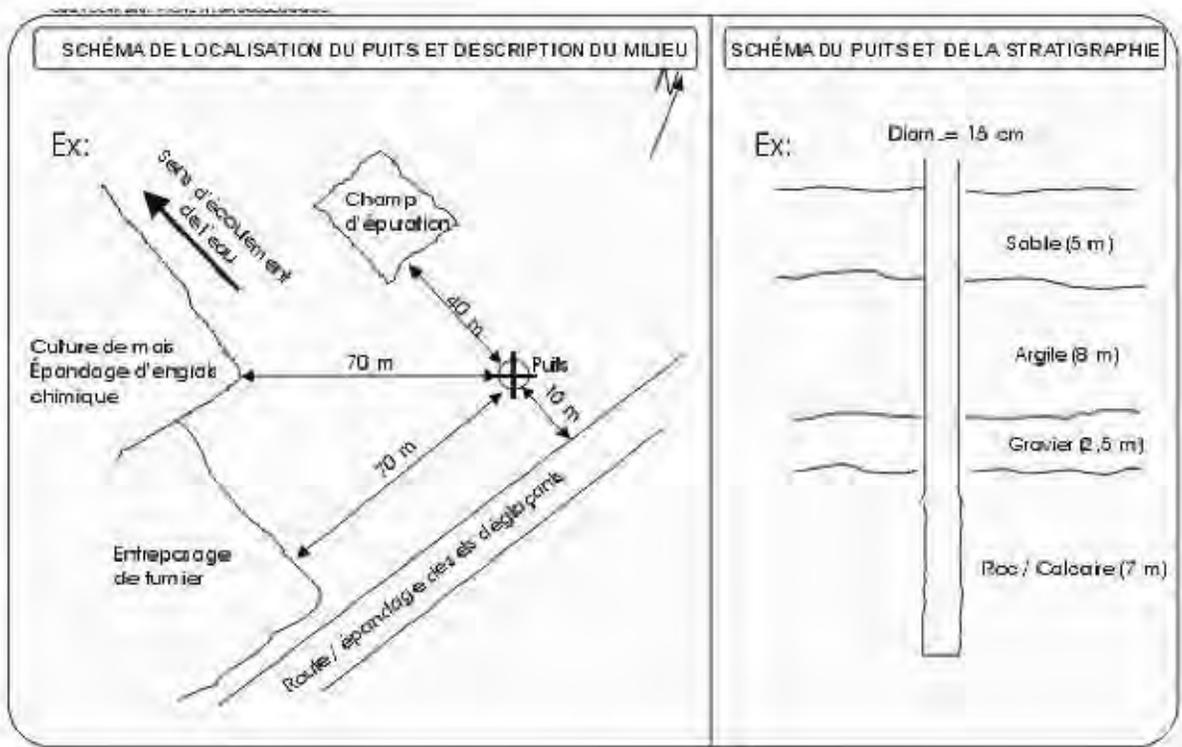


Figure 6.6 Exemple de champs remplis pour le bloc 8.

ACTIVITÉS POTENTIELLEMENT POLLUANTES				UNITÉS MESURES <input type="checkbox"/> Métrique <input type="checkbox"/> Impérial	
ACTIVITÉ	DIST. CAPTAGE	<input checked="" type="checkbox"/> E	<input type="checkbox"/> M	NOTES:	
R	10 m				
ACTIVITÉ	DIST. CAPTAGE	<input checked="" type="checkbox"/> E	<input type="checkbox"/> M	NOTES:	
GC	70 m			8	
ACTIVITÉ	DIST. CAPTAGE	<input checked="" type="checkbox"/> E	<input type="checkbox"/> M	NOTES:	
F	70 m				
ACTIVITÉ	DIST. CAPTAGE	<input checked="" type="checkbox"/> E	<input type="checkbox"/> M	NOTES:	
F&C	40 m				

Figure 6.7 Exemple de champs remplis pour le bloc 10

Cet exemple présente les informations recueillies à la station 00EB-0021 et indique que l'eau est dure et de qualité moyenne, et qu'un manque d'eau est survenu une fois dans le passé. Important : le numéro de station est répété dans la partie supérieure droite.

PERCEPTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU:		QUAND	STATION	# STATION	
QUALITÉ DE L'EAU (évaluation qualitative)		MANQUE D'EAU <input checked="" type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	Été '83	0,0,EB	0,0,2,1
E excellente <input type="checkbox"/>	S salées <input type="checkbox"/>	NOTES: été très chaude, moins de 10 mm de pluie, pendant 60 jours. 10			
B bonne <input type="checkbox"/>	F fer <input type="checkbox"/>				
M moyenne <input checked="" type="checkbox"/>	MM mauvaise <input type="checkbox"/>				
MV mauvaise <input type="checkbox"/>	S saleté <input type="checkbox"/>				
D dure <input checked="" type="checkbox"/>	CC coloré <input type="checkbox"/>				
C corrosive <input type="checkbox"/>	Y arête <input type="checkbox"/>				

Figure 6.8 Exemple de champs remplis pour le bloc 11.

Cet exemple montre les champs remplis lorsqu'un niveau d'eau est mesuré. Dans ce cas, il n'y a pas eu de pompage. La profondeur du niveau d'eau est toujours mesurée en mètres et ce niveau a été mesuré à partir du point de référence le plus bas, c'est à dire à 0,6 m au dessus du sol.

NIVEAUX D'EAU (NE)		PROF. DU NIVEAU EAU		ALTITUDE		HAUTEUR MARGELLE DE JA (TOP CASINO P/R SOL) MARGELLES (CASINO/PVC)		NOTES:
1- CONDITION DU NE	2- CONDITION DU NE	PROF. (à l'arrabage le plus bas)	ALTITUDE	PROF. (à l'arrabage le plus bas)	ALTITUDE	HAUTEUR MARGELLE DE JA (TOP CASINO P/R SOL)	MARGELLES (CASINO/PVC)	
1- SOUS GÉST	2- RS	10				0,7	0,1	

Figure 6.9 Exemple de champs remplis pour le bloc 12.

Cette section présente un forage contenant trois unités lithologiques, deux unités quaternaires et une unité rocheuse. Les contacts lithologiques sont à 5 et 10 m. La première unité à la surface est un till contenant 10 % de fragments de calcaire. Le champ ID peut ne pas être unique, mais la combinaison des champs INTERVAL et ID doit l'être. Certains préfèrent mettre des ID différents à chaque ligne. Le X dans le champ COMMENT indique qu'un commentaire sur les fragments de calcaire est noté au bloc 15 (figure 6.12).

LITHOLOGIE				SPHAIRES		LITHO / GROSSEUR		CORRECTION		EPAISSUR		COMMENT			
INTERV	ID	DESC	NOUVEAU	CONTACT	TYPE	LITHO	GROSSEUR	REMARQUE	TECHNIQUE	FRAGMENTS	ALPHABETIQUE	MM	CM	NOY	REF ID
I.01	A	Q		05		D									
I.01	B	R				10	S7A		12						A X
I.02	A	Q		510		S									
I.03	A	R		1012		S7A		FA							

Figure 6.10 Exemple de champs remplis pour le bloc 13.

Cet exemple montre que deux intervalles de la section décrite précédemment ont été échantillonnés. Le premier, un échantillon de roche, a été pris pour identification; un commentaire sur l'échantillon est noté par le Y dans le bloc 13. Un deuxième échantillon de sable a été pris dans le but de faire une analyse granulométrique. Le champ REF_ID indique que c'est la lithologie de l'intervalle mentionné dans le premier champ qui a été échantillonnée.

ÉCHANTILLON ROC / MATÉRIEL						
INTERV	ID	NOUVEAU	NO ECHAN	BUT	ELEV	NOTE
I.02	E1		001EB-0021-3a	I	SECTION	A Y
I.01	E2		001EB-0021-2a	GR	13	A
I.	E.					
I.	E.					

Figure 6.11 Exemple de champs remplis pour le bloc 14.

Cette figure indique qu'une photo du till a été prise, c'est-à-dire la lithologie de l'intervalle (INTERVAL) « I01 » avec le ID « A ».

PHOTO			
ROULEAU	NO	INTERVAL	ID
1E87	02	I.01	A

COMMENTAIRE: Till à frag carbonates

Figure 6.12 Exemple de champs remplis pour le bloc 15.

Ce bloc permet de noter les commentaires sur les lithologies, les échantillons et les photos. Cet exemple renvoie aux commentaires des figures 6.9 et 6.10.

NOTES:

X: Les fragments varient de 10 à 20 cm dans l'axe le plus long.

15

Y: demander à Renaud s'il connaît l'appartenance strati de cette roche

Figure 6.13 Exemple de champs remplis pour le bloc 16.

Cette section montre qu'en plus de l'échantillon d'eau, un duplicata a été échantillonné.

008 / LONP 2001: RICHE HYDROGÉOLOGIQUE

ÉCHANTILLONNAGE D'EAU

STATION: 00 EB 10021

Nom échantillon: 00BEN10

16

DUPLICATAT: n

DATE: 07/07/00 HEURE: 13:30

NOM DU DUPLICATAT: 00BEND10

Figure 6.14 Exemple de champs remplis pour le bloc 17.

Ce bloc comprend les informations sur les standards utilisés pour faire le calibrage des appareils. Le calibrage a été fait pour l'oxygène dissous en %, et la mesure a été vérifiée.

Date	Heure	T	PARAM	VAL Utilisée	VAL Mesurée	calibration	Vérification
07/07/00	13:30	28 °C	DD%	25%	25%	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
07/07/00	13:50	28 °C	DD%	25%	25%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
/ /		°C	PARAM	VAL Utilisée	VAL Mesurée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
/ /		°C	PARAM	VAL Utilisée	VAL Mesurée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
/ /		°C	PARAM	VAL Utilisée	VAL Mesurée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
/ /		°C	PARAM	VAL Utilisée	VAL Mesurée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
/ /		°C	PARAM	VAL Utilisée	VAL Mesurée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
/ /		°C	PARAM	VAL Utilisée	VAL Mesurée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figure 6.15 Exemple de champs remplis pour le bloc 18.

Cette figure présente un exemple de saisie du bloc 18. Une librairie existe pour remplir le champ MÉTHODE.

PURGE: VOLUME D'EAU PURGÉE: 50 gal

DU REC: 2

18

DES: 125 gal/h

MÉTHODE: W1

Figure 6.16 Exemple de champs remplis pour le bloc 19.

Cet exemple montre qu'une analyse des composants inorganiques de l'échantillon d'eau sera effectuée, et que cet échantillon est réparti dans trois bouteilles.

TYPE DE PARAMÈTRE		NB
<input checked="" type="checkbox"/> Inorganique	BOUTEILLES	3
<input type="checkbox"/> bactériologique		
<input type="checkbox"/> biologique		

Figure 6.17 Exemple de champs remplis pour le bloc 20.

On indique si l'eau est traitée ainsi que sa provenance (profondeur) si elle est connue. Les informations sur son apparence, son odeur et son goût sont notées. Le bloc inclut aussi une section pour les valeurs mesurées. On indique les différentes mesures faites par paramètre avec la valeur retenue.

<input type="checkbox"/> TRAITÉE	<input checked="" type="checkbox"/> BRUTE	PROVENANCE DE L'ÉCHANTILLON / PROFONDEUR (m)		10 m		
ODEUR: soufre		COULEUR: jaunâtre		GŔT: soufre		
		HULE: non		TURBIDITÉ: non		
VALEURS MESURÉES						VALEUR RETENUE
T (°C)	8.26	8.24	8.25	8.25	8.25	8.25
pH	7.65	7.63	7.62	7.65	7.65	7.65
CONDUCTIVITÉ (µS/cm)	1.846	1.846	1.846			1.846
CONDUCTIVITÉ SPÉCIFIQUE (µS/cm)	270, 269, 259, 271, 271, 271				271	
SALINITÉ (ppt)	1.3	1.3	1.5	1.5	1.6	1.4
MÉT: TDS (mg/l)						
O ₂ (mg/l)						
O ₂ (°D)						
POT. REDOX E _H (mV)						
ALCALINITÉ (PPM CaCO ₃)		ALCALINITÉ (PPM CaCO ₃)		ALCALINITÉ (PPM CaCO ₃)		
RÉACTIF	pH	RÉACTIF	pH	RÉACTIF	pH	
10 ml	6.5	15 ml	6.54	240		

Figure 6.18 Formulaire d'entrée de la base de données.

Les chiffres de 1 à 5 montrent les boutons qui permettent de faire apparaître les 5 formulaires principaux.

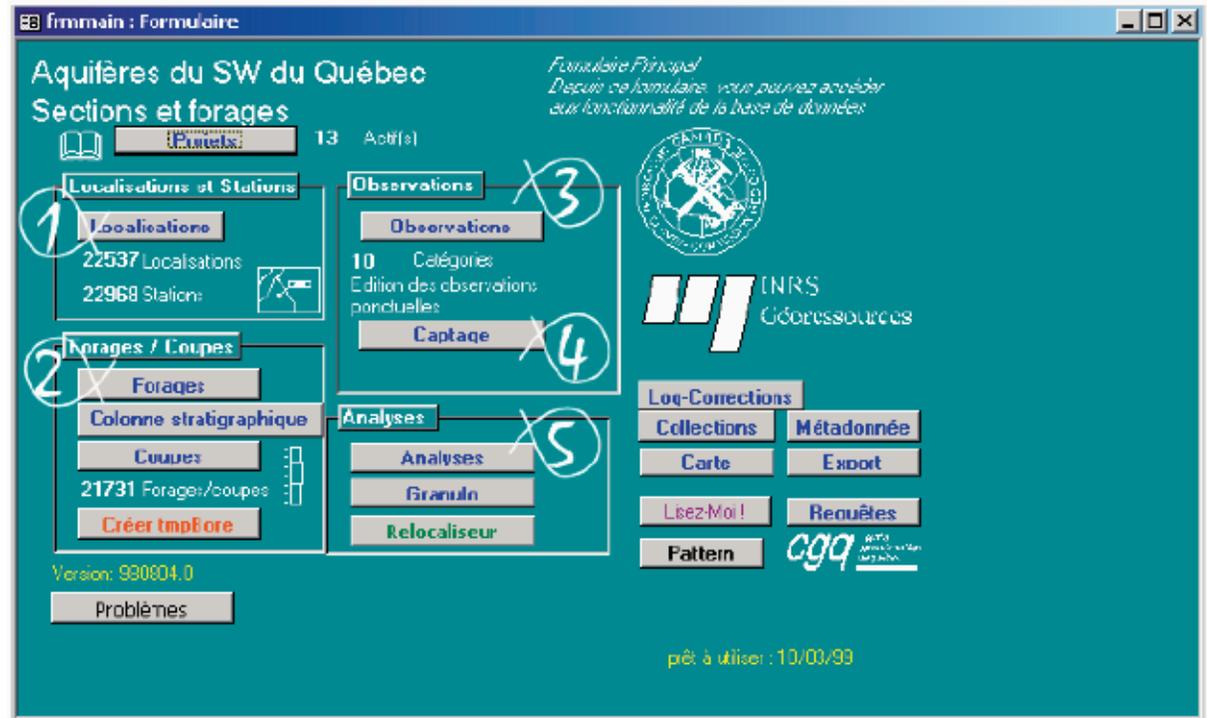


Figure 6.19 Formulaire de LOCALISATION.

Ce formulaire permet de visualiser les informations d'une station déjà saisie en la sélectionnant dans le navigateur. Pour créer une nouvelle station, il faut appuyer sur le bouton Créer Station qui ouvre un formulaire de saisie pour la station. Les onglets *Station*, *Propriétaire* et *Intérêt* permettent de saisir les informations des blocs 1 et 3 de la fiche de terrain. Il faut toutefois que le nom du propriétaire ait déjà été entré dans la table des propriétaires, sinon on peut l'ajouter en pesant sur le bouton Ajouter un proprio.

Aquifères du SW du Québec

Identifiant: 10363 Ligne: 01_ligne_1 DCMVERS: Ck

SNRC: 0910/09 Nom: KADIE 01_puis_16

Lat: 5000.2 Source d'info: Carte 50000

Long: 6053373 Source d'info: 50000

Altitude: 2

Source d'info: 50000

So ou parcelle: [dropdown]

Station: Propriétaire Intérêt

Station:	Date:	Personne:
01_puis_16	15/07/07	Martin, R. (TYRBO)

Commentaire:

Err: [dropdown] sur 1

Err: [dropdown] sur 22535

Navigateur:

- STATIO
- 00_AND_P1
- 00_GED_01
- 00_C4E_F2
- 00_GED_01
- 00_EPA
- 00_GED_01A
- 00_GED_01B
- 00_GED_02a
- 00_GED_02B
- 00_GED_03
- 00_GED_04
- 00_GED_05
- 00_GED_05A
- 00_GED_06

Créer Station

Ajouter un proprio

Éditer un proprio

Champ: STATIO

Valeur: [input]

File

Si le point ou intérêt n'est pas UTM NAD 27, Zone 18: Veuillez indiquer la projection utilisée pour l'ensemble de la zone.

Figure 6.20 Exemple de page Internet créée lors du projet MGWI pour la saisie de données de terrain.

Cette page permet de saisir les données du bloc de localisation. Lorsqu'on appuie sur le bouton *Soumettre la requête*, les données sont entrées dans la base numérique.

Create a location - NRCAN / RNCAN

Fichier Edition Affichage Favoris Outils ?

Adresse <http://www.cgq-qgc.ca>

IESM **Maritimes Groundwater Initiative**

Initiative sur les Eaux Souterraines dans les Maritimes **MGWI**

Creation of a new location
Création d'une nouvelle localisation

Location reference:

Location Alias:

Puit Dossier/Well report:

NTS: Zone:

X: Y:

Coord Ref: Source:

Altitude/Elevation: unit:

7. INTÉGRATION DES DONNÉES GÉNÉRÉES ET GESTION DES EAUX SOUTERRAINES

R. Martel, R. Lefebvre, M.M. Savard, M. Ouellet, D. Paradis, Y. Michaud, M. Nastev

Ce chapitre n'appartient pas à la caractérisation systématique, il présente plutôt une discussion sur les connaissances abordées dans ce guide et explique, entre autres aux preneurs de décisions et aux aménagistes, à quoi mène le niveau régional de connaissances hydrogéologiques. Ainsi, pour chacune des sections suivantes sur le suivi de la nappe, la vulnérabilité, les périmètres de protection, la quantité, la qualité et l'exploitabilité de l'eau souterraine, et l'aménagement du territoire, il est expliqué à quel usage servent ces renseignements de même que la façon de les obtenir et qui doit les produire.

7.1 Suivi de la nappe

La mesure de suivi de la nappe permet d'enregistrer les fluctuations de causes naturelles ou anthropiques du niveau de la nappe phréatique. Les fluctuations naturelles sont générées principalement par les événements d'infiltration d'eau provenant de la pluie d'automne ou de la fonte de la neige du printemps et par les périodes d'étiage d'été et d'hiver. Les fluctuations anthropiques quant à elles sont générées par les activités humaines d'extraction ou d'injection d'eau. Le suivi de la nappe peut se faire à l'échelle locale ou régionale. À l'échelle régionale, il sert entre autres à évaluer la recharge de l'aquifère et à mesurer l'impact d'activités humaines (ex. : extraction de volumes importants d'eau dans un aquifère) sur les niveaux d'eau. À l'échelle locale, il peut être utilisé pour vérifier l'évolution d'intrusions d'eau saline en région côtière ou pour évaluer l'impact d'activités humaines sur les niveaux d'eau dans des zones restreintes (ex. : à l'échelle de l'aire d'alimentation d'un puits).

Le suivi de la nappe s'effectue dans des puits d'observation aménagés dans l'aquifère. La fréquence des mesures varie habituellement d'une fois par heure à une fois par semaine. La prise des mesures devrait se faire sur une période d'au moins deux ans pour l'évaluation de la recharge. Pour le suivi à long terme des tendances des niveaux d'eau d'un aquifère en exploitation, il est recommandé de procéder à des mesures de niveau d'eau pour toute la durée de son exploitation. Le suivi des niveaux d'eau devrait se faire dans au moins trois puits d'observation par aquifère. Ces puits devraient être éloignés des activités humaines (ex. : en dehors de la zone d'influence de puits en exploitation et de champs irrigués) et éloignés des limites de l'aquifère comme les limites hydrauliques (ex. : ligne de partage des eaux, cours d'eau lié de façon hydraulique à la nappe) et les limites imperméables.

Le suivi peut être effectué de façon automatique ou manuelle. En mode automatique, la fréquence des mesures est grande (de 1 à 24 lectures par jour). L'appareil de mesure est constitué d'un capteur de pression connecté ou combiné à un enregistreur de données. Le capteur de pression doit être submergé en tout temps. La profondeur d'installation du capteur dépend de sa sensibilité. Dans la plupart des cas, une profondeur de 2 à 3 m sous la surface de l'eau est suffisante pour enregistrer les variations du niveau de la nappe avec un capteur 0-5 m. En mode manuel, la fréquence est de l'ordre d'une lecture par semaine. Ce mode d'opération est plus coûteux, car il nécessite du personnel pour effectuer les mesures hebdomadaires et pour cette raison, la fréquence des mesures est plus petite. Les mesures sont effectuées à l'aide d'une sonde à niveau d'eau qui est descendue dans le puits d'observation pour détecter la profondeur de la nappe d'eau. Les données sont recueillies dans une base de données et analysées à l'aide de graphiques spécialement conçus que l'on nomme hydrogrammes de puits (figure 7.1). Ce graphique présente l'altitude du niveau d'eau dans le puits en fonction du temps.

Il existe plusieurs méthodes pour estimer la recharge d'un aquifère à l'échelle locale ou régionale (Hamel et al., 2001). La méthode du bilan hydrologique à l'aide des données météorologiques, les essais de traceurs et la modélisation numérique en sont quelques unes. La recharge annuelle d'un aquifère à nappe libre peut aussi être estimée par bilan d'eau avec un hydrogramme de puits. Il suffit de multiplier la porosité effective de l'aquifère par la hauteur totale d'eau équivalant au change-



ment de niveau d'eau lors des événements de recharge du printemps et de l'automne. Ainsi, pour un aquifère granulaire constitué de sable et de gravier (figure 7.2) dont la porosité effective est de 0,20 et dont le changement de niveau d'eau printanier mesuré sur l'hydrogramme de puits est de 1,12 m, la recharge printanière est estimée à 0,224 m ou 224 mm. Pour un hydrogramme de puits dont les observations ont été faites pendant une plus longue période, il est possible d'estimer la recharge moyenne annuelle de l'aquifère. Ainsi, dans notre deuxième exemple (figure 7.1) concernant une période d'observation de 17 ans, il y a eu 19 événements d'infiltration d'eau qui ont produit une recharge moyenne annuelle de 50 mm/an. Pour de plus amples informations concernant l'évaluation de la recharge, le lecteur peut se référer à Lerner *et al.* (1990) ainsi qu'à Lerner (1998).

7.2 Vulnérabilité

L'objectif fixé lors de la réalisation d'une carte de vulnérabilité est de fournir un outil d'aide à la prise de décision en matière d'aménagement et de gestion du territoire en vue de prévenir une éventuelle contamination de l'eau souterraine par l'implantation d'activités humaines polluantes. Cette carte permet de déterminer les zones particulièrement vulnérables, et son intérêt réside dans la nécessité de protéger la ressource pour éviter d'avoir à se lancer dans des travaux coûteux et difficilement réalisables de restauration d'aquifères contaminés. L'estimation de la vulnérabilité sur un territoire est une évaluation relative. Les valeurs ne sont pas absolues. Tout le territoire est vulnérable, mais certaines zones sont plus vulnérables que d'autres.

Il existe différentes méthodes pour évaluer la vulnérabilité et aucune ne s'applique à toutes les situations. Le choix repose sur les objectifs poursuivis et les caractéristiques de la région étudiée. Il est possible d'évaluer la vulnérabilité des aquifères à l'échelle régionale aussi bien que la vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination à l'échelle locale. Évidemment, pour ces deux échelles, l'approche et les méthodes utilisées sont différentes. On distingue deux types de vulnérabilité : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique. La vulnérabilité intrinsèque fait référence aux propriétés hydrogéologiques de l'aquifère, alors que la vulnérabilité spécifique se rapporte aux propriétés hydrogéologiques de l'aquifère et à la nature des contaminants potentiels pouvant affecter la qualité de l'eau souterraine.

7.2.1 Vulnérabilité intrinsèque

À l'échelle régionale, on utilise des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque afin de comparer de façon relative les différents aquifères sans faire référence à des contaminants en particulier. Un certain nombre d'hypothèses doivent être émises lors de la réalisation de ces cartes : le contaminant se situe à la surface du sol; le contaminant arrive à l'eau souterraine par infiltration des eaux de précipitation; l'écoulement est vertical vers le bas; le contaminant possède les caractéristiques de l'eau, ce qui en fait le pire des contaminants puisqu'il n'est pas adsorbé sur les sols, biodégradable ou volatilisé et qu'en somme aucun processus d'atténuation n'affecte son transport vers la nappe phréatique.

Les cartes peuvent être produites selon plusieurs méthodes. La méthode cartographique est basée sur la superposition de cartes diverses telles que géologiques, des formations superficielles, pédologiques ou hydrogéologiques, et le redécoupage se fait en zones plus ou moins vulnérables au moyen de ces renseignements. La méthode de cotation numérique est basée sur l'évaluation de facteurs hydrogéologiques. Un indice de vulnérabilité est calculé en additionnant les cotes numériques attribuées à chacun des paramètres de la méthode. Un poids peut également être appliqué à chaque paramètre en fonction de l'importance de ce paramètre par rapport à l'évaluation de la vulnérabilité. L'utilisation d'un système d'information géoréférencé est nécessaire pour la production de ces cartes (chapitre 6). La méthode DRASTIC (USEPA, 1991) et la méthode GOD (Foster et Hirata, 1991) sont des méthodes de cotation numérique dont l'usage est très répandu. Par exemple, DRASTIC utilise sept paramètres ayant tous un poids différent pour le calcul de la vulnérabilité (figure 7.3), alors que GOD possède seulement quatre paramètres non pondérés. La zone à



évaluer doit avoir une superficie minimale d'au moins 0,4 km² pour que la méthode d'évaluation de la vulnérabilité DRASTIC soit valide. La méthode GOD permet d'évaluer la vulnérabilité des aquifères confinés et non confinés sur une même carte, alors que DRASTIC nécessite en principe la confection de deux cartes. Par contre, dans le cadre du projet AFSSQ, la méthode DRASTIC a été adaptée afin de pouvoir représenter la vulnérabilité des aquifères confinés et non confinés sur la même carte. Si le territoire comporte des aquifères au roc, la méthode GOD permet de prendre en compte le degré de fracturation du roc. La figure 7.4 présente un exemple d'application de la méthode DRASTIC dans la région du Sud-Ouest québécois. Les zones en bleu foncé indiquent des endroits relativement peu vulnérables (indice DRASTIC inférieur à 100), alors que les zones jaunes et orangées sont plus vulnérables à la contamination.

Le choix d'une méthode de cotation numérique ou cartographique dépend de la quantité de points d'information disponibles. La méthode cartographique est celle qui nécessite le moins de points d'information. La densité d'information correspond à environ un point de contrôle pour 50 à 100 km². Les cartes produites sont moins précises et donnent une idée globale de la répartition de la vulnérabilité. L'échelle de réalisation des cartes est grande, de l'ordre de 1/500 000 à 1/250 000. La méthode de cotation numérique nécessite plus d'information avec une densité requise de l'ordre de 2 à 10 points d'informations par 10 km². Cette méthode est souvent appliquée à des échelles de 1/200 000 à 1/100 000 et donne des cartes plus précises. Les méthodes analytiques sont rarement utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans le cadre d'études régionales.

La vulnérabilité intrinsèque des aquifères est l'aptitude d'un milieu physique à transmettre verticalement un contaminant de la surface à la zone saturée. Elle peut aussi être définie comme étant l'aptitude d'un milieu physique à retarder la migration de ce contaminant. La notion de temps de transport du contaminant vers l'aquifère devient alors le paramètre pour évaluer la vulnérabilité. Au Québec, les aquifères rocheux sont souvent recouverts par des sédiments à couverture discontinue. Il est possible d'évaluer la vulnérabilité de ces aquifères en combinant les données de cartographie géologique 3D qui rendent possible la représentation des différentes couches de sédiments recouvrant le roc et le temps de transport de l'eau dans le roc non saturé ou dans les sédiments saturés et non saturés qui recouvrent l'aquifère au roc (Ross et al., 2002).

Le modèle géologique 3D est construit de la façon suivante : des coupes géologiques sont construites à l'aide des informations disponibles (figure 7.5a) et des surfaces sont créées en reliant les couches géologiques similaires aux coupes (figure 7.5b). Le modèle 3D est constitué de surfaces représentant le toit de chaque unité hydrostratigraphique (figure 7.5c). La conductivité hydraulique verticale et le gradient hydraulique vertical peuvent être attribués à chacune des unités hydrostratigraphiques. L'épaisseur de chaque unité est obtenue par la position du toit de chaque unité (figure 7.5d). Connaissant le gradient et la conductivité hydraulique des couches, le flux d'eau est évalué. Le temps de transport est obtenu en divisant l'épaisseur des couches par le flux d'eau (figure 7.5e). Les deux équations faisant référence au flux d'eau et au temps de transport vertical sont les suivantes :

$$q_v = K_v i_v \quad \text{Équation 7.1}$$

$$t_v = \frac{b}{q_v} \quad \text{Équation 7.2}$$

où q_v est le flux vertical par surface unitaire, K_v la conductivité hydraulique verticale, i_v le gradient hydraulique vertical, t_v le temps de transport requis pour que l'eau s'écoulant verticalement atteigne l'aquifère évalué et b l'épaisseur des couches recouvrant l'aquifère évalué.

Pour cette méthode, on peut appliquer l'équation à toute la séquence sédimentaire recouvrant le roc plutôt que de la restreindre à la zone située au-dessus de la surface piézométrique des aquifères rocheux fracturés. De cette façon, la vulnérabilité d'un point situé dans l'aquifère ou à sa limite



supérieure est évaluée. Les classes de vulnérabilité proposées pour la vulnérabilité relative sont basées sur le temps de transport estimé et adapté par *Geologic Sensitivity Project Workgroup* (1991) (tableau 7.1).

En résumé, les cartes de vulnérabilité intrinsèque indiquent la variabilité spatiale de la vulnérabilité relative des aquifères. Elles sont produites pour protéger les aquifères à l'échelle régionale et pour faire un aménagement du territoire en fonction de la vulnérabilité des aquifères présents.

7.2.2 Vulnérabilité spécifique

La vulnérabilité spécifique se rapporte aux propriétés hydrogéologiques de l'aquifère et à la nature des contaminants potentiels pouvant contaminer l'eau souterraine. À l'échelle locale, l'impact potentiel des activités humaines sur la qualité de l'eau souterraine reste la préoccupation et c'est la méthode d'évaluation de la vulnérabilité spécifique au type de contaminant potentiellement présent qui est utilisée. On peut par exemple évaluer le potentiel de contamination de l'eau souterraine par des hydrocarbures ou des sels déglacant dans l'aire d'alimentation d'un puits. Une méthode analytique appelée aussi modélisation numérique est alors utilisée. Cette méthode se rapporte aux équations mathématiques de base qui définissent l'écoulement de l'eau ou le transport des contaminants dissous dans l'eau. La méthode s'emploie à une échelle de 1 : 25 000 à 1 : 10 000 et nécessite une densité de points d'information de l'ordre de 4 à 100 informations par km². Les cartes de vulnérabilité spécifique nécessitent plus de détails quant au territoire, aux activités humaines potentiellement contaminantes présentes et futures et aux propriétés physiques, chimiques et toxicologiques des contaminants potentiels. Des SIG (systèmes d'information géographique) sont souvent utilisés pour visualiser sur la carte les valeurs ou les intervalles de valeurs de vulnérabilité spécifique calculés par la méthode numérique ou analytique. Les méthodes EVARISK (INRS-Eau, 1998) et PESTAN (USEPA, 1987) sont deux exemples de méthodes analytiques qui existent pour évaluer la vulnérabilité spécifique d'un aquifère aux pesticides.

La complexité de l'élaboration des cartes de vulnérabilité exige le recours à un spécialiste en hydrogéologie. De plus, dans le cadre d'un programme d'aménagement du territoire, il est recommandé qu'une étude de vulnérabilité spécifique soit appliquée à la suite d'une évaluation de la vulnérabilité intrinsèque afin d'aider à localiser l'implantation d'une activité humaine potentiellement polluante, de statuer sur les conséquences de l'implantation de cette activité ou d'élaborer des moyens pour réduire les risques de contamination.

7.2.3 Évaluation du risque de contamination de l'eau souterraine d'un territoire

L'évaluation des risques de contamination de l'eau souterraine dans un territoire donné peut être effectuée de deux façons : la première consiste à superposer les activités humaines et les sources potentielles de contamination sur une carte de vulnérabilité intrinsèque et la seconde se fait en évaluant directement la vulnérabilité spécifique aux contaminants potentiels présents qui sont liés aux activités humaines localisées dans la zone étudiée. Dans le premier cas, les activités à risque et les sources potentielles de contamination sont répertoriées et localisées sur une carte. Une source ponctuelle, linéaire ou diffuse est représentée respectivement sur la carte par un point, une ligne ou une surface. Ensuite, un indice est attribué aux contaminants potentiels. Cet indice est fonction des caractéristiques du contaminant (toxicité, capacité d'atténuation, etc.), du volume déversé, de la mobilité et des impacts potentiels sur le milieu récepteur (Civita, 1985). Ainsi, l'indice affecté à l'activité couplé à l'indice de vulnérabilité intrinsèque permet d'établir un indice de risque. Les zones du territoire à risque faible, moyen ou élevé peuvent être mises en évidence et un programme spécial de gestion du territoire peut alors être élaboré.

7.3 Périmètres de protection

La détermination des aires de protection autour des ouvrages de captage sert à protéger l'aquifère à l'échelle locale. Une aire de protection (ADP) se définit comme le territoire qui comprend la surface et la sous-surface autour d'un ou de plusieurs ouvrages de captage (puits ou sources) et à l'intérieur duquel des contaminants peuvent migrer et éventuellement contaminer le ou les ouvrages de captage (figure 7.6). La détermination des ADP constitue une des étapes importantes d'un programme de protection des eaux dans les ouvrages de captage (USEPA, 1993a). Le programme de protection devrait comprendre la formation d'un comité de protection, la détermination des ADP, l'évaluation des risques de contamination et la gestion des ADP. Pour les aménagistes, l'ADP définit un territoire où les activités humaines susceptibles de contaminer les eaux souterraines doivent être gérées ou interdites. Le niveau d'intervention dépend du risque de contamination (type de contaminant et temps de transport du contaminant) du captage. Les prochains paragraphes décrivent de façon succincte les quatre étapes du programme de protection. Pour une description plus détaillée d'un programme de protection des eaux souterraines, le lecteur peut consulter les ouvrages de USEPA (1993a) et de Paradis (1999).

7.3.1 Formation d'un comité de protection

Le comité de protection des eaux souterraines définit les objectifs du programme de protection. Il est aussi responsable de la mise en œuvre des trois autres étapes du programme de protection. Il doit se composer de membres des différents groupes d'intérêts pouvant être touchés par le programme de protection (ex. : urbanistes, conseillers municipaux, citoyens, industrie, représentants d'agences gouvernementales, etc.).

7.3.2 Détermination des aires de protection

Au cours des dernières années, les ADP ont été établies de façon volontaire par les municipalités et les entreprises privées. Il est maintenant requis de les évaluer autour des anciens et des nouveaux captages municipaux ou privés (eaux embouteillées, pisciculture, etc.) dont le débit d'exploitation excède 75 m³/jour. Le MEF (1995) définit trois PDP distincts. D'abord, une **aire immédiate** correspondant à une zone ayant un rayon de 30 m autour de l'ouvrage de captage vise à protéger l'ouvrage et ses équipements. Aucune activité humaine n'est autorisée dans ce périmètre à part l'entretien des équipements. Ensuite, il y a une **aire rapprochée** qui correspond à un temps de transport de 60 jours ou à une distance minimale de 100 m entre l'ouvrage de captage et un point de la surface de la nappe dans l'aire d'alimentation de l'ouvrage de captage. Ce périmètre vise à protéger le captage contre les sources de contamination bactérienne ou virale. Des activités présentant un très faible risque de contamination de l'eau sont tolérées (ex. : construction et entretien de voies publiques). Enfin, l'**aire éloignée** correspond à l'aire d'alimentation de l'ouvrage de captage et vise à protéger ce dernier contre les substances polluantes persistantes. Dans le cas où le périmètre éloigné est très étendu, l'aire d'alimentation peut être remplacée par un temps de transport de 20 ans entre l'ouvrage de captage et un point de la surface de la nappe dans l'aire d'alimentation. Dans cette aire, les activités présentant un risque de contamination de l'eau sont interdites (ex. : site d'enfouissement, raffinerie, entreposage de produits pétroliers, etc.). Pour obtenir la liste des restrictions d'usage du sol dans les différents périmètres, il faut consulter le document du MEF (1995) sur l'évaluation des périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau souterraine.

Dans le cas des terrains argileux où les aquifères sont très bien protégés, les aires rapprochées et éloignées servent à gérer les points d'entrée d'eau à la nappe (puits existants). Il est fortement recommandé de colmater tous les puits abandonnés. Plusieurs méthodes existent pour évaluer les ADP et elles diffèrent tant par leur degré de complexité d'application que par leur coût. Une méthode se doit d'être précise pour intégrer les caractéristiques hydrauliques de la région étudiée. De plus, elle doit être relativement facile d'application et à coût raisonnable. La méthode idéale est celle qui a la capacité de simplifier le système d'écoulement tout en préservant ses caractéristiques

géologiques et hydrogéologiques (Bair et Roadcap, 1992). À l'aide d'une revue de la littérature (Bair et Roadcap, 1992; Marquis et Stewart, 1992; USEPA, 1991 et 1987; Paradis, 2000), sept méthodes ont été répertoriées pour une application dans le roc fracturé et elles varient de simples à complexes. Il s'agit des méthodes avec calculs simples (l'équation du cylindre, l'équation de l'écoulement uniforme et le calcul du temps de transport), de la cartographie hydrogéologique, de la méthode hybride, du modèle analytique CAPZONE et de la modélisation numérique avec MODFLOW/MODPATH (McDonald et Harbaugh, 1988). Les méthodes avec calculs simples impliquent l'utilisation d'équations analytiques simples, de bilans de masse et de méthodes empiriques. La cartographie hydrogéologique consiste quant à elle à tracer l'aire d'alimentation du captage au moyen de la carte piézométrique détaillée de la région du captage. Elle comporte la détermination des caractéristiques géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et géochimiques du secteur à l'étude. Concernant la méthode hybride, elle combine les méthodes avec calculs simples et la cartographie hydrogéologique. Le modèle analytique suppose pour sa part la résolution de systèmes d'équations analytiques et numériques d'écoulement et nécessite l'utilisation d'un ordinateur. Enfin, le modèle numérique effectue la résolution de systèmes d'équations numériques d'écoulement et nécessite aussi l'utilisation d'un ordinateur. Dans ce chapitre, nous ne décrivons pas chacune des méthodes de calcul des PDP. Le lecteur désirant en connaître davantage pourra se reporter aux travaux de Paradis (1999 et 2000), à ceux de Karanta (2002) et à ceux d'USEPA (1987). Les prochains paragraphes illustrent des exemples d'application de méthodes recommandées.

L'étude comparative des diverses méthodes de calcul pour établir l'aire de protection éloignée a démontré que la méthode par cartographie hydrogéologique est excellente, car elle tient compte des conditions de terrain (figure 7.7). Cette méthode est simple d'application, mais elle nécessite des travaux de terrain exhaustifs et des ressources financières pour construire une carte piézométrique représentative du milieu. La cartographie hydrogéologique détermine les caractéristiques physiques (fractures majeures, contacts géologiques, structures topographiques) qui correspondent à une limite de partage des eaux et les caractéristiques hydrologiques (rivières, lacs et canaux) qui contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine (USEPA, 1991). La figure 7.7 montre en rouge la zone de recharge qui doit être protégée. L'autre méthode qui détermine entièrement la zone à protéger est la méthode hybride. Pour l'aire rapprochée, la méthode par cartographie hydrogéologique peut être combinée avec l'équation de Darcy qui permet de tracer un arc de cercle correspondant à un temps de transport de 60 jours. La loi de Darcy (équation 7.3) décrivant la vitesse horizontale interstitielle peut être utilisée avec la relation temps de transport (t), distance (d) et vitesse (v), pour calculer les zones de transport au moyen du temps de transport (équation 7.4),

$$v = \frac{K i}{\eta} \quad \text{Équation 7.3}$$

$$d = v t \quad \text{Équation 7.4}$$

où K est la conductivité hydraulique horizontale et n, la porosité efficace. Lorsque le contexte hydrogéologique est simple et que les risques de contamination sont faibles, la détermination des périmètres éloigné et rapproché peut être calculée par la méthode hybride. Cette méthode définit une ellipse en surface autour du puits, qui est orientée selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine et qui englobe en tout (aire éloignée) ou en partie (aire rapprochée) l'aire d'alimentation du captage. La méthode hybride combine la méthode par calculs simples, un modèle analytique et la cartographie hydrogéologique. Elle dérive d'une méthode utilisée au Massachusetts (USEPA, 1987). La figure 7.8 illustre la façon dont l'ellipse qui définit le périmètre de protection est construite. La délimitation du périmètre par cette méthode se fait en cinq étapes (figure 7.8) :

1. détermination de la limite en aval par les équations d'écoulement uniforme, la loi de Darcy, Bear et Jacob et la cartographie hydrogéologique;
2. détermination de la limite en amont par les équations du temps de transport, la loi de Darcy, Bear et Jacob (pour le périmètre rapproché) et la cartographie hydrogéologique (pour le périmètre éloigné);

3. détermination de l'aire de protection totale par l'équation d'infiltration pour le périmètre éloigné et l'équation du cylindre pour le périmètre rapproché;
4. détermination de la direction de l'écoulement souterrain par l'utilisation de la cartographie hydrogéologique ou la mesure de niveau d'eau dans trois puits d'observation;
5. délimitation de l'aire de protection par une ellipse dont l'aire calculée à l'étape 3 est dessinée, l'un de ses axes étant orienté dans la direction de l'écoulement et les extrémités correspondant aux limites en aval (étape 1) et en amont (étape 2). Le tableau 7.2 indique les informations minimales requises pour appliquer cette méthode correctement.

La modélisation numérique est utilisée lorsque le contexte hydrogéologique est complexe. Cette méthode permet l'intégration des paramètres d'écoulement et de transport et aussi de prédire la forme des ADP dans le cas où plusieurs puits peuvent s'interférer. L'utilisation des modèles numériques pour déterminer les ADP se fait généralement en deux étapes (figure 7.9). La première étape consiste à calibrer le modèle numérique d'écoulement. Pour ce faire, il faut définir les limites, imposer les sollicitations et discrétiser le modèle par un maillage ou un réseau d'éléments. Ensuite, il faut imposer les propriétés hydrauliques de l'aquifère et calibrer le modèle par l'ajustement des paramètres avec des charges et des débits mesurés. La seconde étape consiste à calculer les ADP à l'aide d'un modèle numérique de transport ou d'un algorithme de traçage de particules utilisant le modèle numérique d'écoulement calibré précédemment. Cette seconde étape peut aussi être subdivisée : il s'agit d'abord d'imposer les paramètres de transport ou les particules, puis de tracer les lignes d'écoulement.

Étant donné qu'elle requiert un haut niveau de connaissance en sciences de la terre, la détermination des périmètres rapproché et éloigné doit être effectuée par un spécialiste en hydrogéologie. Pour une description complète de différentes méthodes de calcul des PDP, le lecteur peut consulter USEPA (1993b, 1991, 1987), Bair et Roadcap (1992), Marquis et Stewart (1992), Paradis (2000, 1999) et Bair et al. (1991).

7.3.3 Évaluation du risque de contamination dans les ADP

Après avoir établi les ADP, la prochaine étape consiste à évaluer le risque de contamination de l'eau souterraine à l'intérieur des différentes ADP. Cette tâche peut être effectuée en déterminant à l'intérieur des ADP les activités humaines et les sources potentielles de contamination de l'eau souterraine. La consultation de la carte d'utilisation du sol, des schémas d'aménagement des MRC ou des cartes de zonage municipal et des visites de terrain aide à l'identification des activités et des sources de contamination potentielles présentes. La recherche d'anciens registres ou des entretiens avec des résidents de longue date peut renseigner aussi sur les utilisations passées du sol. Cette partie du travail peut être faite par des volontaires qui ont reçu une formation sur l'eau souterraine, les contaminants et la façon de faire l'inventaire des activités polluantes. Les activités ou les sources de contamination potentielle doivent ensuite être décrites et indiquées sur une carte qui montre également les limites des ADP. L'évaluation du risque de contamination doit être faite par un spécialiste en hydrogéologie. Le risque pourra être évalué par une méthode qualitative basée sur l'appréciation de trois critères : la nature de l'activité ou de la source de contamination, la vulnérabilité de l'aquifère intrinsèque, et le temps de transport ou la distance entre l'activité ou la source et l'ouvrage de captage. Une carte de risque est préparée en superposant les valeurs de risque relatif associées à chacune des activités ou des sources sur la carte illustrant les différentes ADP.

7.3.4 Gestion des ADP

Les ADP concernent un usage du sol qui doit être intégré dans les schémas d'aménagement des MRC. Des restrictions d'usage doivent y être imposées comme elles ont été proposées par le MENVO (MEF, 1995). Il existe également différentes stratégies de gestion des ADP qui peuvent être employées par les membres du comité de protection pour diminuer le risque de contamination dans les ADP. Parmi ces stratégies, notons l'acquisition ou l'échange de terrains contenus à l'in-



térieur des ADP, des ententes à l'amiable de restriction d'utilisation des sols et l'adoption de règlements municipaux. D'autres mesures de gestion peuvent aussi être mises en place pour assurer la protection des ouvrages de captage comme l'éducation du public, la conservation de l'eau souterraine (consommation réduite) ainsi que la confection d'une ceinture d'alerte entre une activité ou une source polluante qui ne peut être éliminée et l'ouvrage de captage. Il est également recommandé de procéder à des inspections périodiques des terrains dans les différentes aires de protection pour vérifier le vandalisme, le respect de l'utilisation du sol, les déversements et les différentes sources potentielles de contamination.

Le comité du programme de protection des eaux souterraines a également le mandat de mettre sur pied un plan d'approvisionnement à court et long terme. Ce plan devrait prévoir l'accès immédiat à une autre source d'approvisionnement en eau en cas de pénurie d'eau, de bris d'aqueduc ou de l'abandon d'un puits causé par son vieillissement ou sa contamination. Le plan devra aussi prévoir à plus long terme les besoins de prospection en eau et la construction des infrastructures nécessaires pour faire face à la demande future en eau.

7.3.5 Qualité, quantité et exploitabilité

Les chapitres 4 et 5 présentent des informations sur la quantité et la qualité des eaux souterraines et sur les modes de représentation de ces résultats. La présente section a comme objectif de combiner certains résultats de ces deux chapitres pour produire une carte d'approvisionnement (figure 7.10). Cette carte est très utile pour les aménagistes et les spécialistes en hydrogéologie, car elle indique les utilisateurs principaux de l'eau souterraine grâce aux débits prélevés ainsi que la variabilité spatiale de la qualité et des débits potentiels, mettant ainsi en évidence des cibles de prospection pour l'exploitation de la ressource. Elle permet donc de donner un ordre de grandeur préliminaire des débits exploitables dans la région d'étude et de juger la qualité de la ressource. Par contre, des études locales sont nécessaires pour estimer la valeur réelle de la ressource en eau.

La figure 7.10 est un exemple de carte d'approvisionnement mise au point pour la région du sud-ouest du Québec. Cette carte permet entre autres de découvrir des cibles pour l'exploration de l'eau souterraine. Les cibles sont définies par une productivité apparente et une qualité relative de l'eau qui sont supérieures à la moyenne de la région. Dans la région, des cibles ont été décelées dans la partie est de la vallée de la Rivière-du-Nord, dans les municipalités de Saint-Janvier et Lachute ainsi que dans la partie ouest de la vallée de Saint-Hermas.

Un des objectifs poursuivis par certaines études hydrogéologique est de déterminer combien d'eau souterraine peut être extraite de l'aquifère sans nuire à la pérennité de l'aquifère. Pour répondre à cette question, il est nécessaire de définir le débit exploitable sécuritaire ou l'exploitabilité de l'aquifère (safe yield). La définition de cette notion a beaucoup évolué au cours du dernier siècle (Domenico et Schwartz, 1990) et les conditions nécessaires généralement retenues pour une extraction d'eau annuelle sécuritaire seraient de ne pas commettre les actions suivantes :

- (1) excéder la recharge moyenne annuelle;
- (2) rabattre la nappe à un niveau où le coût du pompage devient excessif (détérioration de l'avantage économique du pompage);
- (3) rabattre la nappe à un niveau qui permet l'intrusion d'eau indésirable;
- (4) diminuer de façon excessive le débit des cours d'eau (induit par l'infiltration d'eau à travers leur lit à la suite de pompage) de façon à ne pas avoir d'impact sur la vie aquatique ou sur les usagers des cours d'eau;
- (5) créer la subsidence des terrains (aux endroits où il pourrait y avoir un impact);
- (5) contrevenir à des droits existants sur l'eau.

Le débit exploitable sécuritaire est généralement valide pour une partie de l'aquifère. Il est déterminé par un spécialiste en hydrogéologie. En pratique, le débit sécuritaire d'exploitation n'a pas une



valeur unique ou constante, mais il varie dans le temps et dans l'espace. Cette valeur dépend entre autres de l'espacement et de la localisation des puits, et de leur influence sur la dynamique entre l'eau souterraine et les autres composantes du cycle hydrologique. Chaque bassin hydrologique, aquifère, région, groupe de puits ou puits possède son propre débit exploitable sécuritaire.

De façon plus théorique, l'exploitabilité d'un aquifère dépend de la manière dont les effets des extractions d'eau sont transmis dans l'aquifère et aussi des changements induits par les pompages dans la recharge et la décharge de l'aquifère naturel. En régime transitoire, le bilan en eau de la partie saturée de l'aquifère est

$$Q(t) = R(t) - D(t) + dS/dt \quad \text{Équation 7.5}$$

où $Q(t)$ est le taux total d'extraction d'eau souterraine, $R(t)$ le taux de recharge de l'aquifère, $D(t)$ le taux de décharge (résurgence) de l'aquifère et dS/dt le taux de changement dans l'emménagement de la zone saturée de l'aquifère.

Le débit exploitable sécuritaire optimal peut être fixé par des objectifs sociaux et économiques selon l'usage que l'on veut faire de l'eau (Freeze et Cherry, 1979). Il est possible que pour des considérations de coûts et de bénéfices présents et futurs, le débit exploitable optimal implique le minage de l'eau souterraine. Dans d'autres situations, le débit optimal peut représenter la conservation entière de l'eau souterraine d'un aquifère. Par contre, le plus souvent, l'exploitation de la ressource en eau souterraine se situe quelque part entre ces deux extrêmes. Le débit exploitable sécuritaire correspond au volume d'eau souterraine pouvant être extrait annuellement dans un aquifère sans avoir d'effets nuisibles sur l'écosystème (Walton, 1970; Alley *et al.*, 1999; Sophocleous, 2000; Rivera, 2001). Les prélèvements d'eau ne doivent pas causer d'effets irréversibles tels que de la subsidence, l'intrusion d'eau salée ou la détérioration de la qualité de l'eau.

La détermination du débit exploitable sécuritaire doit se faire au moyen des conditions existantes. Cependant, les conditions passées et futures doivent également être tenues en compte lors de l'estimation de ce débit. Les facteurs qui peuvent influencer l'estimation des prélèvements possibles dans un aquifère sont les suivants: la localisation des puits par rapport à la zone de recharge ou de résurgence, l'espacement entre les puits (des puits rapprochés entraînent des rabattements plus importants localement), le type d'aquifère (captif, semi-captif ou libre), la présence de source potentielle de pollution, un changement dans l'utilisation du sol (urbanisation, industrialisation), un changement économique, le changement de type de végétation et le changement dans l'usage de l'eau souterraine tel que l'irrigation pour un usage municipal ou industriel.

7.4 Aménagement du territoire

Les études de cartographie à l'échelle régionale donnent des renseignements à l'échelle régionale. Pour la résolution de problèmes à l'échelle locale telles l'exploration d'un puits municipal, l'étude d'un établissement d'activités potentiellement polluantes et autres, il faut des études hydrogéologiques supplémentaires à l'échelle locale. Les informations obtenues par la cartographie à l'échelle régionale devraient être incluses dans les schémas d'aménagement du territoire afin de tenir compte des conditions hydrogéologiques pour le développement d'activités humaines futures.

Figure 7.1 Hydrogramme de puits indiquant l'altitude de la surface piézométrique en fonction du temps (modifié de Thiboutot *et al.*, 2001).

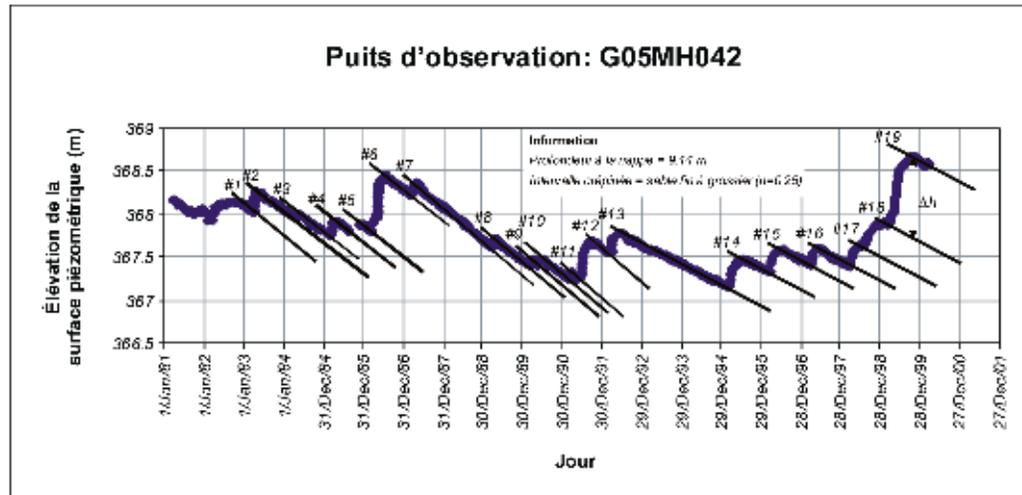


Figure 7.2 Hydrogramme de puits indiquant la recharge de la nappe aquifère observée au printemps.

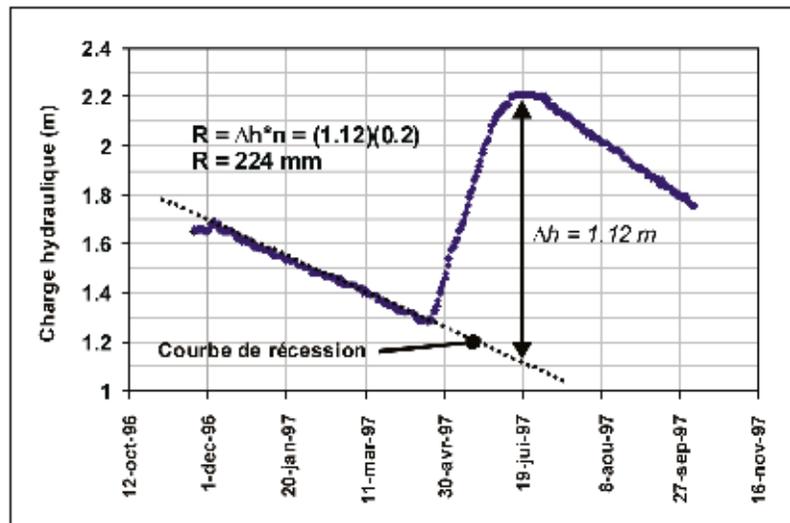


Figure 7.3 Paramètres utilisés pour évaluer la vulnérabilité avec la méthode DRASTIC.

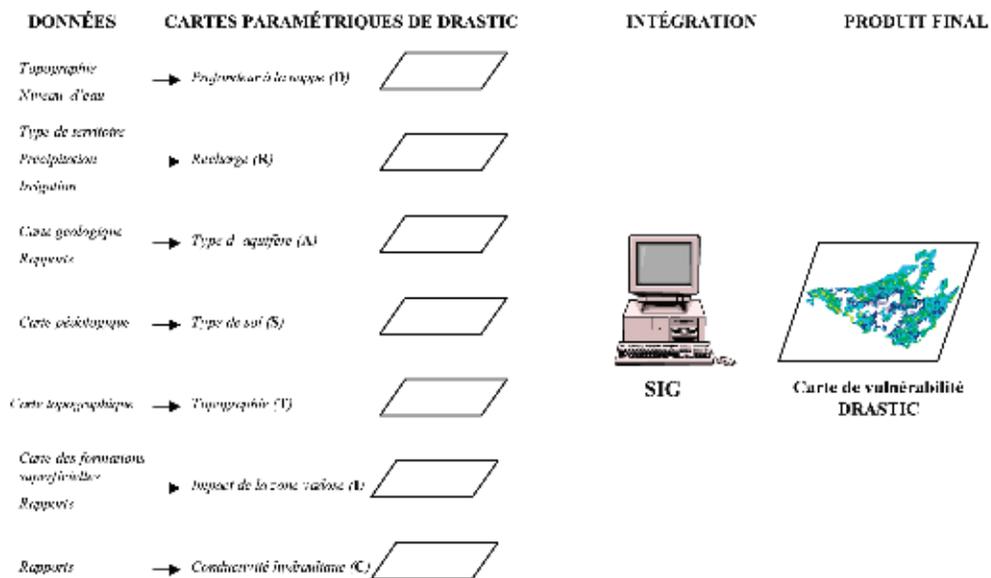


Figure 7.4 Exemple d'application de la méthode DRASTIC dans la région du sud-ouest du Québec. (tirée de Savard *et al.*, 2003).

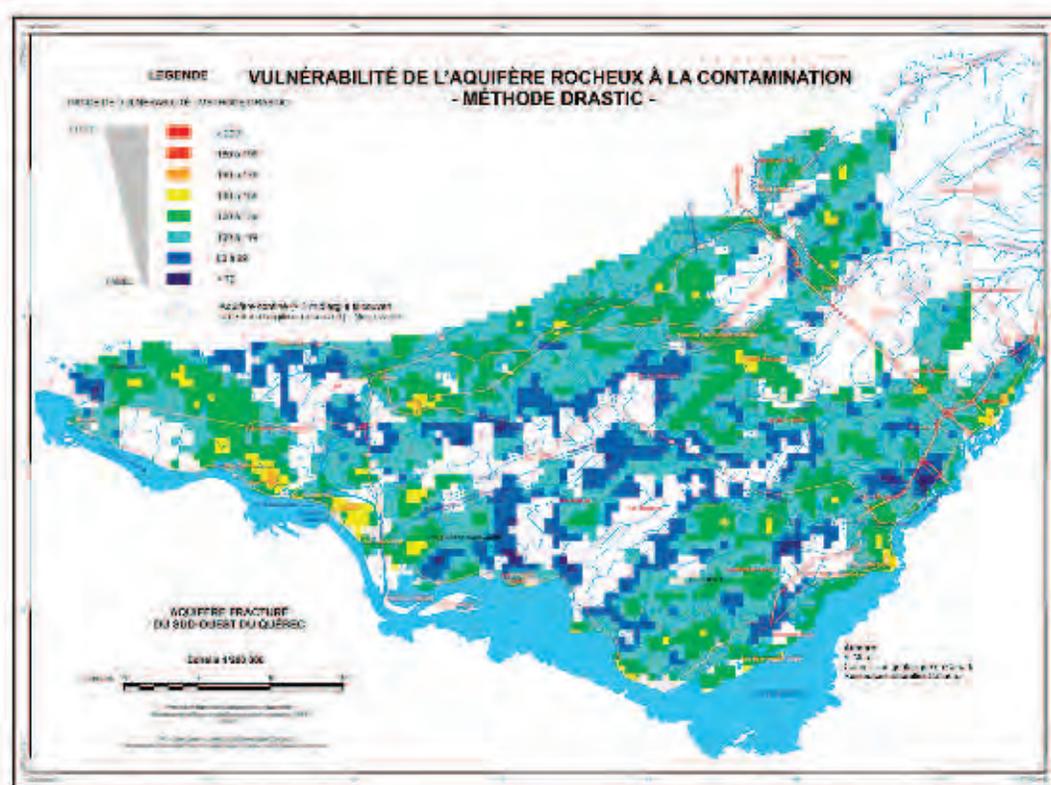


Figure 7.5 Représentation schématique de la conception du modèle géologique 3D et de l'application de la méthode de vulnérabilité utilisant ce modèle et le temps de transport (Modifié de Ross *et al.*, 2002).

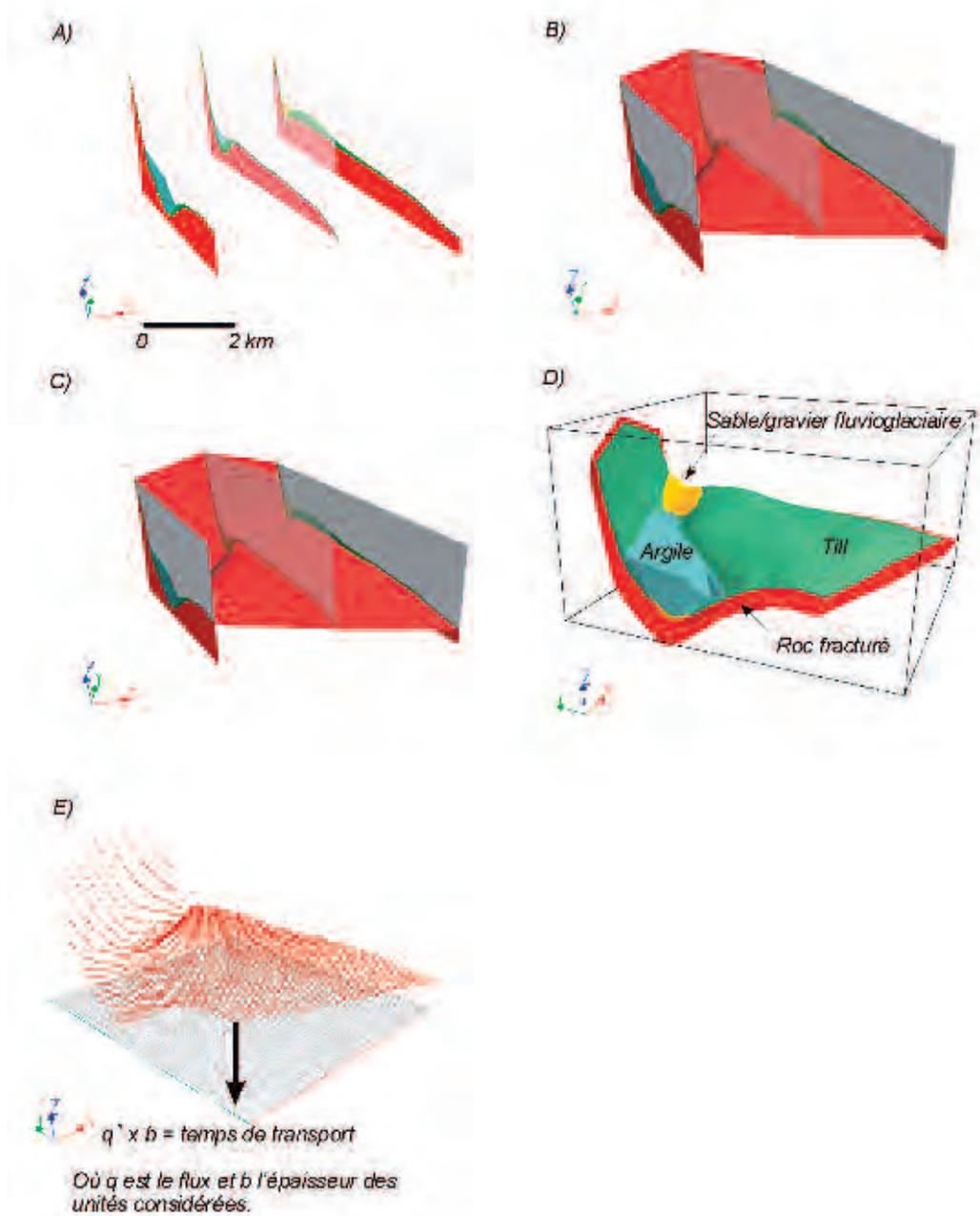


Figure 7.6 Représentation schématique d'une aire de protection à la surface du sol ainsi que sa projection à la surface de la nappe et à la base de l'aquifère.

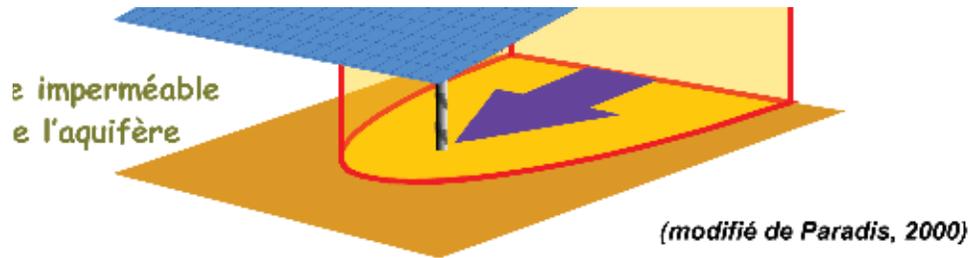


Figure 7.7 Aire d'alimentation évaluée par la méthode de la cartographie hydrogéologique, hybride, par l'équation de l'écoulement uniforme et par la modélisation numérique avec MODFLOW/MODPATH (tiré de Karanta, 2002).

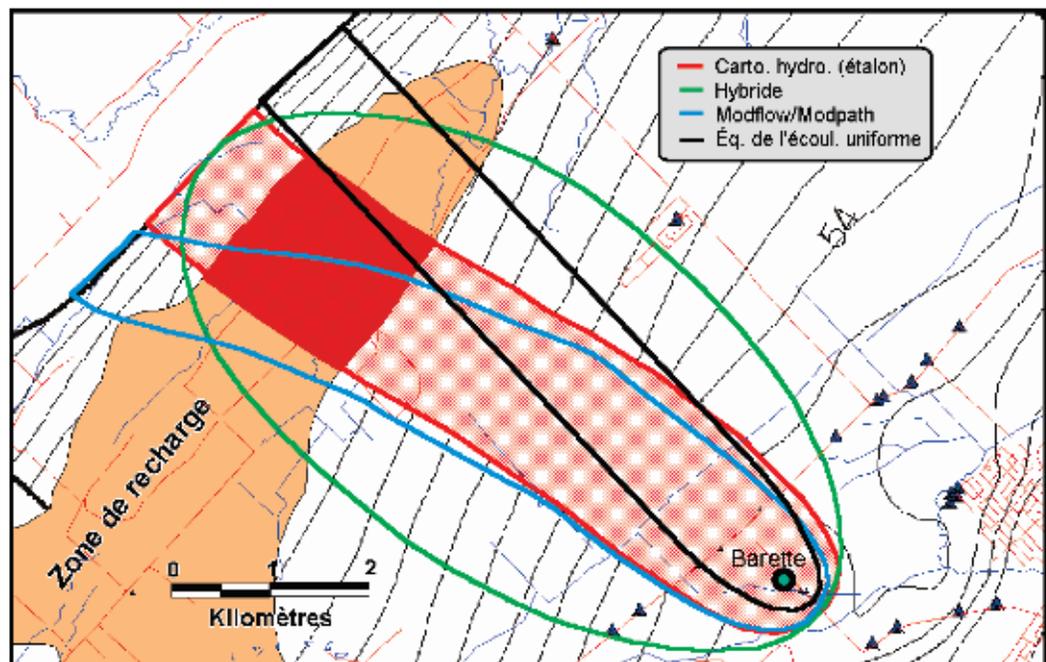


Figure 7.8 Détermination d'une aire de protection par la méthode 3A2E (tiré de Paradis 2000).

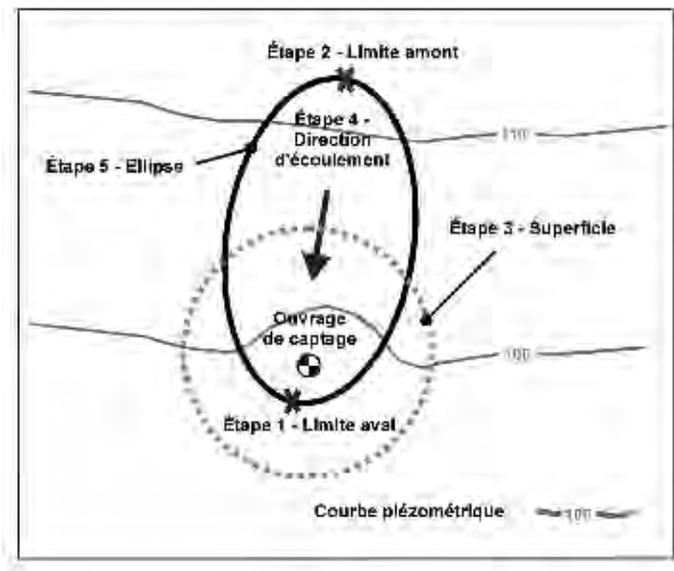


Figure 7.9 Détermination des ADP par la modélisation numérique (tiré de Paradis, 2000).

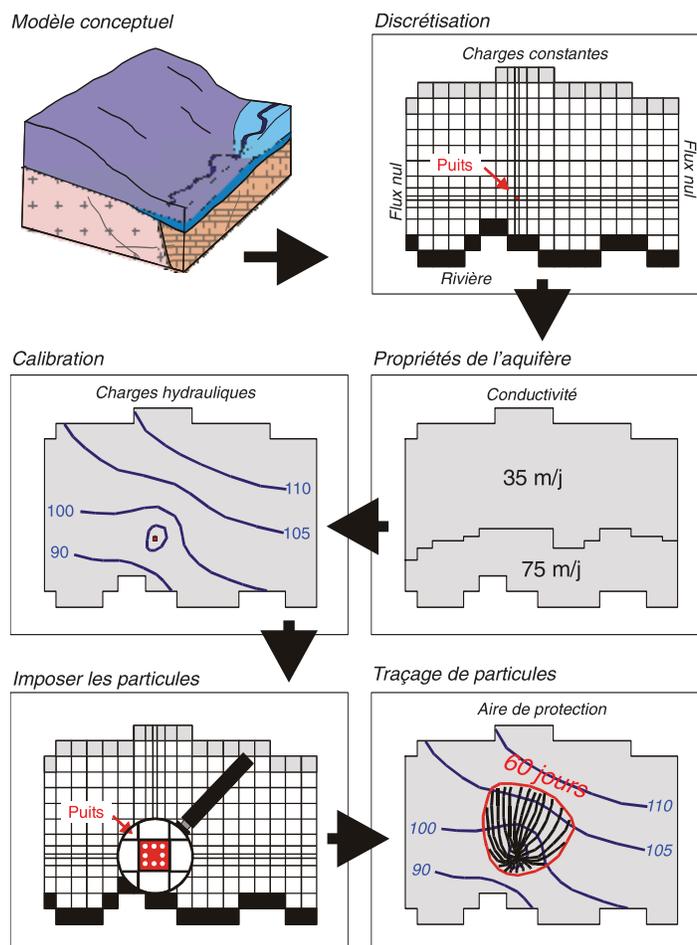


Figure 7.10

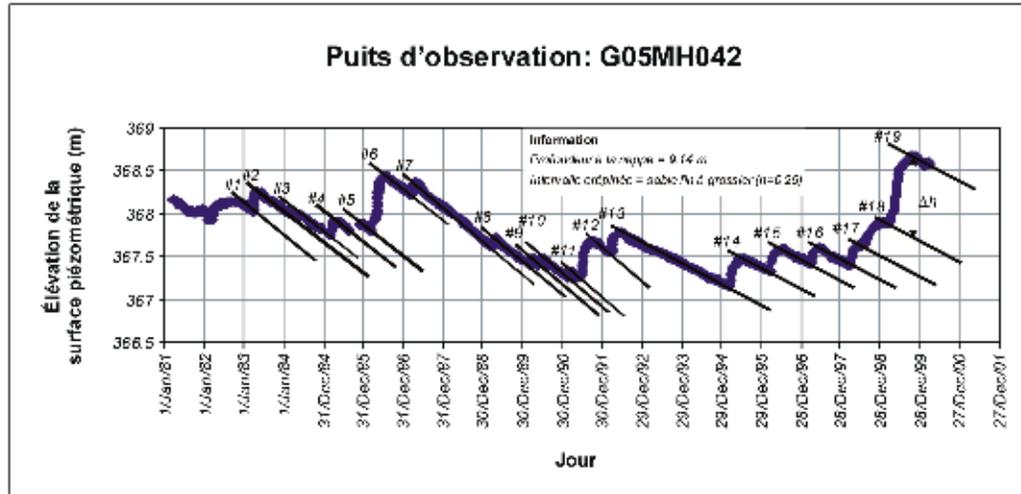


Tableau 7.1 Vulnérabilité associée au temps de transport vertical de l'eau avant d'atteindre la nappe phréatique.

VULNÉRABILITÉ	TEMPS DE TRANSPORT DE L'EAU S'ÉCOULANT VERTICALEMENT ET QUI EST REQUIS POUR ATTEINDRE L'AQUIFÈRE ÉVALUÉ
Très élevée	Quelques heures à quelques mois
Élevée	Quelques mois à quelques années
Modérée	Années à décennies
Faible	Plusieurs décennies à un siècle
Très faible	Plus d'un siècle

Tableau 7.2 Informations minimales nécessaires pour l'application de la méthode hybride (tableau tiré de Paradis, 2000).

PDP	PARAMÈTRE	NOTE
ÉLOIGNÉ ET RAPPROCHÉ	Débit d'exploitation	Mesuré directement aux puits.
	Conductivité hydraulique	Idéalement déterminée par un essai de pompage, sinon par des essais de perméabilité <i>in situ</i> .
	Épaisseur saturée	Déduite de l'analyse des journaux de forage ou par géophysique.
	Gradients hydrauliques et directions d'écoulement (régional et local)	Nécessite au moins 3 points de mesure pour chacun des gradients. Les points de mesure doivent être représentatifs de la surface du PDP à déterminer.
	Porosité efficace	Idéalement déterminée par un essai de pompage, sinon estimée à l'aide de la littérature ou d'essais en laboratoire.
ÉLOIGNÉ	Recharge	Estimée par un bilan hydrologique ou par l'analyse d'un hydrogramme de puits.

- ALLEY, W.M. 1993. *Regional Ground-Water Quality*, Chapter 2: Establishing a Conceptual Framework, U.S. Geological Survey, Alley Edition, 634 p.
- ANDERSON, M.P. and W.W. WOESSNER. 1990. *Applied Groundwater Modeling : Simulation of Flow and Advective Transport*, Harcourt Brace & Company, p. 381.
- ANON. 1970. *International Legend for Hydrogeological Maps*, UNESCO/IASH/IAH/Institut of Geol. Sciences, London, 101 p.
- ANON. 1983. *International Legend for Hydrogeological Maps*, Revised Edition, UNESCO Techn. Document, SC-84/WS/7, Paris, 51 p.
- APPELO, C.A.J. and D. POSTMA. 1993. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, Balkema Edition, 536 p.
- ARAVENA, R., M.L. EVANS and J.A. CHERRY. 1993. « Stable Isotopes of Oxygen and Nitrogen in Source Identification of Nitrate from Septic Systems », *Groundwater*, vol. 31, p. 180-186.
- ASTM. 1999. *Standards on Determining Subsurface Hydraulic Properties and Ground Water Modeling*, ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, 336 p.
- ATTENDORN, H.-G. and R.N. BOWEN (editors). 1997. *Radioactive and Stable Isotope Geology*, Chapman & Hall Publishers, London, New York, 522 p.
- BAIR, E.S. and G.S. ROADCAP. 1992. « Comparison of Flow Models used to Delineate Capture Zones of Wells : Leaky-Confined Fractured-Carbonate Aquifer », *Groundwater*, vol. 30, March-April, p. 199-211.
- BAIR, E.S., A.E. SPRINGER and G.S. ROADCAP. 1991. « Delineation of Traveltime-Related Capture Areas of Wells Using Analytical Flow Models and Particle-Tracking Analysis », *Groundwater*, vol. 29, May-June, p. 387-397.
- BERGERON, M. 1993. *Vocabulaire de la géomatique : terminologie technique et industrielle, vocabulaire anglais-français*, Québec, Les Publications du Québec, 41 p.
- BLATT, H. 1922. *Sedimentary Petrology*, First Edition, W.H. Freeman and Company, 563 p.
- BOIES, M. 2001. *DGMEau, module informatique permettant la réalisation de diagrammes radiaux et de Stiff à partir du logiciel de cartographie MapInfo*, Commission géologique du Canada.
- BOISVERT, É. et Y. MICHAUD. 1998. *Gestion des données de forage à l'aide d'une approche topologique : application au projet de cartographie hydrogéologique du piémont laurentien*, Québec, Recherches en cours 1998-E, Commission géologique du Canada, p. 117-124.
- BOISVERT, É. et Y. MICHAUD. 1999. GIMS – *Geoenvironmental Information Management System*, Americana Meeting, Montréal, 24-26 mars, Sommaire exécutif, p. 365-366.
- BRADBURY, K.R. and E.R. ROTHSCHILD. 1985. « A Computerized Technique for Estimating the Hydraulic Conductivity of Aquifers from Specific Capacity Test Data », *Groundwater*, vol. 23, p. 240-246.
- CAUSSE, C. et F. GASSE (éditeurs). 1998. *Hydrologie et géochimie isotopique – Hydrology and Isotope Geochemistry*, Publications issues du Symposium international à la mémoire de Jean-Charles Fontes, Éditions de l'Orstom, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, collection Colloques et Séminaires, 305 p.
- CCME – Conseil canadien des ministres de l'Environnement. 1999. *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, Sommaire des recommandations canadiennes existantes pour la qualité de l'environnement, tableau sommaire, 13 p.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC. 2000. *Modes de prélèvement et de conservation des échantillons relatifs à l'application du Règlement sur la qualité de l'eau potable*, DR-09-03, Envirodoq ENV/2000/0534, 10 p.

- 
- CHAPUIS, R.P. 1999. *Guide des essais de pompage et leurs interprétations*, Ministère de l'Environnement du Québec, Les Publications du Québec, Québec, p. 156.
- CHOQUETTE, P.W. and L.C. PRAY. 1970. « Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates », *AAPG Bulletin*, vol. 54, no 2, p. 207-250.
- CIVITA, M.V. 1995. *A Methodology for Delineation and Design of Spring Protection Area System*, XXVI International Congress of International Association of Hydrogeologists (Edmonton, Alberta, Canada, June 4-10), International Association of Hydrogeologists, Sec. A, Mémoire n° 3.
- CLARK, I. and P. FRITZ. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, Lewis Publishers, Boca Raton, New York, 328 p.
- CLOUTIER, V., É. BOURQUE, R. LEFEBVRE, M.M. SAVARD, M. NASTEV et R. MARTEL. 2000. *Regional Hydrogeochemical Characterisation of Groundwater in Fractured Aquifers of the St. Lawrence Lowlands*, 53^e Conférence canadienne de géotechnique, Montréal, p. 3-10.
- CLOUTIER, V., É. BOURQUE, R. LEFEBVRE, M.M. SAVARD, M. NASTEV, R. MARTEL et R. THERRIEN. 2001. « Regional Groundwater Hydrogeochemistry of Fractured Rock Aquifers in South-Western Quebec », *Proceedings of the 2nd Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference*, 54^e Conférence canadienne de géotechnique, 16-19 septembre, Calgary, Canada, p. 1068-1076.
- DAVIS, J.C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*, John Wiley and Sons Inc., 2nd Edition, New York, 656 p.
- DOMENICO, P.A. and F.W. SCHWARTZ. 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley and Sons Inc., New York, 824 p.
- DUPOUIT, J. 1863. *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*, 2^e édition, Dunot, Paris, 304 p.
- EARTHWORKS. 2003. *DownHole Explorer*, version 2.1 [Logiciel].
- ENCOM. 2001. *Discover*, version 3.0 [Logiciel].
- EPA – Environmental Protection Agency. 2001. *National Primary Drinking Water Standards*, Office of Groundwater, United States, EPA 816-F-01-007, www.epa.gov/safewater, 4 p.
- EPA – Environmental Protection Agency. 1994. *Handbook: Ground Water and Wellhead Protection*, Office of Water, Washington, DC, EPA/625/R-94/001, 269 p.
- EPA – Environmental Protection Agency. 1993a. *Wellhead Protection: A guide for Small Communities*, Office of Water, Washington, DC, EPA/625/R-93/002, 156 p.
- EPA – Environmental Protection Agency. 1993b. *Wellhead Protection in Confined, Semi-Confined, Fractured and Karst Aquifer Settings*, Office of Water, Washington, DC, EPA813K93001, 100 p.
- EPA – Environmental Protection Agency. 1991. *Delineation of Wellhead Protection Areas in Fractured Rocks*, Office of Groundwater, United States, Washington, DC, EPA 570/9-91-009, 144 p.
- EPA – Environmental Protection Agency. 1987. *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas*, Office of Groundwater Protection, Washington, DC, EPA-440/5-93-001, 121 p.
- FETTER, C.W. 1980. *Applied Hydrogeology*, Charles E. Merrill Publishing Company, Toronto, p. 488.
- FOSTER, S. et R. HIRATA. 1991. *Groundwater Pollution Risk Assessment, a Methodology Using Available Data*, CEPIS, Rapport technique, Lima, Pérou, 2^e édition, 73 p.
- FREEZE, R.A. and J.A. CHERRY. 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, p. 603.

- 
- FRIEDMAN, G.M., J.E. SANDERS and D.C. KOPASKA-MERKEL. 1992. *Principles of Sedimentary Deposits*, Macmillan, New York, 717 p.
- GENETIER, B. 1997. *La pratique des pompages d'essai en hydrogéologie. Manuels et méthodes*, édition BRGM, Orléans, France, p. 132.
- GIROUX, I. 1995. *Contamination de l'eau souterraine par les pesticides et les nitrates dans les régions de culture de pommes de terre: campagnes d'échantillonnage 1991-1992-1993*, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 61 p.
- GIROUX, I. 1994. *Contamination de l'eau souterraine par l'aldicarbe dans les régions de culture intensive de pommes de terre: revue des différentes activités d'échantillonnage réalisées de 1980 à 1991*, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 98 p.
- GIROUX, I. et C. MORIN. 1992. *Contamination du milieu aquatique et des eaux souterraines par les pesticides au Québec: revue des différentes activités d'échantillonnage réalisées de 1980 à 1991*, Ministère de l'Environnement du Québec. 74 p.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC. 2001. *Règlement sur la qualité de l'eau potable*, Q 2, r.4.1, Éditeur officiel, 7 p.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC. 1997. *L'eau potable au Québec, un second bilan de sa qualité*, Ministère de l'Environnement du Québec, Envirodoq EN970118, 36 p.
- HAMEL, A., R. THERRIEN et P.J. GÉLINAS. 2001. « Groundwater Recharge of Fractured Rock Aquifers in Southwestern Québec », *Proceedings of the 2nd Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference*, 54^e Conférence canadienne de géotechnique, Calgary, Canada, p. 1078-1083.
- HEM, J.D. 1989. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*, U.S. Geological Survey, Paper 2254, United States Government Printing Office, 263 p.
- HOULSBY, A.C. 1976. « Routine Interpretation of the Lugeon Water-Test », *Journal of Engineering Geology*, vol. 9, p. 303-313.
- HOUNSLOW, A.W. 1995. *Water Quality Data-Analysis and Interpretation*, Lewis Publisher, 397 p.
- HSIEH, P.A. 1998. *Scale Effects in Fluid Flow through Fractured Geologic Media. Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology*, Editeur Sposito G., Cambridge University Press, p. 335-353.
- ISAAKS, E.H. and R.M. SRIVASTAVA. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*, New York, Oxford University Press, 561 p.
- KARANTA, G. 2002. *Étude comparative de méthodes de détermination de périmètres de protection autour des ouvrages de captage dans les aquifères fracturés du sud-ouest du Québec*, Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, 138 p.
- KARANTA, G., R. MARTEL, M. NASTEV, R. THERRIEN, D. PARADIS et R. LEFEBVRE. 2001. « Comparative Study of Methods for Wellhead Protection Area Delineation in Fractured Rocks », *Volume of Proceedings*, 54^e Conférence canadienne de géotechnique, Calgary, Canada, p. 8 (version CD-ROM).
- KARKLINS, S. 1996. *Groundwater Sampling Reference Desk*, PUBL-DG-037 96, Wisconsin Department of Natural Resources, Bureau of Drinking Water and Groundwater, 96 p.
- KENDALL, C. 1998. « Tracing Nitrogen Sources and Cycling in Catchments », Kendall, C. and J.J. McDonnell (editors), *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, First Edition, Elsevier, Chapter 16, p. 519-576.
- KENDALL, C. and J.J. McDONNELL (editors). 1998. *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, First Edition, Elsevier, 839 p.
- KITANIDIS, P.K. 1997. *Introduction to Geostatistics*, Cambridge University Press, 247 p.

- 
- KRAEMER, T.F. and D.P. GENEREUX. 1998. « Applications of Uranium and Thorium Series Radionuclides in Catchment Hydrology Studies », Kendall, C. and J.J. McDonnell (editors), *Isotope tracers in catchment Hydrology*, First Edition, Elsevier, Chapter 20, p. 679-722.
- KROUSE, H.R. and V.A. GRINENKO (editors). 1991. *Stable Isotopes: Natural and Anthropogenic Sulphur in the Environment*, SCOPE 43, John Wiley & Sons, 440 p.
- KRUSEMAN, G.P. and N.A. DeRIDDER. 1990. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Publication 47, Wageningen, Pays-Bas, p. 377.
- LAUZON, E.P. et R. DUQUETTE. 1996. *Topométrie générale*, 3^e édition, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 652 p.
- LEFEBVRE, R., Y. MICHAUD, R. MARTEL et N. FAGNAN. 1999. *La cartographie hydrogéologique régionale : un outil essentiel à l'inventaire des ressources en eaux souterraines*, Mémoire du Centre géoscientifique de Québec présenté au Bureau d'audiences publiques sur l'environnement dans le cadre de la consultation publique sur la gestion de l'eau au Québec, Octobre, 22 pages + annexes.
- LEMIEUX, J.-M., D. KIRKWOOD and R. THERRIEN. 2001. « Detailed Hydrogeological Study of a Fractured Dolostone », *Proceedings of the Fractured Rock 2001*, Toronto, Canada, Mars 26-28.
- LEPAGE, N. 1996. *Analyse de la base de données hydrostratigraphiques du projet Portneuf*,
- LERNER, D.N., A.S. ISSAR and I. SIMMERS. 1990. « Groundwater Recharge: A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge », Series Editorial board E. Groba, M.R. Llamas, J. Margat, J.E. Moore, I. Simmers, *International Association of Hydrogeologists, International contribution to hydrogeology*, vol. 8, Verlag Heinz Heise Hannover, West Germany, 345 p.
- LLAMAS, J. 1985. *Hydrologie générale : principes et applications*, Gaëtan Morin éditeur, 550 p.
- MARQUIS, S.A. and E. STEWART. 1992. *The Delineation of Wellhead Protection Areas in Fractured Bedrock Terrains Using Groundwater Flow Models*, McLaren/Hart Environmental Engineering, California, p. 327-341.
- McDONALD, M.G. and A.W. HARBAUG. 1988. *A Modular three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*, U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigation, Book 6, Chapter A1, 586 p.
- McNEELY, R.N. and V.P. NEIMANIS. 1978. *Water Quality Interpretive Report, Prince Edward Island, 1961-1973*, Water Quality Interpretive Report n° 1, Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Ottawa, Canada.
- MICHAUD, Y. et R. LEFEBVRE (éditeurs). À paraître. *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires de surface*, préparé par le Centre géoscientifique de Québec pour le ministère de l'Environnement du Québec, Québec.
- MICHAUD, Y., R. LEFEBVRE et R. McCORMACK (éditeurs). À paraître. *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires de surface*, Ministère de l'Environnement du Québec.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE. 1995. *Les périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau souterraine*, Direction des politiques des secteurs agricole et naturel, Publication du Québec, Sainte-Foy (Québec), 53 p.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE. 1994. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales*, Cahier 1: Généralités, Éditions le Griffon d'argile, 63 p.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE. 1994. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales*, Cahier 3: Échantillonnage des eaux souterraines, Éditions le Griffon d'argile, 100 p.

- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE DU QUÉBEC ET MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC, ENVIRONNEMENT CANADA ET AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. 1996. *Pour une eau de qualité en milieu rural – comprendre et agir collectivement*, Envirodoq EN960135, 35 p.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE DU QUÉBEC ET MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DES SERVICES SOCIAUX DU QUÉBEC. 1995. *Aux propriétaires de puits – attention aux nitrates dans l'eau potable*, Dépliant, 1 page.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC. 2001. *L'eau du Québec, source de fierté, Règlement sur la qualité de l'eau potable, Règlement en bref*, 32 p.
- MOOK, W.G. (editor). 2001. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle – Principles and Applications*, UNESCO/IAEA series, <http://www.iaea.or.at/programmes/ripc/ih/volumes/volumes.h>
- NASTEV, M., M.M. SAVARD, P. LAPCEVIC, D. PARADIS, R. LEFEBVRE et R. MARTEL. 2001. « Investigation of Hydraulic Properties of Regional Fractured Rock Aquifers », *Proceedings of the 2nd Joint IAH-CGS Groundwater Conference*, 16-19 September, Calgary, vol. 2, p. 1058.
- NASTEV, M., F.G. LAPCEVIC, M. ÉTIENNE, M.M. VORALEC and M.M. SAVARD. 2000. « Hydraulic Characterization of Fractured Aquifers of St. Lawrence Lowlands in Southwestern Quebec », *Proceedings, Canadian Geotechnical Society-IAH Meeting*, Montreal, PQ, October 2000, p. 33-39.
- NORTHWOOD GEOSCIENCE. 1997. *BoreHole Mapper*, version 1.0 [Logiciel].
- NRC – National Research Council. 1996. *Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications*, National Academy Press, Washington, DC, p. 547.
- OMS – Organisation mondiale de la santé. 1993. *Guidelines for Drinking Water Quality*, vol. 1: Recommandations, 2nd Edition, Genève.
- OMS – Organisation mondiale de la santé. 1996. *Guidelines for Drinking Water Quality*, vol. 2: Health Criteria and Other Supporting Information, 2nd Edition, Genève.
- OSBORNE, P.S. 1993. *Suggested Operating Procedures for Aquifer Pumping Tests*, Ground Water Issue, EPA/540/S-93/503, p. 23.
- PARADIS, D. 1999. *Proposition d'un programme de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine*, Ministère de l'Environnement du Québec, Service des pesticides et des eaux souterraines, 52 p.
- PARADIS, D. 2000. *Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien*, Mémoire de maîtrise, Université du Québec (INRS-Géoressources), 138 p.
- RÉGIE RÉGIONALE DE LA SANTÉ ET DES SERVICES SOCIAUX DE L'ESTRIE. Direction de la santé publique, *Les puits domestiques et votre santé*, dépliant,
- RIVARD, C., Y. MICHAUD, C. DEBLONDE, V. BOISVERT, C. CARRIER, R.H. MORIN, T. CALVERT, A. RIVERA, D. CONOHAN, S. CASTONGUAY, H. VIGNEAULT, R. LEFEBVRE et M. PARENT (sous presse). *Canadian Groundwater Inventory: Hydrogeological Characterization of a Representative Area of the Maritimes Carboniferous Basin*, Bulletin de la CGC, 153 pages + 8 annexes.
- RIVERA, A. 2001. « The Groundwater Resources of Canada. A National Strategic Resource in Need of Management : Assessment of Sustainable Safe Yield », *Proceedings of the Geological and Mineralogical Associations of Canada GAC-MAC*, Saint-John, Newfoundland, May 27-30.

- 
- ROSS, M., M. PARENT, Y. MICHAUD, É. BOISVERT and F. GIRARD. 2001. « On the Construction of 3D Geological Models for Applications in Regional Hydrogeology in Complex Quaternary Terrains of Eastern Canada », R.C. Berg and L.H. Thorleifson (convenors), *Geological models for groundwater flow modeling*, Workshop Extended Abstracts, 35th Annual Meeting Geological Society of America, North-Central Section, Illinois, April 22, 2001, Open File Series 2001-1, p. 34-37.
- ROZANSKI, K., L. ARAGÚAS and R. GONFIANTINI. 1993. « Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation », P. Swart, K.C. Lohmann, J. McKenzie, S. Savin (editors), *Climate Change in Continental Isotopic Record*, Geophysical Monograph 78, p. 1-36.
- SALAMA, R.B., L. YE and J. BROWN. 1996. « Comparative Study of Methods of Preparing Hydraulic-Head Surfaces and the Introduction of Automated Hydrogeological-GIS Techniques », *Journal of Hydrology*, vol. 185, p. 1-4.
- SANTÉ CANADA. 1996. *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada*, 6^e édition, 102 p.
- SAVARD, M.M., M. NASTEV, R. LEFEBVRE, R. MARTEL, N. FAGNAN, E. BOURQUE, V. CLOUTIER, K. LAUZIÈRE, P. GÉLINAS, D. KIRKWOOD, P. LAPCEVIC, G. KARANTA, A. HAMEL, A. BOLDUC, M. ROSS, M. PARENT, J.-M. LEMIEUX, É. BOISVERT, O. SALAD HERSI, D. LAVOIE, F. GIRARD, K. NOVAKOWSKI, R. THERRIEN, M. ÉTIENNE and R. FORTIER. 2000. « Regional Hydrogeology of Fractured Rock Aquifers in Southwestern Quebec (St. Lawrence Lowlands) », *Proceedings of the 1st Joint IAH-CNC and GSC Groundwater Specialty Conference*, 53^e Canadian Geotechnical Conference, October 15-18, Montreal, session GW6, p. 247-253.
- SAVARD ET AUTRES. 2002. *Caractérisation hydrogéologique des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec*, Partie I: Hydrogéologie régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec, Commission géologique du Canada, Rapport final (révisé), 18 octobre 2002, 60 p.
- SHANLEY, J.B., E. PENDALL, C. KENDALL, L.R. STEVENS, R.L. MICHEL, P.J. PHILLIPS and others. 1998. « Isotopes as Indicators of Environmental Change », KENDALL, C. and J.J. McDONNELL (editors), *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, First Edition, Elsevier, Chapter 22, p. 761-816.
- SHERWOOD LOLLAR, B., G.F. SLATER, B. SLEEP, M. WITT, G. KLECKA, M. HARKNESS and J. SPIVACK. 2001. « Stable Carbon Isotope Evidence for Intrinsic Bioremediation of Tetrachloroethene (PCE) and Trichloroethene (TCE) at Area 6, Dover Air Force Base », *Environ. Sci. and Technol.*, vol. 35, p. 261-269.
- SIMARD, G. 1977. « Carbon 14 and Tritium Measurements of Groundwaters in the Eaton River Basin and in the Mirabel Area », Quebec, *Canadian Journal of Earth Science*, vol. 14, p. 2325-2338.
- SAVARD, Martine M. et autres, 2007. Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées, Québec.
- SIMARD, R. et R. DES ROSIERS. 1980. *Qualité des eaux souterraines du Québec*, Ministère de l'Environnement, Service des Eaux Souterraines du Québec, Gouvernement du Québec, 106 p.
- SOUS-COMITÉ FÉDÉRAL-PROVINCIAL SUR L'EAU POTABLE DU COMITÉ FÉDÉRAL-PROVINCIAL-TERRITORIAL DE L'HYGIÈNE DU MILIEU ET DU TRAVAIL. 2001. *Résumé des recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada*, mars 2001, 8 p.
- STRUCKMEIER, W.F. and J. MARGAT. 1995. « Hydrogeological Maps: A Guide and a Standard Legend », *International Association of Hydrogeologists (IAH)*, vol. 17, 177 p.
- THIBOUTOT, S., G. AMPLEMAN, R. MARTEL, D. PARADIS and R. LEFEBVRE. 2001. *Environmental Characterization of CFB Shilo Ranges and Training area (GATES closure)*. Defence Research Establishment Valcartier and INRS-Géoressources, Report 2001-02-03, 5 maps and 2 appendix, 63 p.

- 
- UNESCO. 1975. *Légendes des cartes hydrogéochimiques. Notes techniques en hydrologie, une contribution à la décennie hydrologique internationale*, 38 p.
- USGS – United States Geological Survey. 2000. *Investigating Groundwater Systems on Regional and National Scales*, Committee on USGS Water Resources Research, Water Science and Technology Board, National Research Council, p. 143.
- VRBA, J. and A. ZAPOROZEC. 1994. « Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability », *International Association of Hydrogeologists (IAH)*, vol. 16, 131 p.
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC. 1999. *AquaChem (Aqueous geochemical data analysis plotting and modeling)*, vol. 3.7, User's Manual, 184 p.
- ZEIGLER, T.W. 1976. *Determination of Rock Mass Permeability*, Tech. Rep. S-76-2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MI, AD-A021 192, p. 88.

Lectures suggérées

Pour obtenir des descriptions sommaires des paramètres physico-chimiques, voir Santé Canada (1996).

Pour connaître l'origine des différents éléments ou composés chimiques trouvés dans l'eau souterraine, on peut consulter les ouvrages de Hounslow (1995) ou de Hem (1989).

Pour connaître les concentrations de ces éléments dans les eaux souterraines du Québec, on peut consulter Simard et Des Rosiers (1980), les atlas géochimiques des eaux souterraines du ministère de l'Énergie et des Ressources et le gouvernement du Québec (1997).

Pour en savoir plus long sur la qualité de l'eau en milieu rural, on pourra consulter les ouvrages du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec et du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, d'Environnement Canada et Agriculture et Agroalimentaire Canada (1996), du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec et du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec (1995), de Giroux (1994 et 1995), de Giroux et Morin (1992), et de la Régie régionale de la santé et des services sociaux de l'Estrie (dépliant).

Les méthodes graphiques utiles à la représentation de résultats d'analyses physico-chimiques sont présentées en détail par Hem (1989), Alley (1993) et Hounslow (1995).

Pour en savoir plus sur les critères de qualité d'eau, consulter les publications du ministère de l'Environnement du Québec (2001), de EPA (2001) et de l'OMS (1993 et 1996).

Pour en savoir plus sur l'origine des nitrates décelés par la caractérisation isotopique, on peut lire Kendall et McDonnell (1998) ainsi qu'Aravena et ses collaborateurs (1993).

HYDRO-STRATIGRAPHIE

Aquifère

Formation géologique, ou ensemble de formations géologiques, saturée d'eau et suffisamment perméable pour être utilisée aux fins d'alimentation en eau potable.

Aquitard

Formation géologique peu perméable qui permet une circulation très lente de l'eau.

Aquiclude

Formation géologique très peu perméable qui ne permet pratiquement aucune circulation de l'eau.

Épaisseur saturée

L'épaisseur saturée de l'aquifère correspond à la portion de l'aquifère qui est complètement saturée en eau.

HYDRAULIQUE

Charge hydraulique

Représente le potentiel d'écoulement hydraulique et est défini par la somme de l'énergie potentielle d'élévation et de pression due à la hauteur de la colonne d'eau.

Rabattement

Abaissement de la charge hydraulique lors du pompage d'un ouvrage de captage. Des rabattements peuvent être mesurés dans un ouvrage de captage et/ou dans des puits d'observation et/ou dans des piézomètres.

Gradient hydraulique

Rapport de la différence de la charge hydraulique avec la distance entre deux points en milieu isotrope selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine.

Loi de Darcy

Loi empirique de l'écoulement souterrain qui stipule que le volume d'eau par unité de temps (débit d'écoulement) équivaut au produit de la conductivité hydraulique, de la section efficace d'écoulement et du gradient hydraulique.

Vitesse de l'écoulement

La vitesse d'écoulement de l'eau souterraine est défini par le ratio du produit de la conductivité hydraulique par le gradient hydraulique sur la porosité efficace.

Conductivité hydraulique

Taux d'écoulement gravitaire passant à travers une section unitaire perpendiculaire à la direction d'écoulement sous un gradient hydraulique unitaire à la température de l'eau souterraine.

Transmissivité

Volume d'eau traversant une tranche verticale de terrain de largeur unitaire et sur toute la hauteur saturée du milieu aquifère sous un gradient hydraulique unitaire à la température de l'eau souterraine.

Coefficient d'emménagement

Volume d'eau qu'un aquifère peut céder ou accepter par unité de surface par changement unitaire de la charge hydraulique.

Emménagement spécifique

Produit du coefficient d'emménagement par l'épaisseur saturée de l'aquifère plus la porosité effective. Dans le cas d'une nappe libre, le produit du coefficient d'emménagement par l'épaisseur saturée de l'aquifère peut être négligé par rapport à la porosité effective.

Capacité de drainage

Volume d'eau se drainant librement d'un volume unitaire de sol saturé par l'effet de la gravité.

Capacité de rétention

Volume d'eau retenu malgré la gravité dans un volume unitaire de sol.

Porosité

Mesure de l'espace interstitiel dans les roches, contrôle la quantité d'eau qui peut être emmagasinée dans un volume unitaire de roche.

Porosité primaire

Porosité formée lors de la déposition ou de la formation de la roche en place.

Porosité secondaire

Porosité résultant de l'action des agents géologiques (ex. action du gel et du dégel, forces tectoniques) sur le milieu et prenant naissance ultérieurement à la porosité primaire.

Porosité effective

Volume des vides interconnectés d'un sol ou d'une masse rocheuse qui peut drainer de l'eau par rapport au volume total de la masse considérée.

ISOTOPES

Isotope

« Isotope » vient des mots grecs *iso* et *topos* qui signifient respectivement *égal* et *place*. Deux isotopes d'un même élément ont donc le même comportement chimique ou sont chimiquement « égaux », et se situent à la même « place » dans le tableau périodique. Ils ont le même numéro atomique (nombre de protons) mais leur nombre de neutrons ainsi que le nombre de masse (proton + neutron) est différent (exemples: $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$ et $^{14}_6\text{C}$; ^1_1H , ^2_1H et ^3_1H). En d'autres termes, les isotopes d'un élément donné ont un comportement chimique globalement identique et ne se distinguent que par leur nombre de neutrons, i.e., par leur nombre de masse. Il existe des isotopes stables, radioactifs et radiogènes.

Isotope stable léger

On inclut en général dans cette catégorie les isotopes stables de H, C, N, O et S. C'est-à-dire tous les noyaux stables les plus répandus sur la planète, dont l'abondance dans les systèmes naturels est fonction de l'effet isotopique. Les isotopes de ces éléments légers montrent un rapport élevé de leur différence de masse sur la masse de l'isotope abondant (ou de la masse moyenne de l'élément d'intérêt) relativement aux isotopes d'éléments lourds (exemple $\Delta m/m = 1/12$ pour ^{13}C et ^{12}C comparativement à $1/86$ pour ^{87}Sr et ^{86}Sr). C'est cette différence de masse relativement élevée entre les isotopes stables d'un élément léger qui provoque une différence de comportement mécanique (\pm chimique) entraînant une variation notable de leur abondance pendant le déroulement de processus naturels- effet isotopique -, et permettant de mieux comprendre ces mêmes processus. Cette catégorie exclut donc en général les noyaux qui sont le produit de la radioactivité. La méthode d'analyse de ces isotopes est la spectrométrie de masse à source gazeuse et à rapport isotopique.

Isotopes radioactif et radiogène

Contrairement aux isotopes stables, cette catégorie d'isotopes montre une variation naturelle qui dépendra du temps. Les isotopes radioactifs ont un noyau instable dont la désintégration produit un isotope fils, une particule bêta, un neutrino et de l'énergie. Ainsi l'abondance des isotopes radioactifs et radiogènes varie en fonction du taux de désintégration de l'isotope radioactif (demi-vie) selon l'équation

$$D = D_0 + N (e^{-\lambda t} - 1),$$



où D est le nombre d'isotopes fils, D^0 est le nombre d'isotopes fils au point de départ, t est le temps écoulé depuis le départ, N le nombre d'atomes et L est la constante de désintégration de l'isotope parent instable. On dit d'un isotope fils généré par la désintégration d'un isotope parent radioactif qu'il est radiogène. Cet isotope nouvellement produit pourra être radioactif ou stable. Par exemple la désintégration de l'isotope ^{14}C ayant une demi-vie de 5730 années produit l'isotope stable ^{14}N , alors que la désintégration de l'isotope ^{238}U produit l'isotope instable ^{234}U , puis une série d'autres isotopes instables pour finalement produire le ^{206}Pb qui lui est stable.

PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

pH

Le pH est une mesure de l'activité de l'ion hydrogène. Les variations de pH sont dues aux interactions du sol et du roc avec le dioxyde de carbone et les ions carbonates et bicarbonates. On recommande que le pH de l'eau soit supérieur à 6,5 et inférieur à 8,5: un pH inférieur à 6,5 peut occasionner la dissolution de métaux des soudures de la tuyauterie alors qu'un pH supérieur à 8,5 favorise l'incrustation de carbonates de calcium ou magnésium principalement.

Alcalinité totale

L'alcalinité totale est une mesure des concentrations des ions HCO_3^- , CO_3^{2-} et OH^- et renseigne sur la capacité d'une eau à résister à des changements de pH lorsqu'un acide ou une base est ajouté. Aux pH habituellement mesurés pour des eaux souterraines, l'ion bicarbonate HCO_3^- est l'espèce dominante. Les sources des espèces carbonatées sont l'atmosphère, la réduction des sulfates, la calcite, la dolomite et beaucoup plus rarement la nahcolite (Hounslow, 1995).

Conductivité électrique

Ce paramètre est une mesure de la capacité à conduire le courant électrique. La présence d'ions chargés dans les eaux souterraines est la cause de leur conductivité électrique. La mesure indique de façon indirecte la concentration en matière dissoute totale (MDT) présente dans l'eau, les sels inorganiques dissous comptant pour une grande part des MDT. La conductivité est mesurée en microhoms par centimètre (microhoms/cm) ou microSiemens par centimètre (microS/cm). A 25 °C, la conductivité électrique de l'eau distillée est de 0,5 à 5, elle est de 5 à 30 pour l'eau de pluie, de 30 à 2000 pour l'eau souterraine potable et de 45 000 à 55 000 pour l'eau de mer (Simard et DesRosiers, 1980). La conductivité d'une eau est dite spécifique lorsqu'elle a été corrigée en fonction de sa température.

Matière dissoute totale (MDT)

Les concentrations en MDT (mg/L) peuvent être déterminées en laboratoire (résidu laissé après évaporation), calculées en additionnant les concentrations des différents ions mesurés dans l'eau et du SiO_2 , ou en multipliant la conductivité spécifique de l'eau (micromhos/cm) par un facteur variant entre 0,55 et 0,75; ce facteur dépend du type d'ions en présence. Les eaux pour lesquelles les anions bicarbonates et chlorures dominant auront un facteur plus près de la valeur inférieure de l'intervalle alors que les eaux riches en sulfates pourront atteindre et même dépasser la valeur supérieure de l'intervalle (Hem, 1989). On recommande que les MDT soient en concentration inférieure à 500 mg/L de façon à limiter les excès du point de vue de la dureté, du goût et des dépôts minéraux que les eaux très minéralisées laissent et de la corrosion qu'elles provoquent (Santé Canada, 1996).

Oxygène dissous

Les concentrations en oxygène dissous (O.D.) renseignent sur l'environnement, aérobie ou anaérobie, et peuvent être présentées en mg/L ou en % de saturation par rapport à la solubilité de l'oxygène dans l'eau. L'oxygène présent dans l'eau souterraine provient de la recharge et du mouvement de l'air dans le milieu non saturé. Cet oxygène réagit avec les matériaux oxydables (matière organique et minéraux inorganiques réduits principalement) rencontrés tout au long du cheminement de l'eau (HEM, 1989). L'O.D. diminue donc avec le temps de résidence de l'eau dans la formation géologique et peut être un indicateur de l'âge de l'eau.



Ions majeurs

Sodium et potassium

La source de sodium Na^+ dans l'eau provient de l'altération des feldspaths contenus dans les roches ignées, de l'attaque des minéraux argileux et de la dissolution de grains de sel soluble contenus dans les roches sédimentaires ou dans les lits d'évaporites. Le potassium K^+ est moins répandu que le sodium dans les roches ignées mais il est plus abondant dans les roches sédimentaires. De plus, contrairement au Na^+ , le K^+ est plus difficile à libérer des minéraux silicatés et montre une plus grande facilité à se réincorporer comme produit solide de l'altération. C'est pourquoi le K^+ dans l'eau se retrouve à des concentrations plus faibles que le sodium (Simard et Des Rosiers, 1980).

Le Na^+ et le K^+ sont des ions majeurs dont la présence est peu problématique aux concentrations généralement rencontrées. Toutefois, les personnes qui nécessitent une diète restreinte en sodium (hypertension) doivent porter une attention particulière aux concentrations de ces ions. Les sels déglaçants et l'intrusion d'eau saline en milieu côtier peuvent dans certains cas être problématiques. Des eaux connées isolées par les silts et argiles de la Mer de Champlain peuvent également présenter des concentrations élevées en Na^+ .

Calcium, magnésium et dureté totale

La dureté totale est la somme des concentrations de Ca^{2+} et Mg^{2+} exprimées en mg/L de CaCO_3 . La source de calcium et de magnésium dans l'eau provient soit des bicarbonates, des sulfates, des chlorures et des nitrates associés à ces éléments. La dureté totale est composée de la dureté carbonatée temporaire, qui peut être enlevée lorsque l'eau est bouillie et de la dureté non carbonatée permanente qui est due à la présence de sulfates et de chlorures de Ca^{2+} et de Mg^{2+} . Cette dureté ne disparaît pas lorsque l'eau est bouillie. La dureté permanente est égale à la différence entre la dureté totale et l'alcalinité (Hounslow, 1995). Une dureté excessive occasionne la formation de dépôts de calcaire dans les chauffe-eau, tuyauterie, et bouilloire et engendre une utilisation importante de savon pour la lessive. Une dureté comprise entre 80 et 100 mg/L permet de limiter la corrosion et l'entartrage alors qu'une eau de dureté supérieure à 200 mg/L est considérée de qualité médiocre. Finalement, les eaux dont la dureté est supérieure à 500 mg/L sont inacceptables pour la plupart des usages domestiques. Les échantillons d'eau des formations granulaires ont généralement des duretés faibles contrairement aux échantillons d'eau provenant de formations rocheuses calcaires.

Chlorures

Les sources communes de chlorures (Cl^-) sont l'halite (NaCl) et les minéraux reliés aux dépôts d'évaporite. On les retrouve également dans les sédiments marins, en bordure des routes où on utilise des sels déglaçants et en milieu côtier. Lorsque la concentration en chlorures est supérieure à 250 mg/L, le consommateur peut noter un goût salé à l'eau.

Sulfates/Sulfures

Le sulfate est un ion majeur présent dans les eaux souterraines. Un effet laxatif est à craindre lorsqu'il est présent en concentration trop élevée. En conditions réductrices, les sulfates peuvent être réduits en sulfures, ce qui occasionne un mauvais goût et une odeur d'œufs pourris à des concentrations aussi faibles que quelques dixièmes de mg/L. L'objectif esthétique établi pour les sulfates est de 500 mg/L.

Nitrates et nitrites

Les nitrates peuvent constituer un élément majeur des eaux souterraines. Les concentrations anormalement élevées de $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ dans les eaux souterraines sont dues à l'utilisation intensive de fertilisants (chimiques ou organiques) ou une contamination reliée aux effluents de fosses septiques (voir nutriments). Des concentrations en nitrates élevées sont problématiques dû à leur effet potentiellement néfaste chez les nouveaux nés puisqu'ils nuisent au transport de l'oxygène. En effet, la méthémoglobinémie est à craindre pour les nouveaux nés qui peuvent souffrir d'un manque d'oxygène. Par mesure de prudence, les femmes enceintes devraient s'abstenir de boire une eau qui contient des nitrates en concentrations dépassant la norme de potabilité de 10 mg/L (exprimés en N) et ce même si aucune étude ne démontre les effets chez le fœtus.



Le couple $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ a également été classifié comme possiblement cancérigène pour les humains bien que les éléments de preuve soient faibles (Santé Canada, 1996). Une concentration supérieure à 1 mg/L indique une source de contamination anthropique.

Nutriments

L'influence des apports agricoles et des effluents domestiques sur la qualité des eaux souterraines peut être déterminée par l'étude des teneurs en azote ammoniacal (NH_4), azote Kjeldahl (NK), nitrates (NO_3^-), phosphore total (P_{tot}) et phosphore inorganique (P_{inor}) dans le cas de fortes concentrations (Simard et Des rosiers, 1980). Ces éléments étant reliés de la façon suivante :

$$\text{N}_{\text{tot}} = \text{N}_{\text{org}} + \text{N}_{\text{inor}}$$

$$\text{N}_{\text{org}} = \text{NK} + \text{NH}_3$$

$$\text{N}_{\text{ino}} = \text{NH}_4 + \text{NO}_3$$

$$\text{P}_{\text{tot}} = \text{P}_{\text{org}} + \text{P}_{\text{inor}}$$

Fer et manganèse

Les eaux provenant des formations granulaires, tout comme celles des formations rocheuses, sont souvent chargées naturellement en Fe et Mn. La présence de bactéries associées à des concentrations élevées de ces éléments donne un mauvais goût à l'eau. Des concentrations en fer et en manganèse élevées sont aussi inconfortables parce qu'elles donnent une couleur rouge et noire respectivement à l'eau et que ces éléments tachent la lessive et les appareils sanitaires (évier, toilette, bain).

Fluorures

La présence de fluorures est souvent reliée à la dissolution de la fluorite que l'on retrouve dans les roches ignées et sédimentaires (Hem, 1989). La concentration de fluorure est limitée par la solubilité de la fluorite et les concentrations en calcium (Appelo et Postma, 1993). La problématique reliée à la consommation d'eau dépassant la norme selon Santé Canada (1996) est la possibilité de souffrir de fluorose dentaire (taches brunes ou blanches sur les dents). La concentration maximale proposée est de 1.5 mg/L.

Silice

La silice est présente sous forme d'acide silicique dans l'eau bien qu'elle soit présentée sous forme de SiO_2 dans les analyses. Elle est un élément majeur non ionique de la composition de l'eau souterraine.

PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS ET PRÉVENTION DE LA CONTAMINATION

Pour plus de détails concernant le prélèvement des échantillons et la prévention de la contamination le lecteur est référé au guide suivant : Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 3 – Échantillonnage des eaux souterraines. Ministère de l'Environnement et de la Faune. 1994. Les éditions le Griffon d'argile. 100 p.

Eau brute

Le prélèvement des échantillons d'eau brute doit être fait préférablement le plus près possible de l'ouvrage de captage, avant que l'eau n'atteigne un réservoir ou les systèmes de distribution ou de traitement afin que la composition chimique de l'eau échantillonnée soit la plus représentative possible de celle de l'aquifère.

Purge

L'eau doit être purgée jusqu'à l'atteinte d'une stabilité de paramètres tels la température, la conductivité spécifique, le pH, la turbidité ou une combinaison de ces paramètres. On peut ainsi s'assurer que l'eau n'a pas résidé dans le puits ou la tuyauterie, ce qui pourrait en changer la composition. On peut aussi purger l'eau jusqu'à l'atteinte d'un volume d'eau correspondant à un certain nombre de fois (normalement 3 fois) le volume d'eau présent dans le puits et le gravier filtre autour de la crépine.

Aérateur

Lorsque l'échantillonnage est effectué à un robinet, il est nécessaire d'enlever l'aérateur du robinet, afin d'éviter d'oxyder l'échantillon et de prévenir une contamination bactériologique. Le remplissage des bouteilles d'échantillonnage doit être effectué lorsque c'est possible directement du robinet afin d'éviter de contaminer les échantillons avec des récipients intermédiaires.

Agents de conservation

Les agents de conservation, souvent déjà présents dans les bouteilles, sont fournis par les laboratoires qui procèdent à l'analyse. Le remplissage des bouteilles doit être fait en prenant soin de ne pas perdre l'agent de conservation.

Filtration

Les échantillons destinés à subir des analyses pour les paramètres tels que les métaux dissous doivent être acidifiés afin d'éviter la précipitation ou l'adsorption des métaux sur les parois des contenants et minimiser la prolifération bactérienne ainsi que certaines réactions d'oxydation. Ces échantillons doivent préférablement être filtrés sur place de façon à éliminer les particules en suspension. Lors d'études de caractérisation hydrogéochimiques régionales, on désire caractériser l'eau de l'aquifère et non celle d'un puits en particulier, qui peut contenir des particules en suspension dû aux particularités de construction de l'ouvrage de captage. Les agents de conservation peuvent dissoudre certains éléments en suspension, et modifier les résultats des concentrations en éléments dissous, de là l'importance de la filtration sur place. Des filtres jetables spécialement conçus pour la filtration d'échantillons analysés pour les métaux de 0,45 micron, utilisés conjointement avec des seringues (polyéthylène, 60cc) sont recommandés pour la filtration des échantillons.

Matériel de prélèvement de l'échantillon

Il est habituellement possible de prélever un échantillon d'eau directement à un robinet. Dans le cas contraire, un tube à clapet (écopie) (ex : réservoirs ou puits de surface) est utile pour échantillonner directement dans des réservoirs ou bassins de rétention. Les écopies en téflon sont préférables afin de limiter l'adsorption des métaux. Pour ce qui est des nouveaux puits on doit utiliser des pompes en s'assurant qu'elles n'affecteront pas la qualité de l'échantillon. Il est important d'éviter la turbulence afin de ne pas compromettre la mesure de paramètres physico-chimiques tels l'oxygène dissous, pH, le potentiel d'oxydo-réduction (Eh).

Décontamination

Lorsque des instruments sont utilisés pour les prélèvements d'eau (ex : pompes, etc.) et qu'on soupçonne une contamination par des polluants, il est nécessaire de décontaminer le matériel d'échantillonnage (MEF, 1994).



Conservation des échantillons

Tous les échantillons d'eau doivent être conservés à 4 °C et à l'obscurité jusqu'à leur analyse. Les bouteilles doivent parfois être livrées au laboratoire dans des temps restreints pour respecter les délais de conservation. Les bouteilles de verre doivent être soigneusement enveloppées pour éviter qu'elles ne se brisent durant le transport. L'analyse des paramètres doit également être effectuées à l'intérieur de délais limites (Gouvernement du Québec, 2001).

Débit

Un faible débit doit être assuré lors du remplissage des bouteilles pour éviter l'aération de l'échantillon d'eau afin d'éviter que les bouteilles qui contiennent un agent de conservation ne débordent et qu'une partie de l'agent de conservation ne soit perdue. La mesure de l'oxygène dissous, du potentiel d'oxydoréduction et du pH doit également être faite sur des échantillons d'eau que l'on a prélevé en prenant soin de limiter le débit et ainsi la turbulence qui causerait l'aération de l'échantillon.

Il est également de limiter le débit d'eau lors du prélèvement d'un échantillon d'eau afin d'éviter de dénoyer la crépine et de changer les conditions d'oxydoréduction dans l'aquifère au moment du prélèvement. Le rabattement de l'aquifère doit être minimal.

Équipe de réalisation

Éditeurs scientifiques

Martine M. Savard, Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada
René Lefebvre, Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement
Richard Martel, Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement
Michel Ouellet, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec
Charles Lamontagne, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec

Auteurs par ordre alphabétique

Eric Boisvert, Édith Bourque, Vincent Cloutier, Donna Kirkwood, Kathleen Lauzière, René Lefebvre, Richard Martel, Y. Michaud, Miroslav Nastev, Michel Ouellet, Daniel Paradis, Martin Ross, Normand Rousseau. Martine M. Savard

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2008
ISBN : 978-2-550-51190-8 (pdf)

Annexe C - Modèle conceptuel de données hydrogéologiques

