Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Montérégie Est

Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada

Déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines

Par l'Institut national de la recherche scientifique, Centre - Eau Terre Environnement (INRS-ETE), en collaboration avec la Commission géologique du Canada (CGC), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et l'Organisme de bassin versant de la Yamaska (OBV Yamaska)

Rapport de recherche R-1433

Juin 2013

ISBN : 978-2-89146-764-3

Conditions d'utilisation et notice bibliographique suggérée

Ce document a été préparé dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP). Il peut être reproduit en tout ou en partie à des fins éducationnelles ou non lucratives s'il est cité de façon appropriée. Pour fins de référence, ce document devrait être cité comme suit:

Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoit, N., Vigneault, H., Beaudry, C., Malet, X., Laurencelle, M., Gosselin, J.-S., Ladevèze, P., Thériault, R., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Morin, R., Crow, H., Gloaguen, E., Bleser, J., Martin, A., Lavoie, D. (2013) Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, rapport final INRS R-1433, soumis en juin 2013.

L'INRS apprécierait recevoir une copie de toute publication utilisant ce document comme référence. Ce document ne peut être vendu ou utilisé d'aucune façon à des fins commerciales sans l'autorisation écrite de l'INRS.

Ce rapport ainsi que les cartes qui lui sont associées représentent des conditions régionales à l'échelle 1/100 000, telles que pouvant être définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser les travaux d'analyse et d'interprétation des données ainsi que la production des cartes, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, les résultats présentés dans le présent rapport ainsi que sur les cartes associées à ce rapport ne peuvent remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offrent aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentées dans le rapport et sur les cartes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée du contenu de ce rapport ni des cartes qui lui sont associées et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation du contenu du rapport, des cartes, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Pour nous joindre:

INRS
Université d'avant-garde

Institut national de la recherche scientifique
Centre - Eau Terre Environnement

490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9 CANADA
T 418 654-2524 F 418 654-2600
www.ete.inrs.ca

RÉSUMÉ

Ce rapport et les produits cartographiques qui l'accompagnent représentent les résultats de deux projets réalisés conjointement par l'INRS, Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE), par la Commission géologique du Canada (CGC), par l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et par l'OBV Yamaska. Le *Projet d'acquisition de connaissances sur l'eau souterraine en Montérégie Est* a été financé par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) et la Conférence régionale des élus (CRÉ) de la Montérégie Est, ainsi que par des contributions d'organismes partenaires du projet. Le projet *Caractérisation régionale du système aquifère Richelieu-Yamaska* a été financé par le *Programme de cartographie des eaux souterraines* de la Commission géologique du Canada. Les travaux réalisés s'intègrent dans le *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines* (PACES) du MDDEFP. Ce programme a pour but de dresser un portrait de la ressource en eau souterraine du Québec municipalisé, dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité. La zone d'étude du projet couvre une superficie d'environ 9 000 km^2 et comprend trois bassins versants, soit ceux des rivières Richelieu, Yamaska et de la baie Missisquoi, ainsi que neuf municipalités régionales de comté (MRC) et 106 municipalités. La région s'étend du fleuve Saint-Laurent, au nord, jusqu'aux États-Unis, au sud (New York et Vermont). La population de la région d'étude est d'environ 792 000 habitants (incluant les municipalités partiellement inclues dans la zone d'étude), dont environ 20 % utilise l'eau souterraine comme source d'approvisionnement. La mauvaise qualité des eaux de surface dans la région est connue mais peu d'information était disponible sur l'eau souterraine avant l'initiation des travaux.

La compilation des données existantes a permis de définir cinq contextes hydrogéologiques dans la zone d'étude : les zones nord et sud de la Plate-forme du St-Laurent (Basses-terres), les intrusions montérégiennes, la zone externe des Appalaches (Piedmont) et la zone interne des Appalaches (Hautes-terres). Les données existantes ont été complétées par des levés de terrain complémentaires. En plus de faire un portrait de la ressource en eau souterraine, le projet visait le développement d'une approche efficace et novatrice de caractérisation hydrogéologique, basée sur une combinaison d'approches aux échelles locale et régionale, incluant diverses méthodes géophysiques, des forages et sondages ciblés, une campagne d'échantillonnage d'eau et de sols, des essais hydrauliques et la cartographie des dépôts meubles Quaternaires. Une campagne de terrain a été réalisée entre juin et novembre 2010. Celle-ci a notamment permis de récolter 237 échantillons d'eau souterraine qui ont été analysés principalement pour les ions majeurs et mineurs, les métaux et certains isotopes (^{2}H, ^{18}O, ^{3}He, ^{14}C). Une centaine d'essais au perméamètre de Guelph ont été effectués à 30 sites pour mesurer les conductivités hydrauliques des dépôts. Plus de 250 km de levés ont été réalisés avec trois différentes méthodes géophysiques (sismique réflexion, TDEM et résistivité électrique). Plusieurs sondages au piézocône ont été réalisés pour définir en détail la séquence de sédiments et caler l'interprétation des levés géophysiques. En 2010 et 2011, deux campagnes de forages ont permis la réalisation de 25 forages conventionnels au roc et 4 forages rotosonic dans les dépôts meubles, convertis en puits d'observation. Certains puits d'observation peu profonds ont aussi été installés par enfoncement à l'aide d'une foreuse géotechnique dans les contextes favorables. La plupart de ces puits ont fait l'objet d'un échantillonnage d'eau, d'un essai de perméabilité et de levés par diagraphies. Ces puits d'observation vont constituer un réseau de suivi des niveaux d'eau. La pérennité de ce réseau régional va être assurée par son intégration au réseau national du MDDEFP qui va assurer les suivis de nappe et le maintien des infrastructures.

Des conditions hydrogéologiques distinctes sont observées dans les cinq (5) contextes hydrogéologiques définis en Montérégie Est :

- Le contexte de la zone nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres nord) est caractérisé par un faible relief et surtout par une épaisse couverture argileuse (> 10 m). Ces conditions impliquent une recharge minimale de l'aquifère rocheux régional ainsi qu'un très faible écoulement de l'eau souterraine. De cette situation découle la présence d'eau saumâtre dans l'aquifère rocheux de la zone nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (environ 2 200 km^2) dû au lessivage partiel des eaux de la mer de Champlain. Cette eau saumâtre n'est pas potable, ce qui fait que le potentiel aquifère de ce contexte est très faible, d'où une utilisation minimale de l'eau souterraine.

- Dans le contexte de la zone sud de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres sud), il n'y a pas de couverture continue et épaisse de sédiments argileux, le socle rocheux étant plutôt recouvert de till de moins de 10 m d'épaisseur qui permet une recharge significative de l'aquifère rocheux. Il y a des liens entre l'aquifère rocheux et les cours d'eau, particulièrement la rivière Richelieu qui constitue une zone de résurgence. Le potentiel aquifère repose principalement sur l'aquifère rocheux fracturé. Il y a une utilisation significative d'eau souterraine pour l'approvisionnement dans ce contexte.

- Le contexte hydrogéologique associé aux intrusions montérégiennes représente une zone de recharge régionale de l'aquifère rocheux. Il y a un potentiel aquifère dans le roc fracturé, mais aussi dans les dépôts meubles du côté sud des Montérégiennes, où se trouvent des accumulations significatives de sédiments grossiers perméables. L'aquifère rocheux et les aquifères granulaires entourant les Montérégiennes sont relativement vulnérables. Au niveau de la qualité d'eau, ce contexte est caractérisé par un type d'eau distinct reflétant à la fois la recharge locale et un apport d'eau évoluée. Dans ce contexte, on retrouve des dépassements significatifs de critères de potabilité pour le fluor (F) et le baryum (Ba) dans l'eau souterraine de l'aquifère rocheux.

- Dans le contexte de la zone externe des Appalaches (Piedmont), on retrouve un couvert de till de faible épaisseur sur les hauteurs qui permet une recharge importante. Ce contexte n'est cependant pas uniquement une zone de recharge régionale car dans sa partie sud il y a plutôt résurgence d'eau souterraine provenant des Appalaches. Il y a aussi résurgence de l'eau souterraine dans les vallées et au front des Appalaches à la limite de la Plate-forme du Saint-Laurent. L'aquifère rocheux est exploité presque partout, tandis que le potentiel aquifère dans les dépôts meubles est présent par endroits dans les vallées. Il y a une utilisation importante de l'eau souterraine dans ce contexte.

- Enfin, dans le contexte de la zone interne des Appalaches (Hautes-terres), on retrouve aussi une importante recharge sur les hauteurs à cause du couvert de till de faible épaisseur. La résurgence de l'eau souterraine se fait dans les vallées où la couverture de sédiments fins réduit la vulnérabilité. Un potentiel aquifère au roc est présent dans l'ensemble du contexte, ainsi qu'un potentiel aquifère dans les dépôts meubles dans les vallées. La meilleure qualité d'eau souterraine de la Montérégie Est est présente dans ce contexte qui n'a pas été envahi par la mer de Champlain. Il y a une utilisation locale de l'eau souterraine dans ce contexte dans les secteurs où des municipalités plus importantes se sont développées.

Au niveau municipal, 75 puits municipaux exploitent l'eau souterraine, dont environ un tiers captent de l'eau dans les dépôts meubles, le reste captant de l'eau dans l'aquifère de roc fracturé. La capacité des puits dans les dépôts meubles s'avère significativement plus importante que celle des puits au roc. Ainsi, même si, hors de la zone d'eau saumâtre, les

ressources sont relativement abondantes dans la région, leur exploitabilité est limitée par la capacité des puits au roc et l'extension limitée des aquifères granulaires plus productifs. Des indications sont fournies dans le rapport pour faciliter l'exploration en eau dans les aquifères granulaires. Des efforts importants ont été dédiés pour estimer l'utilisation d'eau en Montérégie Est, particulièrement l'eau souterraine. Des Montérégiennes jusqu'à Sorel, toute la partie nord-ouest de la région d'étude est desservie par des réseaux approvisionnés par de l'eau de surface. Ceci s'explique par la présence d'une grande zone d'eau souterraine saumâtre non potable de 2 200 km^2 occupant ce secteur. Les principales municipalités (population > 2 000) dont les réseaux sont alimentés par de l'eau souterraine sont Upton, Brigham, Lac-Brome, Saint-Germain-de-Grantham, Roxton Pond, Saint-Liboire, Waterloo, Saint-Alexandre, Napierville, Rougemont et Saint-Césaire. Les MRC totalement inclues dans la zone d'étude et ayant les plus fortes consommations d'eau souterraine sont Acton, Rouville, La Haute-Yamaska, et Brome-Missisquoi. Les MRC avec une consommation importante d'eau souterraine sont généralement situées dans des contextes où la vulnérabilité est relativement élevée.

Au niveau de la qualité de l'eau souterraine, cinq (5) paramètres présentent des dépassements par rapport à des normes pour l'eau potable relatives à la santé : l'arsenic (As), le baryum (Ba), le fluor (F), les nitrites et nitrates ($N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$), ainsi que l'uranium (U). Au niveau des critères d'ordre esthétique, 9 paramètres présentent des dépassements : les chlorures (Cl), le sodium (Na), les sulfates (SO_4), la dureté, les sulfures, les matières dissoutes totales (MDT), le manganèse (Mn) et le fer (Fe). La qualité d'eau a été reliée à la classification géochimique de l'eau souterraine en 8 groupes ou types d'eau qui permettent de mieux comprendre l'évolution de l'eau souterraine des zones de recharge jusqu'aux zones de résurgence. Ainsi, des zones de qualité d'eau jugée « non potable », « passable » et « acceptable » ont pu être définies dans la région d'étude. L'eau non potable correspond à la zone d'eau saumâtre dans la partie nord-ouest de la région. L'eau de qualité passable occupe tout le reste de la Plate-forme du Saint-Laurent et de la zone externe des Appalaches, ce qui représente approximativement la zone maximale d'extension de la mer de Champlain. L'eau de qualité acceptable occupe essentiellement la zone interne des Appalaches, hors de la région affectée par la présence d'eau marine. Certains types d'eau présentent des proportions importantes de dépassements des critères de qualité. Bien que certaines concentrations non négligeables en azote sous forme de nitrites et nitrates ($N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$) aient été mesurées au niveau de l'aquifère rocheux régional, aucun dépassement des normes n'a été identifié, malgré le caractère agricole de la région. Cependant, les données historiques indiquent que certains puits installés dans les dépôts meubles présentent des dépassements par rapport aux critères de potabilité.

Des indicateurs de gestion durable des ressources en eau souterraine, sous forme de tableaux et de cartes, ont été dérivés des données et cartes produites par le projet PACES réalisé en Montérégie Est. Ces indicateurs permettent de « traduire » les résultats obtenus sous une forme plus facilement utilisable par les organismes régionaux impliqués dans la gouvernance et la gestion des ressources en eau souterraine. Ces indicateurs permettraient aux gestionnaires régionaux 1) de mieux saisir l'état de la ressource, 2) d'identifier les problématiques pertinentes à leur région, et 3) de cibler les secteurs prioritaires d'intervention. Le rapport présente des éléments qui pourraient être considérés pour définir les problématiques et régions prioritaires. L'état des ressources pourra être suivi grâce aux 34 puits d'observation installés dans la région d'étude, qui ont été légués au MDDEFP et intégrés dans son réseau de suivi, alors que seulement quatre (4) puits d'observation (dont un inactif) étaient présents en Montérégie Est avant le présent projet. Ces puits étant récents, la séquence de mesure de niveau d'eau en continu est de l'ordre de deux années mais ces puits vont fournir des informations importantes sur l'état de la ressource en eau souterraine dans les décennies qui viennent.

En plus des livrables prévus par le PACES, un atlas hydrogéologique a été préparé afin de présenter une synthèse des résultats du projet sous forme de cartes accompagnées de textes

vulgarisés. Des travaux spécifiques ont été aussi réalisés par des étudiants de 2e et 3e cycles sur des thèmes d'intérêt pour les ressources en eau souterraine en Montérégie Est. Certains de ces travaux sont documentés dans le présent rapport, notamment l'étude de la fracturation et de son contrôle sur les propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux régional, l'évaluation détaillée des processus de recharge avec des méthodes variées, les processus géochimiques contrôlant l'évolution et la qualité de l'eau souterraine, l'étude des sources et du devenir des nitrates dans l'eau souterraine, et la modélisation numérique de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux.

Enfin, le projet PACES en Montérégie Est a fourni les bases de connaissances requises pour assurer la bonne gouvernance de l'eau souterraine. La concertation régionale au niveau des organismes intéressés pourrait assurer une cohérence dans les approches et les critères d'actions visant à assurer une bonne gouvernance de la ressource. Ces efforts devront être soutenus par les organismes gouvernementaux et les chercheurs intéressés à la ressource.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) ainsi que tous les organismes partenaires du projet PACES pour leurs contributions de même que leur collaboration au développement initial et à la réalisation du projet. Le projet a aussi bénéficié du support financier du Programme de Cartographie des eaux souterraines de la Commission géologique du Canada (CGC).

Nous voulons particulièrement souligner la contribution financière de la Conférence régionale des élus (CRÉ) de la Montérégie Est et les contributions en ressources humaines de tous les organismes partenaires du projet : les Municipalités régionales de comté (MRC) participantes de la Montérégie Est, les organismes de bassins versants de la région (OBV Yamaska, COVABAR, OBVBM), l'Agence géomatique montérégienne (Géomont), la direction régionale de la Montérégie Est du MAPAQ, la Fédération de l'UPA de Saint-Hyacinthe, les directions régionales de la Montérégie, de l'Estrie et du Centre-du-Québec du MDDEFP, et le Conseil régional de l'environnement de la Montérégie (CREM).

Nous tenons aussi à remercier nos collaborateurs scientifiques : Richard Martel et Claudio Paniconi de l'INRS ; John Molson et René Therrien de l'Université Laval ; Michel Chouteau et Denis Marcotte de l'École Polytechnique de Montréal ; Alexandre Boucher de l'Université Stanford ; Martine Savard de la Commission géologique du Canada ; Nicolas Tremblay et Lucie Grenon d'Agriculture et de l'Agroalimentaire du Canada ; Hugo Dubé-Loubert de Géologie Québec du ministère des Ressources Naturelles (MRN) ; Charles Poirier du Centre d'Expertise hydrique du Québec (CEHQ) ; Roger Morin, John Williams, Richard Reynolds et Thomas Mack du United States Geological Survey (USGS). Nous tenons également à remercier les étudiants et stagiaires qui ont participé ou collaboré au projet: Pierrick Chasseriau, Roxane Lavoie, Sara Kazza, Claudine Nackers, Jean-Bernard Kabran, Corrine Salaun, Mathieu Sauvageau, Hélène Montaz, Daniel Collins-Fekete Pierre-Luc Rousseau. Nous tenons aussi à souligner la contribution importante du Laboratoire de cartographie numérique et de photogrammétrie, plus particulièrement de Ruth Boivin et Gabriel Huot-Vézina à la cartographie numérique et de Marco Boutin pour les dessins scientifiques.

La collaboration de plusieurs autres organismes, soit via le partage de données ou de connaissances, doit également être soulignée:

- le ministère des Transports du Québec (MTQ)
- le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN)
- la Commission régionale sur les ressources naturelles et le territoire (CRRNT) de la Montérégie Est
- les Municipalités régionales de comté (MRC) des Conférence régionale des élus (CRÉ) avoisinantes
- plusieurs municipalités de la région d'étude ayant fourni des rapports d'étude en lien avec le projet et des informations sur l'utilisation d'eau sur leur territoire
- le Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES)
- la Chaire de recherche en eau potable (« Stratégies de valorisation de l'information hydrogéologique pour supporter les décisions locales en aménagement du territoire »)

Nos remerciements vont également aux résidents de la Montérégie Est ainsi qu'aux municipalités qui ont collaboré au projet en donnant accès à leur propriété ou à leur puits lors de la réalisation des travaux de terrain.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ ..... **III**
REMERCIEMENTS ..... **VII**
1 INTRODUCTION **1**
1.1 Contexte du projet 1
1.2 Objectifs du projet 2
1.3 Contenu et structure du rapport 3
1.4 Équipe de réalisation et partenaires 4
1.5 Présentation du territoire à l'étude 6
1.5.1 Localisation 6
1.5.2 Description du milieu naturel 9
1.5.3 Population et territoire 32
2 ACQUISITION DES DONNEES ET CARACTERISATION **40**
2.1 Compilation de l'information existante 40
2.1.1 Acquisition de bases de données existantes 40
2.1.2 Acquisition de données à partir des documents existants 42
2.1.3 Faits saillants de la collecte 43
2.2 Travaux de caractérisation 44
2.2.1 Cartographie des formations superficielles 45
2.2.2 Levés géophysiques 46
2.2.3 Sondages et forages 52
2.2.4 Échantillonnage d'eau souterraine 58
2.2.5 Essais et travaux dans les puits 61
2.2.6 Lysimètres et perméamètres de Guelph 67
2.2.7 Installation de sondes d'humidité et de température 73
2.2.8 Scannographie et analyses XRF des échantillons de sol 73
2.2.9 Extraction d'eau interstitielle dans les argiles 75
2.3 Saisie, validation et archivage des données 76
2.3.1 Développement de la base de données à référence spatiale 76
2.3.2 Vérification et validation des données 81
3 CONTEXTES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES **88**
3.1 Géologie du socle rocheux 88
3.1.1 Histoire géologique 88
3.1.2 Tectonique et structure 90
3.1.3 Stratigraphie et lithologies 91
3.2 Géologie du Quaternaire 95
3.2.1 Histoire du Quaternaire 96
3.2.2 Stratigraphie et distribution des sédiments du Quaternaire 96
3.2.3 Couverture de dépôts meubles 102
3.2.4 Architecture des sédiments 107
3.3 Conditions de confinement 109
3.4 Contextes hydrogéologiques 111
4 CONDITIONS HYDROGEOLOGIQUES **112**
4.1 Propriétés hydrauliques 112

4.1.1 Méthodologie d'analyse ... 112
4.1.2 Résultats ... 115
4.1.3 Discussion des résultats ... 121
4.2 Piézométrie et écoulement ... 123
4.3 Recharge et bilan hydrologique ... 125
4.3.1 Données utilisées ... 126
4.3.2 Calage des résultats ... 128
4.3.3 Synthèse des résultats ... 130
4.3.4 Analyse comparative des résultats obtenus avec les apports verticaux ... 131
4.4 Zones de recharge et de résurgence ... 133
4.5 Vulnérabilité des nappes ... 136
4.6 Géochimie de l'eau souterraine ... 140
4.6.1 Travaux, objectifs et méthodologie ... 140
4.6.2 Définition et nature des groupes d'eau souterraine ... 140
4.6.3 Implications sur la dynamique du système aquifère ... 146
4.7 Synthèse des conditions hydrogéologiques ... 146
5 RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE ... 161
5.1 Sources d'approvisionnement en eau ... 161
5.1.1 Synthèse des sources d'approvisionnement municipal ... 161
5.1.2 Portrait des puits d'approvisionnement municipaux ... 161
5.1.3 Portrait des puits d'approvisionnement privés ... 169
5.2 Usage des ressources en eau souterraine ... 172
5.2.1 Collecte des données et estimation des prélèvements ... 172
5.2.2 Bilan de l'utilisation d'eau ... 174
5.2.3 Recommandations pour faciliter l'estimation de l'utilisation d'eau ... 176
5.3 Potentiel d'exploitation ... 176
5.4 Qualité de l'eau souterraine ... 178
5.4.1 Qualité naturelle ... 178
5.4.2 Qualité de l'eau de surface ... 187
5.5 Activités anthropiques et risques pour l'eau souterraine ... 191
5.5.1 Sources et traitement des données ... 192
5.5.2 Densité des activités anthropiques en Montérégie Est ... 193
5.6 Gestion durable des ressources en eau souterraine ... 193
5.6.1 Principes de gestion durable ... 193
5.6.2 Indicateurs ... 194
5.6.3 Priorités régionales ... 207
5.7 Réseau de surveillance et programme de suivi ... 208
6 TRAVAUX SPECIFIQUES ... 210
6.1 Modélisation hydrologique ... 210
6.1.1 Description du modèle SWAT ... 210
6.1.2 Zone d'étude ... 214
6.1.3 Paramétrage de SWAT ... 215
6.1.4 Résultats ... 221
6.2 Caractérisation de la fracturation ... 228
6.2.1 Données utilisées ... 228
6.2.2 Étude de l'évolution de la fracturation selon la profondeur ... 231

6.2.3 Analyse statistique de l'orientation des fractures ... 233
6.3 Estimation de la recharge à partir d'hydrogrammes de puits ... 235
6.3.1 Description du site de Rougemont (P19) ... 237
6.3.2 Données utilisées ... 237
6.3.3 Méthodologie ... 238
6.3.4 Résultats pour le site P19 (Rougemont) ... 241
6.4 Modélisation numérique hydrogéologique ... 248
6.4.1 Objectifs ... 248
6.4.2 Approche générale ... 248
6.4.3 Construction conceptuelle ... 248
6.4.4 Construction numérique ... 251
6.4.5 Simulations de la dynamique actuelle réalisées en 2D ... 251
6.4.6 Travaux à venir ... 254
6.5 Étude du cycle de l'azote ... 255
6.5.1 Contexte de l'étude ... 255
6.5.2 Travaux effectués ... 256
6.5.3 Résultats et discussion ... 259
7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS ... 265
8 REFERENCES ... 268

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Équipe de réalisation du projet 4
Tableau 1.2 : Partenaires du projet 5
Tableau 1.3 : Collaborateurs du projet 5
Tableau 1.4 : Liste des MRC dans la zone d'étude 8
Tableau 1.5 : Superficie et altitude des collines Montérégiennes 10
Tableau 1.6 : Liste des stations météorologiques dans la zone d'étude 10
Tableau 1.7 : Liste des principaux bassins versants en Montérégie Est 20
Tableau 1.8 : Liste des principaux plans d'eau en Montérégie Est 21
Tableau 1.9 : Liste des principaux cours d'eau en Montérégie Est 22
Tableau 1.10 : Liste des stations hydrométriques avec mesures de débit 26
Tableau 1.11 : Liste des stations hydrométriques avec mesures de niveau 27
Tableau 1.12 : Types et superficies des peuplements forestiers 28
Tableau 1.13 : Types et superficies des milieux humides 29
Tableau 1.14 : Études pédologiques utilisées pour la cartographie pédologique 30
Tableau 1.15 : Types de sol rencontrés dans la zone d'étude 31
Tableau 1.16 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude 33
Tableau 1.17 : Types d'utilisation du territoire 39
Tableau 2.1 : Résumé des données acquises via les bases de données existantes 41
Tableau 2.2 : Résumé des données extraites des documents collectés 42
Tableau 2.3 : Longueur des levés géophysiques réalisés dans le cadre du projet 46
Tableau 2.4 : Essais de perméabilité réalisés 63
Tableau 2.5 : Sondes utilisées pour réaliser les diagraphies dans les puits 66
Tableau 2.6 : Description des sites d'installation de lysimètres 72
Tableau 2.7 : Proportion des données ayant servies à la réalisation des différents livrables selon leur provenance 87
Tableau 3.1 : Principales étapes de l'histoire géologique dans la région d'étude (modifié de Globensky, 1987) 89
Tableau 3.2 : Types et proportions de sédiments quaternaires observés en surface dans la zone d'étude 98
Tableau 3.3 : Critères pour la définition des conditions de confinement 110
Tableau 4.1 : Aperçu de l'effet des filtres appliqués sur la BDPH 114
Tableau 4.2 : Tableau synthèse des statistiques par contexte hydrogéologique 118
Tableau 4.3 : Tableau synthèse des propriétés physiques des groupes de sédiments quaternaires considérés pour HELP 127
Tableau 4.4 : Bilan hydrologique et recharge moyenne obtenus de HELP par contexte hydrogéologique pour la période 1979-2010 130
Tableau 4.5 : Bilan hydrologique et recharge annuels obtenus de HELP pour la période 1979-2010 sur l'ensemble de la région d'étude 131
Tableau 4.6 : Comparaison des valeurs estimées par HELP avec les apports verticaux et les précipitations totales pour le bassin de la rivière aux Brochets 132
Tableau 4.7 : Sommaire des caractéristiques des groupes d'eau identifiés en Montérégie Est 143

Tableau 4.8 : Synthèse des conditions rencontrées dans les contextes hydrogéologiques de la Montérégie Est 148
Tableau 5.1 : Sources d'approvisionnement en eau des réseaux de distribution pour les municipalités dans la zone d'étude 162
Tableau 5.2 : Tableau synthèse des puits municipaux selon le type d'aquifère exploité 164
Tableau 5.3 : Tableau synthèse des puits privés selon le secteur d'activité 171
Tableau 5.4 : Bilan d'utilisation d'eau par MRC dans la région d'étude 175
Tableau 5.5 : Statistiques sur les dépassements de critères pour la santé et d'objectifs d'ordre esthétique pour l'eau souterraine des puits échantillonnés 180
Tableau 5.6 : Concentrations moyennes et proportion de dépassements des critères applicables pour chaque groupe d'eau 181
Tableau 5.7 : Indicateurs de développement durable pouvant être dérivés des données des projets PACES 197
Tableau 6.1 : Liste de stations hydrométriques utilisées dans la modélisation hydrologique ... 216
Tableau 6.2 : Sources de données utilisées pour préparer la carte d'utilisation du sol 217
Tableau 6.3 : Catégories d'utilisation du sol pour la modélisation hydrologique 217
Tableau 6.4 : Période de calage et de validation du débit total aux stations retenues 220
Tableau 6.5 : Comparaison des biomasses annuelles moyennes simulées par SWAT aux biomasses moyennes (rendements et biomasses estimées) annuelles de 2001 à 2009 221
Tableau 6.6 : Bilan hydrique moyen annuel modélisé pour la période 2001-2010 222
Tableau 6.7 : Calage et validation du modèle SWAT pour les débits journaliers et mensuels à 12 stations hydrométriques entre 2001 et 2010 224
Tableau 6.8 : Valeurs de recharge annuelle estimées par SWAT pour la période 1979 à 2010 225
Tableau 6.9 : Synthèse des diagraphies de puits disponibles 230
Tableau 6.10 : Synthèse du nombre de fractures mesurées (diagraphies et affleurements) 231
Tableau 6.11 : Bilan hydrologique de surface ajusté aux niveaux d'eau mesurés sur une base annuelle de 2000 à 2012 au site P19 245
Tableau 6.12 : Comparaison entre la recharge mesurée avec le lysimètre et celle estimée avec le bilan hydrologique de surface au site P19 246
Tableau 6.13 : Comparaison des valeurs de recharge estimées avec HELP et le bilan hydrologique de surface pour une cellule située à environ 1.2 km du puits P19 248
Tableau 6.14 : Conductivités hydrauliques assignées aux dépôts meubles (valeurs préliminaires) 250

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Localisation de la zone d'étude 7
Figure 1.2 : Normales climatiques pour les stations météorologiques actives de la zone d'étude 13
Figure 1.3 : Précipitations totales annuelles moyennes interpolées (période 1970-2000) 15
Figure 1.4 : Température moyenne annuelle interpolée (période 1970-2000) 16
Figure 1.5 : Apports verticaux annuels moyens interpolés (période 1900-2010) (Poirier et al., 2012) 17
Figure 1.6 : Température moyenne annuelle interpolée (période 1900-2010) (Poirier et al., 2012) 18
Figure 1.7 : Tendance à long terme pour les données de précipitations totales annuelles 19
Figure 1.8 : Localisation des stations hydrométriques et des bassins jaugés 25
Figure 2.1 : Localisation des levés sismiques 47
Figure 2.2 : Exemple de résultats traités du levé sismique réalisé le long de la ligne 1, à l'ouest de Saint-Hyacinthe (fourni par A. Pugin, CGC). 48
Figure 2.3 : Localisation des levés TDEM 49
Figure 2.4 : Exemple de levé TDEM dans le secteur de Saint-Hugues (ligne T03) 50
Figure 2.5 : Localisation des levés de résistivité électrique 51
Figure 2.6 : Exemple de levé de résistivité électrique réalisé près de Saint-Hugues 52
Figure 2.7 : Localisation des sondages CPT et RPSS 53
Figure 2.8 : Exemple de journal de sondage avec interprétation pour le sondage CPT-S02-D .. 54
Figure 2.9 : Localisation des forages 56
Figure 2.10 : Schémas de construction typiques des puits au roc : a) Roc à moins de 5 m de la surface, b) Roc à plus de 5 m de la surface et c) Roc à plus de 5 m de la surface avec parois instables 57
Figure 2.11 : Exemple de fluctuations du niveau d'eau au puits P24 62
Figure 2.12 : Exemple d'interprétation au puits P03 avec la méthode de Bouwer et Rice 64
Figure 2.13 : Localisation des travaux de diagraphies et des essais hydrauliques 65
Figure 2.14 : Exemple de diagraphie acquise par la sonde « acoustic televiewer » au puits P03 67
Figure 2.15 : Principe du perméamètre de Guelph (tiré de Soilmoisture Equipment Corp., 2010) 68
Figure 2.16 : Bulbe de sol saturé durant l'essai au perméamètre de Guelph (dessin tiré de Soilmoisture Equipment Corp., 2010) 68
Figure 2.17 : Localisation des lysimètres et des essais au perméamètre 69
Figure 2.18 : Exemple de résultats pour un site situé à l'ouest de Saint-Jean-sur-Richelieu 70
Figure 2.19 : Fluxmètre à contrôle passif (lysimètre) de la compagnie Decagon 71
Figure 2.20 : Mesures prélevées au lysimètre et au puits d'observation P19 72
Figure 2.21 : Exemple de données collectées par les sondes TDR à un des sites (Rougemont, 65 cm de profondeur) 74
Figure 2.22 : Exemple de scannographie d'un échantillon de sol prélevé lors du forage RS01 . 75
Figure 2.23 : Représentation schématique du modèle de collecte de données sur le terrain 80
Figure 2.24 : Exemple de formulaire de saisie pour la localisation d'un objet 80

Figure 2.25 : Exemple de formulaire de saisie pour les observations effectuées pour un objet . 81
Figure 2.26 : Représentation schématique de la base de données commune 81
Figure 3.1 : Colonne stratigraphique schématique pour la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches (modifiée de Séjourné et Malo, 2007) 92
Figure 3.2 : Limite approximative de l'invasion de la mer de Champlain 97
Figure 3.3 : Descriptions lithologiques des formations quaternaires interceptées lors des forages rotosonic effectués dans la zone d'étude 101
Figure 3.4 : Épaisseur de sédiments argileux 104
Figure 3.5 : Épaisseur de sédiments indifférenciés sus-jacents aux sédiments argileux..... 105
Figure 3.6 : Épaisseur de sédiments indifférenciés sous-jacents aux sédiments argileux..... 106
Figure 3.7 : Emplacement des coupes stratigraphiques simplifiées 108
Figure 4.1 : Effet des filtres appliqués à la BDPH sur la distribution statistique du $\log_{10}$ de *K*. Plusieurs histogrammes se recouvrent (sans empilement) et chaque bâtonnet représente une densité de probabilité. 116
Figure 4.2 : Diagramme de boîtes à moustache (box plot) résumant les positions statistiques du logarithme de la conductivité hydraulique ($\log_{10}$(K)) pour les formations géologiques de la Montérégie Est 117
Figure 4.3 : Diagrammes de boîtes à moustache (box plot) résumant les positions statistiques de la profondeur sous la surface du roc pour les formations géologiques de la Montérégie Est ... 118
Figure 4.4 : Corrélation observée entre les médianes de la conductivité hydraulique ($\log_{10}$ K) et de la profondeur dans le roc (z) pour chaque unité géologique 119
Figure 4.5 : a) Dépendance du logarithme de K à la profondeur dans le roc par contexte hydrogéologique ; b et c) Densité empirique relative des puits selon leur profondeur dans le roc (z) pour les différents contextes hydrogéologiques et pour l'ensemble de la zone à l'étude 120
Figure 4.6 : Exemple de profil de matériaux utilisé pour estimer la recharge (modifié de Croteau et al., 2010) 128
Figure 4.7 : Comparaison des résultats de HELP avec les données hydrométriques pour le bassin versant de la rivière Yamaska Sud-Est (station 030304)..... 129
Figure 4.8 : Comparaison de la recharge estimée par HELP avec les apports verticaux et les précipitations totales pour le bassin de la rivière aux Brochets..... 133
Figure 4.9 : Poids et définitions des paramètres DRASTIC (De Chardon, 2009) 137
Figure 4.10 : Vulnérabilité DRASTIC avec des plages de valeurs basées sur la distribution relative des indices en Montérégie Est..... 139
Figure 4.11 : Localisation des échantillons d'eau souterraine prélevés en Montérégie Est..... 141
Figure 4.12 : Répartition spatiale des groupes d'eau souterraine..... 142
Figure 4.13 : Composition des ions majeurs pour les groupes d'eau 144
Figure 4.14 : Relations entre les groupes d'eau illustrées par un graphique des échantillons d'eau sur les deux principales composantes (gauche) et les concentrations relatives des ions majeurs (droite) (Beaudry, 2013) 145
Figure 4.15 : Modèle conceptuel de l'évolution géochimique de l'eau souterraine en Montérégie Est (Beaudry, 2013) 145
Figure 4.16 : Localisation des coupes pour les modèles conceptuels 154
Figure 4.17 : Volet géologie du modèle conceptuel traversant une partie des Appalaches et de la Plate-forme du Saint-Laurent 155
Figure 4.18 : Volet écoulement du modèle conceptuel traversant une partie des Appalaches et de la Plate-forme du Saint-Laurent 156

Figure 4.19 : Volet qualité d'eau du modèle conceptuel traversant une partie des Appalaches et de la Plate-forme du Saint-Laurent 157
Figure 4.20 : Volet géologie du modèle conceptuel traversant le mont Rougemont et une partie de la Plate-forme du Saint-Laurent 158
Figure 4.21 : Volet écoulement du modèle conceptuel traversant le mont Rougemont et une partie de la Plate-forme du Saint-Laurent 159
Figure 4.22 : Volet qualité d'eau du modèle conceptuel traversant le mont Rougemont et une partie de la Plate-forme du Saint-Laurent 160
Figure 5.1 : Diamètres (cm) des tubages des puits municipaux selon l'aquifère capté (nombre de puits avec information entre parenthèses) 165
Figure 5.2 : Épaisseur captée (m) pour les puits municipaux selon l'aquifère exploité (nombre de puits avec information entre parenthèses) 165
Figure 5.3 : Fréquences cumulées des épaisseurs captées pour les puits municipaux, selon l'aquifère exploité 166
Figure 5.4 : Plage de valeurs de capacité spécifique (*CS*) des puits municipaux selon l'aquifère exploité 166
Figure 5.5 : Fréquence cumulée de capacité spécifique (*CS*) des puits municipaux selon l'aquifère exploité 167
Figure 5.6 : Plage de valeurs de transmissivité (*T*) pour les aquifères exploités par les puits municipaux 167
Figure 5.7 : Fréquence cumulée de transmissivité (*T*) des aquifères exploités par les puits municipaux 167
Figure 5.8 : Transmissivité (*T*) en fonction de la capacité spécifique (*CS* ou Q_s) pour les puits municipaux avec données disponibles 168
Figure 5.9 : Volumes annuels prélevés (m^3/an) dans les puits municipaux 168
Figure 5.10 : Aires d'alimentation de certains puits municipaux en relation avec la vulnérabilité de l'aquifère régional de roc fracturé 170
Figure 5.11 : Types d'utilisation d'eau considérés 173
Figure 5.12 : Compilation historique des concentrations en azote (N) associées aux nitrites (NO_2) et nitrates (NO_3) pour les puits aménagés dans le roc 185
Figure 5.13 : Compilation historique des concentrations en azote (N) associées aux nitrites (NO_2) et nitrates (NO_3) pour les puits aménagés dans les dépôts meubles 186
Figure 5.14 : Stations de suivi et d'échantillonnage pour les rivières Richelieu et Yamaska 188
Figure 5.15 : Évolution des concentrations en nitrites et nitrates ($N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$) et en phosphore total dissous (Ptot dissous), entre les années 1979 et 2011, pour la rivière Richelieu 189
Figure 5.16 : Évolution des concentrations en nitrites et nitrates ($N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$) et en phosphore total dissous (Ptot dissous), entre les années 1979 et 2011, pour la rivière Yamaska 189
Figure 5.17 : Évolution de l'IQBP annuel moyen pour les stations des rivières Richelieu (haut) et Yamaska (bas), de l'année 1990 à l'année 2008 190
Figure 5.18 : Indicateurs de gestion durable suggérés par le CCME 194
Figure 5.19 : Indicateurs permettant d'évaluer la consommation d'eau souterraine par rapport à sa disponibilité (recharge) 201
Figure 5.20 : Indicateurs de la vulnérabilité en relation avec la densité des activités anthropiques 202

Figure 5.21 : Indicateurs de la proportion de municipalités vulnérables en relation avec la densité des activités anthropiques 203
Figure 5.22 : Indicateurs de la qualité naturelle de l'eau souterraine en relation avec l'usage résidentiel 204
Figure 5.23 : Indicateurs permettant d'évaluer l'importance de l'usage résidentiel de l'eau souterraine 205
Figure 5.24 : Indicateurs permettant d'évaluer l'importance de l'usage agricole de l'eau souterraine par municipalité 206
Figure 6.1 : Représentation spatiale des unités de réponse hydrologiques (URH) 211
Figure 6.2 : Composantes hydrologiques du modèle SWAT (adapté d'Eckhardt et Arnold, 2001) 211
Figure 6.3 : Schéma du fonctionnement souterrain de SWAT 213
Figure 6.4 : Zone de modélisation hydrologique avec SWAT 214
Figure 6.5 : Recharge moyenne annuelle obtenue par SWAT pour la période 1979-2010 226
Figure 6.6 : Comparaison de la recharge annuelle modélisée par les modèles HELP et SWAT 228
Figure 6.7 : Localisation des puits avec données de diagraphies acoustiques et des affleurements visités 229
Figure 6.8 : Épaisseur de roc investiguée et nombre de fractures observées pour chaque puits 230
Figure 6.9 : Évolution du nombre cumulé et normalisé de fractures en fonction de la profondeur. 232
Figure 6.10 : Données de fractures ouvertes observées lors des diagraphies acoustiques 234
Figure 6.11 : Schématisation de l'orientation des plans des principales familles de fractures observées dans la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches en Montérégie Est 235
Figure 6.12 : Photographie du puits P19 (Rougemont) 237
Figure 6.13 : Photo aérienne du site P19 (Rougemont) 238
Figure 6.14 : Données météorologiques (température et précipitations) et mesures de niveau d'eau compilées pour le puits P19 situé à Rougemont 239
Figure 6.15 : Données météorologiques et flux d'infiltration compilés pour le lysimètre situé à Rougemont près du puits P19 239
Figure 6.16 : Modélisation de la récession de la nappe à partir de l'hydrogramme du puits P19 242
Figure 6.17 : Porosité de drainage de l'aquifère, S_y, en fonction de la profondeur par rapport à la surface du sol 243
Figure 6.18 : Comparaison entre l'hydrogramme de puits mesuré (bleu) et les hydrogrammes de puits synthétiques produits à partir des données du lysimètre 244
Figure 6.19 : Hydrogramme de puits synthétique produit avec la méthode des bilans (rose) et hydrogramme mesuré au puits P19 (bleu) pour la période où des données de niveaux d'eau sont disponibles (haut) et la période où des données météorologiques sont disponibles (bas) 245
Figure 6.20 : Recharge annuelle moyenne estimée avec HELP pour la période 1979-2010 dans les environs du mont Rougemont (en bas à droite) et du mont Saint-Hilaire (en haut à gauche) 247
Figure 6.21 : Localisation du tracé de la coupe préliminaire dans la zone d'étude 249
Figure 6.22 : Influence des paramètres hydrauliques principaux ($K(z)$ et K_h/K_v) sur l'organisation des écoulements régionaux d'après les résultats du modèle hydrogéologique numérique 252

Figure 6.23 : Résultats de la modélisation hydrogéologique numérique 2Dxz préliminaire avec les paramètres retenus - Coupe hydrostratigraphique et réseau d'écoulement 253
Figure 6.24 : Résultats de la modélisation hydrogéologique numérique 2Dxz préliminaire avec les paramètres retenus – Élévations de surfaces stratigraphiques, charges hydrauliques et flux 253
Figure 6.25 : Sites d'échantillonnage de l'eau souterraine, de l'eau de surface et des sols 257
Figure 6.26 : Rapports $\delta^{15}N$ et $\delta^{18}O$ pour l'ensemble des échantillons analysés, incluant l'eau extraite des sols, les eaux de surface et les eaux souterraines 260
Figure 6.27 : Processus contrôlant les caractéristiques isotopiques du nitrate dans la zone vadose 261
Figure 6.28 : Répartition temporelle des flux d'eau moyens 263

LISTE DES ANNEXES ÉLECTRONIQUES

Annexe 1 : Atlas hydrogéologique
Annexe 2 : Cartes thématiques
Annexe 3 : Protocoles méthodologiques
Annexe 4 : Résultats des travaux de terrain
Annexe 5 : Description des champs et librairies de la base de données
Annexe 6 : Estimés d'utilisation d'eau à l'échelle municipale
Annexe 7 : Liste des activités anthropiques sélectionnées

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte du projet

Au Québec, l'eau souterraine constitue la principale source d'eau potable pour environ 20 % de la population occupant près de 90 % du territoire habité (Rousseau, 2004). Malgré l'importance de cette ressource, l'état de la connaissance sur l'eau souterraine est fragmentaire (MDDEFP, 2013). Dans cette perspective, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) a élaboré en 2008 le « Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec » (PACES). Ce dernier vise à dresser un portrait réaliste et concret de la ressource en eaux souterraines des territoires municipalisés du Québec méridional dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité.

Suite à un premier appel de propositions en 2008, cinq régions ont été ciblées par le PACES, soient la Montérégie Est, le Saguenay-Lac St-Jean, l'Abitibi-Témiscamingue (partie Est), Bécancour et le sud-ouest de la Mauricie. En 2009 et 2011, deux autres appels de propositions, également lancés dans le cadre du PACES, ont ciblés huit régions supplémentaires, soient l'Outaouais et la Communauté métropolitaine de Québec en 2009, et le Bas-Saint-Laurent, Charlevoix, Vaudreuil-Soulanges, Chaudière-Appalaches, le bassin de la rivière Saint-François et l'Abitibi-Témiscamingue (partie Ouest) en 2011. Au moment du premier appel de proposition, les objectifs du PACES étaient les suivants :

- Dresser un portrait de la ressource en eaux souterraines à l'échelle d'un bassin versant, d'une municipalité régionale de comté (MRC) ou d'un regroupement de MRC contiguës afin de soutenir les besoins d'information sur cette ressource.
- Développer les partenariats entre les acteurs de l'eau et les gestionnaires du territoire dans l'acquisition des connaissances sur la ressource en eaux souterraines afin de favoriser une saine gestion de la ressource.

Le projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Montérégie Est vise donc à établir le portrait de la ressource en eaux souterraines dans la portion québécoise des bassins hydrologiques contigus des rivières Yamaska et Richelieu, ainsi que de la baie Missisquoi. Plusieurs problématiques liées à l'approvisionnement en eau sont connues en Montérégie Est et font en sorte qu'il est essentiel d'acquérir des données et une meilleure compréhension du système aquifère dans cette région :

- Ces dernières années, plusieurs municipalités de la Montérégie Est se sont tournées vers les eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau en raison du règlement sur le captage et aussi parce que la qualité des eaux de surface s'est considérablement détériorée au cours des 30 dernières années. Or, les connaissances hydrogéologiques de cette région sont limitées. L'exploitation « durable» des eaux souterraines, tant en au niveau de la quantité que de la qualité, est donc incertaine.
- Certaines municipalités, notamment dans la MRC Brome-Missisquoi, ont des problèmes à trouver des puits qui rencontrent leurs besoins en approvisionnement, ce qui entraîne des coûts importants d'exploration pour des sources adéquates d'approvisionnement.
- La municipalité de Rougemont est aux prises avec des conflits d'usage et doit faire venir de l'eau pour l'instant par camion-citerne.
- Certaines municipalités, dont Upton et Rougemont, sont inquiètes et aimeraient connaître la vulnérabilité des aquifères exploités.
- La qualité de l'eau de la rivière Yamaska est la plus dégradée de tout le Québec et celle de la rivière Richelieu n'est pas beaucoup mieux. De façon générale, la qualité des eaux des rivières Yamaska et Richelieu se dégrade de l'amont vers l'aval. La problématique

de piètre qualité des eaux de surface est notamment reliée aux activités agricoles intensives ainsi qu'aux activités industrielles et urbaines sur le territoire de la MRC Montérégie Est. La relation potentielle entre la dégradation de la qualité des eaux de surface et celle des eaux souterraines est inconnue.

Dans la région, certaines de ces problématiques, notamment la dégradation de la qualité des eaux de surface, sont communes au Québec et aux états limitrophes des États-Unis. Les préoccupations des hydrologues et hydrogéologues des états du Vermont et de New York ont donc amené le développement de partenariats afin de travailler conjointement à la caractérisation des ressources en eau.

La réalisation de ce projet s'est étalée sur une période de 4 ans, soit d'avril 2009 à mars 2013 et comprend trois grandes phases telles qu'établies par le PACES : 1) collecte des données existantes (2009-2010), 2) travaux de terrain complémentaires (2010-2011) et 3) synthèse et transfert de l'information (2011-2013).

1.2 Objectifs du projet

Le principal objectif de ce projet consiste à regrouper et synthétiser les informations requises pour une gestion durable des ressources en eaux souterraines en Montérégie Est. Plus spécifiquement, le projet vise à :

- Compiler les informations disponibles dans une base de données
- Définir et synthétiser les contextes géologiques et hydrogéologiques régionaux
- Établir le bilan hydrique de la région, incluant l'évaluation de l'utilisation de l'eau souterraine et de la recharge
- Évaluer la qualité de l'eau souterraine
- Évaluer la vulnérabilité de l'aquifère régional et l'impact potentiel de diverses activités sur celui-ci
- Estimer les débits —durables" pour assurer la pérennité de la ressource
- Établir une liste de priorités pour la gestion et la protection des ressources régionales en eau souterraine

L'intégration et l'interprétation des données existantes ainsi que celles qui seront générées par le projet visent à obtenir une meilleure compréhension de la dynamique du système aquifère afin d'aider à mieux gérer l'exploitation des ressources en eau souterraine et la protection à long terme de celles-ci.

Le développement d'une base de données regroupant l'information, de même que des outils cartographiques et des modèles synthétisant les contextes hydrogéologiques régionaux permettra d'établir des actions prioritaires à l'atteinte d'une gestion durable des ressources en eaux souterraines.

Les retombées attendues du projet sont :

- Améliorer les connaissances sur les ressources en eau souterraine dans la région d'étude, notamment en réalisant les travaux nécessaires pour combler le manque d'information dans certaines zones présentant des particularités ou pour une thématique donnée.
- Produire une synthèse des connaissances appuyée par des cartes hydrogéologiques et une base de données, tel que spécifié par le PACES.

- Léguer des infrastructures de surveillance (puits) dans la région qui vont permettre de suivre l'évolution de la qualité et de la quantité des ressources en eau souterraine.
- De concert avec les autres projets régionaux soutenus par le programme, établir des protocoles pour la réalisation des travaux qui serviront de guides techniques pour la caractérisation hydrogéologique régionale et des formats de présentation des cartes adaptés à des contextes hydrogéologiques diversifiés.
- Former du personnel hautement qualifié et assurer la compréhension du système aquifère par l'implication des professionnels du projet ainsi que par des projets de recherche d'étudiants de 2e et 3e cycles.
- Établir une approche de gestion et de protection de la ressource s'appuyant sur les connaissances des systèmes aquifères et intégrant les ressources existantes des différents organismes locaux et régionaux.

1.3 Contenu et structure du rapport

Ce rapport documente les travaux réalisés dans le cadre du projet de caractérisation hydrogéologique de la Montérégie Est. Il couvre l'ensemble du projet, débuté en avril 2009 et s'étalant sur quatre ans, et a été réalisé en collaboration avec plusieurs partenaires scientifiques (fédéraux, provinciaux et universitaires) et régionaux (municipalités régionales de comté, conférence régionale des élus, organismes de bassin versant, …). Les travaux et les résultats associés sont regroupés en cinq grandes sections :

- Acquisition des données et caractérisation
- Contextes géologique et hydrogéologique
- Conditions hydrogéologiques
- Ressources en eau souterraine
- Travaux spécifiques

L'acquisition des données existantes qui s'est principalement déroulée dans la première année du projet inclut notamment la collecte/compilation de données numériques et de données issues de documents (ex. : cartes, rapports, …) ainsi que le développement d'une base de données commune aux projets PACES. Ce travail a notamment permis de développer une compréhension initiale de l'écoulement et de la stratigraphie de la région à l'étude afin d'identifier les lacunes au niveau de la quantité, de la qualité et de la répartition spatiale de l'information disponible en vue de la planification des travaux de caractérisation hydrogéologique qui ont principalement été réalisés lors de la seconde année du projet. Ces travaux consistent en l'acquisition de données ciblées, notamment sur la définition de l'hydrostratigraphie, les propriétés hydrauliques, l'écoulement et la géochimie des eaux souterraines.

Les sections sur les contextes géologiques et hydrogéologiques incluent notamment la synthèse des travaux antérieurs, l'intégration des données existantes, la production de cartes régionales, la préparation de coupes géologiques dans les différents contextes de la région ainsi que d'un modèle conceptuel résumant les contextes hydrogéologiques. Ces travaux ont permis la définition des conditions d'écoulement de l'eau souterraine et l'évaluation de la qualité de l'eau souterraine.

La section sur les ressources en eau souterraine traite d'abord du potentiel d'exploitation, de l'usage et de la qualité de l'eau souterraine dans une perspective de gestion durable de la ressource. Des indicateurs potentiels sont également proposés comme outil d'aide à la gestion et un portrait sommaire des ressources en eau souterraine est dressé dans une perspective de développement durable afin de soutenir les organismes régionaux dans la définition des priorités régionales relatives à la gestion de l'eau souterraine.

Finalement, un sommaire des travaux ou études spécifiques traitant de sujets complémentaires au présent projet, mais sans toutefois constituer un produit livrable du PACES exigé par le MDDEFP, est ensuite présenté. Les projets de recherche des étudiants de 2e et 3e cycle sont notamment résumés dans cette section, de même que les travaux de modélisation hydrologique réalisés par l'IRDA.

Plusieurs documents complémentaires sont également fournis en format numérique en annexe de ce rapport. Un atlas hydrogéologique est notamment inclus à l'annexe 1 afin de présenter les livrables du projet ainsi que certaines cartes et données supplémentaires accompagnées de textes explicatifs vulgarisés. Les cartes réalisées à l'échelle 1/100 000 pour chaque livrable du projet PACES sont également présentées à l'annexe 2. Par ailleurs, des protocoles méthodologiques sont fournis à l'annexe 3. Ces derniers ont été élaborés en partenariat avec les autres institutions impliquées dans des projets soutenus par le PACES afin de servir de guides techniques communs et de favoriser l'harmonisation des travaux réalisés en proposant des méthodologies de travail adaptées aux exigences du PACES pour les différents contextes hydrogéologiques rencontrés au Québec. Les principaux résultats des travaux de terrain et la structure de la base de données utilisée dans le cadre du projet pour intégrer les données collectées sont respectivement présentés aux annexes 4 et 5. Finalement, certains résultats complémentaires aux livrables sur l'utilisation d'eau souterraine et sur les activités anthropiques en Montérégie Est sont présentés aux annexes 6 et 7.

1.4 Équipe de réalisation et partenaires

Le projet est sous la responsabilité contractuelle de l'INRS avec le MDDEFP. L'équipe de réalisation du projet est indiquée au tableau 1.1. La réalisation du projet est aussi assurée par la collaboration des partenaires régionaux et de différents collaborateurs de recherche, présentés aux tableaux 1.2 et 1.3. D'autres organismes ou personnes ont également collaborés au projet de diverses façons, notamment les municipalités locales, les universités responsables des autres projets du PACES et les résidents de la région.

Tableau 1.1 : Équipe de réalisation du projet

Organismes	Personnes
Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE)	René Lefebvre, Marc-André Carrier, Jean-Marc Ballard, Harold Vigneault, Châtelaine Beaudry, Erwan Gloaguen, Martin Blouin, Pierrick Chasseriau, Xavier Malet, Marc Laurencelle, Jean-Sébastien Gosselin, Pierre Ladevèze, Rachel Thériault, Marco Boutin
Commission géologique du Canada (CGC) (Ressources naturelles Canada)	Christine Rivard, Michel Parent, Nicolas Benoit, Ruth Boivin, Gabriel Huot-Vézina, André Pugin, Susan Pullan, Heather Crow, Denis Lavoie
Organisme de bassin versant de la Yamaska (OBV Yamaska)	Catherine Laurence-Ouellet, Joshua Bleser, Alex Martin
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)	Aubert Michaud, Isabelle Beaudin, Ivana St-Laurent, Ariane Drouin
United States Geological Survey (USGS)	Roger Morin

Tableau 1.2 : Partenaires du projet

Organismes	Personnes
Agence géomatique montérégienne (Géomont)	Julien Belvisi, Marie-Lyne Bouthot
Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu (COVABAR)	Marcel Comiré, Chantale Chatelain, Isabelle Cognac
Corporation de bassin versant de la baie Missisquoi (CBVBM)	Johanne Bérubé, Chantal d'Auteuil
Conférence régionale des élus de la Montérégie Est (CRÉ ME)	Nathalie Ward, Martine Ruel
MRC Pierre-De Saurel	Mario Dion
MRC Marguerite-d'Youville	François Lestage
MRC Acton	Serge Dupont
MRC Les Maskoutains	Réal Campeau, Patrick Bernard
MRC La Haute-Yamaska	Mathieu Charest, Valérie-Anne Bachand
MRC Le Haut-Richelieu	Caroline Roberge
MRC Brome-Missisquoi	Francis Dorion, Simon Lajeunesse
Fédération de l'UPA de la Montérégie (secteur Saint-Hyacinthe)	Caroline Charron, Daniel Racine
Direction régionale Montérégie Est du MAPAQ	Ghislain Poisson, Isabelle Couture
Conseil régional de l'environnement de la Montérégie (CREM)	Daniel Cyr

Tableau 1.3 : Collaborateurs du projet

Organismes	Personnes
Université Laval	John Molson, René Therrien
École Polytechnique de Montréal	Michel Chouteau, Denis Marcotte
Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC)	Nicolas Tremblay, Lucie Grenon
Centre d'Expertise hydrique du Québec	Charles Poirier
Géologie Québec - Ministère des Ressources	Hugo Dubé-Loubert
United States Geological Survey (USGS)	John Williams, Richard Reynolds, Thomas Mack
MRC La Vallée-du-Richelieu	François Sénécal
MRC Rouville	Francis Provencher, Guylaine Ouellette
MRC Drummond	Lucien Lampron
MRC Le Val-Saint-François	Maxime Turcotte
MRC Memphrémagog	Mélanie Desautels
MRC Rousillon	Pierre Laprise
MRC Les Jardins-de-Napierville	Isabelle Boucher

1.5 Présentation du territoire à l'étude

Cette section présente les principales caractéristiques du territoire à l'étude en complément aux sections 3 à 6 traitant de la géologie et de l'hydrogéologie de la région d'étude. Les livrables PACES sous forme de cartes décrites dans les sous-sections suivantes ont été préparées à l'échelle 1/100 000 afin de couvrir l'ensemble du territoire tout en ayant un niveau de détail adapté à la précision des travaux d'hydrogéologie régionale. Ces cartes ont été développées à l'aide du logiciel ArcGIS et sont présentées à l'annexe 2. De façon à ce qu'il soit plus facile de les consulter, ces cartes ont aussi été adaptées à l'échelle 1/500 000 dans l'atlas hydrogéologique qui peut accompagner la lecture du présent rapport (annexe 1).

1.5.1 Localisation

Le territoire à l'étude se situe dans le sud de la province de Québec, sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent et couvre une superficie totale de 9 032 km^2 (figure 1.1). Il s'étend du fleuve St-Laurent, au nord, jusqu'aux États-Unis, au sud (états de New York et du Vermont). Il comprend les bassins versants des rivières Richelieu et Yamaska ainsi que de la baie Missisquoi et couvre les MRC formant la Conférence régionale des élus de la Montérégie Est (CRÉ ME). Cette dernière couvre une superficie de 7 377 km^2 et comprend neuf MRC : Pierre-De Saurel, Marguerite-d'Youville, La Vallée-du-Richelieu, Les Maskoutains, Acton, Rouville, La Haute-Yamaska, Le Haut-Richelieu et Brome-Missisquoi. Ces 9 MRC, qui incluent 106 municipalités et 2 territoires non organisés, sont donc totalement compris dans la zone à l'étude. Toutefois, les bassins versants mentionnés ci-haut débordent légèrement de la CRÉ ME et, par conséquent, une partie des CRÉ Vallée-du-Haut-Saint-Laurent (région de Napierville et Hemmingford), de Longueuil (région de St-Bruno-de-Montarville), de l'Estrie (régions de Eastman et Valcourt) et de Centre du Québec (région de Saint-Guillaume) sont également inclues dans la zone d'étude. Par conséquent, un total de 148 municipalités et 2 territoires non organisés sont donc inclus au moins en partie dans la zone d'étude. Les principaux centres urbains de la région incluent, notamment, Sorel-Tracy, Saint-Hyacinthe, Granby et Saint-Jean-sur-Richelieu.

Le tableau 1.4 présente les superficies des MRC dans la zone d'étude, calculées à partir du Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA) (MRN, 2012a) à l'échelle 1/20 000. Le livrable 2, présenté à l'annexe 2, illustre les différentes limites administratives du SDA pour la zone d'étude ainsi que le réseau routier de la Base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT) à l'échelle 1/100 000 (MRN, 2012b).

Le réseau routier du territoire à l'étude comprend plusieurs axes routiers d'importance, dont les autoroutes 10, 15, 20, 30 et 35. Plusieurs routes nationales et secondaires parcourent également ce territoire, leur densité augmentant à mesure que l'on s'approche de Montréal. L'autoroute 10 (Autoroute des Cantons-de-l'Est) dessert la partie sud selon un axe est/ouest, passant notamment près de Granby et Chambly. Le centre du territoire est parcouru dans un axe nord-est/sud-ouest par l'autoroute 20 (Autoroute Jean-Lesage) reliant notamment Drummondville, Saint-Hyacinthe et Beloeil. Un troisième axe parallèle au fleuve St-Laurent, l'autoroute 30 (Autoroute de l'Acier), dessert le nord de la zone d'étude et relie notamment Sorel, Varennes et Saint-Bruno-de-Montarville. A l'exception de l'autoroute 35 reliant Saint-Jean-sur-Richelieu à l'autoroute 20, la plupart des axes routiers nord-sud de la zone d'étude correspondent à des routes nationales. Le territoire est toutefois bordé par deux autoroutes nord-sud, les autoroutes 15 et 55. Parmi les principales routes nationales desservant la Montérégie Est selon un axe est-ouest, on compte : la route 132 longeant le fleuve Saint-Laurent ; la route 116 reliant notamment Longueuil, Beloeil, Saint-Hyacinthe et Acton Vale ; la route 112 reliant notamment Longueuil, Chambly, Granby, Waterloo et Magog ; la route 104

reliant notamment La Prairie, Saint-Jean-sur-Richelieu, Farnham, Cowansville et Lac-Brome ; et la route 202 reliant notamment Hemmingford, Cowansville et Bedford. Les principales routes nationales suivant un axe nord-sud incluent : la route 133 (Chemin des Patriotes) longeant la rive est de la rivière Richelieu de Sorel au Lac Champlain ; la route 137 reliant notamment Saint-Denis-sur-Richelieu, Saint-Hyacinthe et Granby ; la route 139 reliant notamment Wickham, Acton Vale, Roxton Pond, Granby, Cowansville et Sutton ; la route 223 longeant la rive ouest de la rivière Richelieu de Sorel au Lac Champlain ; la route 235 reliant notamment Yamaska, Saint-Jude, Saint-Hyacinthe, Saint-Paul-d'Abbotsford, Farnham et Bedford ; et la route 243 reliant notamment Valcourt, Waterloo, Lac-Brome et Potton.

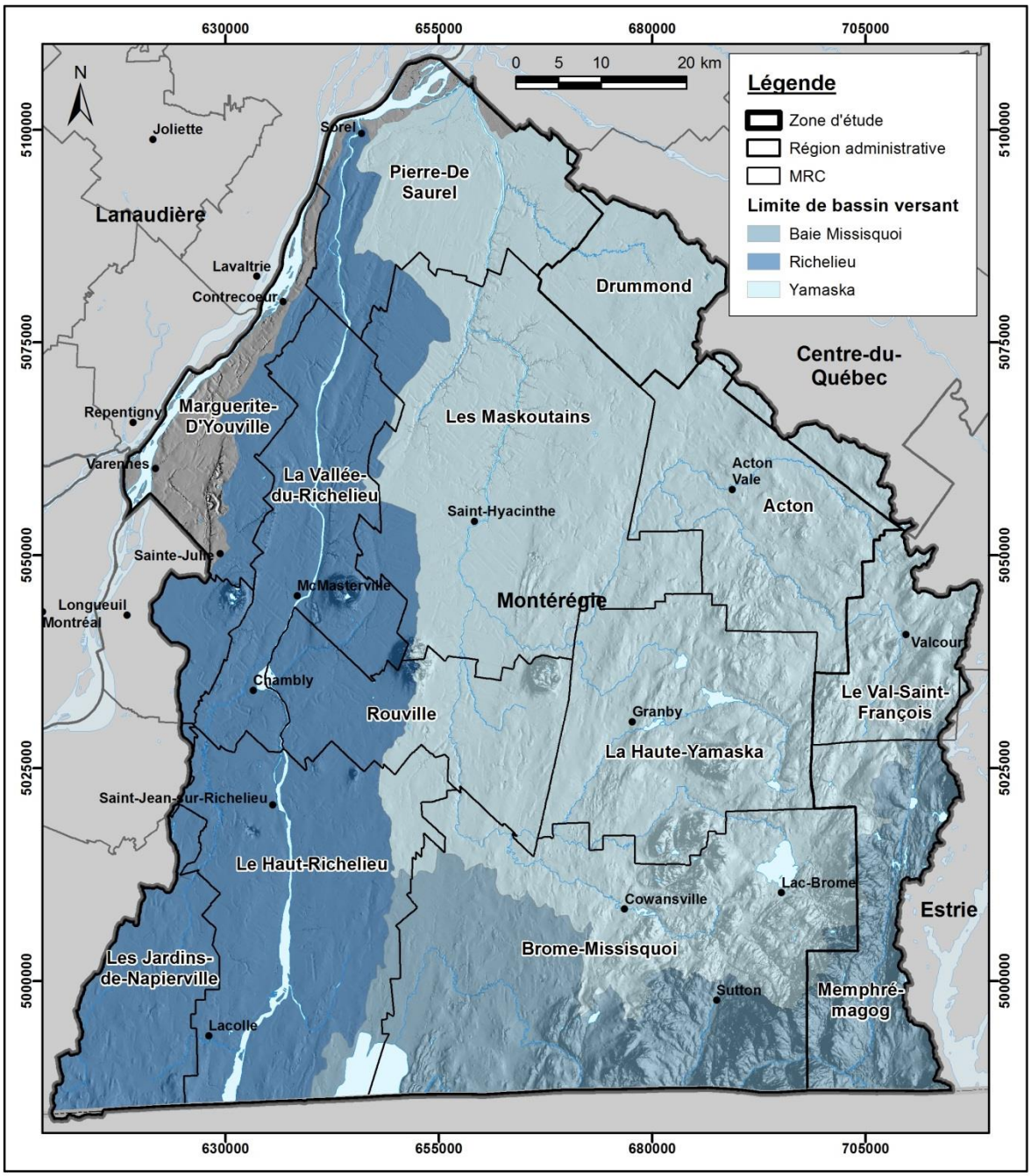


Figure 1.1 : Localisation de la zone d'étude

Tableau 1.4 : Liste des MRC dans la zone d'étude

Conférence régionale des élus (CRÉ)	Municipalité régionale de comté (MRC)	Superficie (km²)		% dans la zone d'étude
		Totale	Zone d'étude	
Montérégie Est	Acton	582	582	100 %
	Brome-Missisquoi	1 701	1 701	100 %
	La Haute-Yamaska	649	649	100 %
	La Vallée-du-Richelieu	604	604	100 %
	Le Haut-Richelieu	996	996	100 %
	Les Maskoutains	1 312	1 312	100 %
	Marguerite-d'Youville	405	405	100 %
	Pierre-De Saurel	639	639	100 %
	Rouville	489	489	100 %
Sous-total (MRC totalement inclues)		**7 377**	**7 377**	**100 %**
Vallée-du-Haut-St-Laurent	Les Jardins-de-Napierville	804	376	46.7 %
	Roussillon	492	6	1.2 %
Longueuil	Longueuil	309	112	36.3 %
Centre du Québec	Drummond	1 627	378	23.3 %
	Nicolet-Yamaska	1 189	< 1	0.1 %
Estrie	Le Val-Saint-François	1 427	310	21.7 %
	Memphrémagog	1 445	473	32.7 %
Sous-total (MRC partiellement inclues)		**7 293**	**1 655**	**22.7 %**
Total		**14 670**	**9 032**	**61.6 %**

Le réseau ferroviaire de la Montérégie Est suit généralement les mêmes grands axes que le réseau routier, dont une portion significative converge vers l'Ile de Montréal. Les principaux tronçons ferroviaires se retrouvent notamment le long des autoroutes 20 (tronçon reliant Québec et Montréal via Drummonville, Saint-Hyacinthe et Beloeil) et 30 (tronçon passant par Sorel et Varennes), de la route 112 (tronçon passant par Marieville et Chambly), de l'autoroute 15 (tronçon reliant Montréal et la frontière américaine via Napierville et Lacolle), de la route 235 (tronçon passant par Saint-Hyacinthe et Bedford), de la route 223 (tronçon passant par Saint-Jean-sur-Richelieu et Lacolle vers les Etats-Unis) et en partie le long de la route 104 et de l'autoroute 10 (tronçon passant par Saint-Jean-sur-Richelieu et Magog vers Sherbrooke). D'autres tronçons desservent également Cowansville et Sutton (vers les Etats-Unis) ainsi que Upton et Acton Vale (vers Sherbrooke). Les principales gares de triages de la région sont situées à Saint-Hyacinthe, Farham et Saint-Jean-sur-Richelieu.

Le territoire à l'étude comprend également 13 aéroports (ou aérodromes) dont 2 aéroports régionaux (Bromont, Saint-Jean-sur-Richelieu), 2 aéroports municipaux (Saint-Mathieu-de-Beloeil, Saint-Robert (Sorel)) et 9 aéroports privés (Farnham, Potton, Rougemont, Saint-Dominique, Saint-Hyacinthe, Saint-Mathias-sur-Richelieu, Saint-Ours, Sainte-Anne-de-Sorel, Valcourt). On retrouve également deux aéroport d'importance à proximité, soit l'aéroport de Montréal-Saint-Hubert-Longueuil, situé à Longueuil dans l'arrondissement de Saint-Hubert et l'aéroport Pierre-Elliot-Trudeau, situé à Montréal et accueillant des vols internationaux.

Au niveau du transport maritime, seule la municipalité de Sorel possède des installations portuaires d'importance, permettant notamment le transbordement de produits céréaliers et de minerai. Le fleuve Saint-Laurent est la seule voie maritime commerciale donnant accès à la

région puisque la rivière Richelieu est, de nos jours, utilisée seulement à des fins récréatives, le transport de marchandises ayant cessé vers les années 1970 (COVABAR, 2009). La navigation de plaisance est également présente sur d'autres plans d'eau de la région, notamment, la baie Missisquoi ainsi que les lacs Brome, Davignon, Choinière, Roxton, Selby et Waterloo (COGEBY, 2009 ; OBVBM, 2011).

1.5.2 Description du milieu naturel

1.5.2.1 Topographie et pente du sol

La topographie du territoire est représentée par les courbes topographiques provenant de la Base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT) et par le modèle altimétrique numérique (MAN), fourni par la Direction du Patrimoine écologique et des Parcs (DPEP) du MDDEFP, et développé à partir de courbes topographiques 1/20 000 de la BDTQ. Le livrable 1 présente les courbes topographiques alors que les livrables 3 et 4 montrent respectivement le MAN et la pente du sol dérivée de ce dernier.

Le relief de la zone à l'étude est étroitement lié à la géologie de la région (section 3). Trois grandes régions physiographiques peuvent donc être associées aux contextes géologiques de la zone étudiée : les Appalaches, la Plate-forme du Saint-Laurent et les collines montérégiennes. Ces régions physiographiques ont également servis de base pour la définition des contextes hydrogéologiques (section 3.4) avec les épaisseurs estimées de sédiments et les contextes géologiques. Les Appalaches occupent la partie est de la région et couvrent environ 45 % du territoire à l'étude. La partie ouest des Appalaches est légèrement vallonnée et l'altitude y augmente graduellement vers l'est, de 60 m à environ 110 m. Dans la partie est des Appalaches, le relief est généralement ondulé selon un alignement nord-nord-est/sud-sud-ouest et continue de s'élever progressivement vers l'est où il est incisé de vallées plus profondes (ex. : rivières Missisquoi Nord et Sutton). L'altitude dans cette partie des Appalaches varie entre 110 m à l'ouest et 960 m sur les monts Sutton au sud-est. La Plate-forme du Saint-Laurent couvre environ 53 % de la zone étudiée et s'étale du nord au sud dans la partie ouest de la zone d'étude. Le relief y est relativement plat, particulièrement dans sa partie nord où l'altitude varie d'environ 10 m au fleuve St-Laurent jusqu'à environ 60 m à la limite des Appalaches. Dans le sud de la Plate-forme du Saint-Laurent, le relief est légèrement ondulé et l'altitude peut dépasser 60 m par endroits, notamment dans l'extrême sud-ouest près du piedmont des hautes-terres du massif des Adirondacks. Finalement, sept collines Montérégiennes sont présentes sur le territoire étudié, soit le Mont St-Bruno, le Mont St-Hilaire, le Mont St-Grégoire, le Mont Rougemont, le Mont Yamaska, le Mont Shefford et le Mont Brome. Ces monts sont situés dans le centre de la région, selon un axe plus ou moins ouest-nord-ouest/est-sud-est, et couvrent moins de 2 % de la zone d'étude. Le tableau 1.5 présente leur superficie et leur altitude maximale. Les superficies indiquées correspondent à celles des polygones associés aux collines Montérégiennes dans la carte géologique du socle rocheux (voir section 3), obtenue du MRN (Globensky, 1987; Slivitzky et St-Julien, 1987). Quant à l'altitude maximale, elle a été extraite du MAN et elle correspond aux points les plus élevés à l'intérieur des polygones définis précédemment.

La pente du sol a été dérivée du MAN. La méthodologie utilisée pour la calculer est documentée à l'annexe 3 de ce rapport. La carte résultante (livrable 4) montre que les fortes pentes sont principalement associées aux collines montérégiennes et au relief ondulé des Appalaches, particulièrement dans la partie sud-est de la zone d'étude où on retrouve notamment les monts Sutton. Ces derniers sont l'extension des Montagnes Vertes du Vermont et comprennent notamment les monts Glen, Foster, Pinacle, Echo, Gagnon et le sommet Rond. Dans le nord-ouest de la zone d'étude, on observe des pentes plus faibles, voire nulles, à l'exception des rebords de terrasses des principales rivières ainsi que ceux associée au proto-Saint-Laurent.

Tableau 1.5 : Superficie et altitude des collines Montérégiennes

Mont	**Superficie** (km^2)	**Altitude max** (m)
Saint-Bruno	9.1	211
Saint-Hilaire	17.5	411
Saint-Grégoire	1.1	251
Rougemont	28.9	394
Yamaska	12.4	421
Shefford	23.6	512
Brome	74.8	543

1.5.2.2 Climat

Le climat de la région d'étude est de type continental humide selon la classification de Peel et al. (2007). Il est caractérisé par des écarts saisonniers importants de température, se traduisant par des étés chauds et des hivers froids. La région à l'étude reçoit des précipitations, sous forme de pluie ou de neige, à tous les mois de l'année.

Toutes les stations météorologiques présentes dans la région d'étude sont illustrées au livrable 27. Leur localisation, de même que les normales climatiques mensuelles et annuelles pour la période 1970-2000 ont été obtenues de la Direction du suivi de l'état de l'environnement (DSEE) du MDDEFP (2009). Le tableau 1.6 présente la liste stations répertoriées dans la zone d'étude, avec leurs coordonnées, altitude et périodes pour lesquelles des données sont disponibles Parmi les 55 stations présentes dans la zone d'étude, on compte 16 stations actives possédant au moins 15 ans de données (depuis 1970). Les précipitations et températures quotidiennes pour ces 16 stations ont été obtenues d'Environnement Canada (2011a) et elles sont indiquées au tableau 1.6. Les données quotidiennes manquantes ont été estimées à partir des moyennes mensuelles des stations avoisinantes en utilisant la méthode décrite dans Gong (2004).

Tableau 1.6 : Liste des stations météorologiques dans la zone d'étude

Nom station	**No. station**	**Latitude**	**Longitude**	**Altitude (m)**	**Période**	**Ptot (mm)**	**Tmoy (˚C)**
Abercorn	7020040	45.0334	-72.6662	149	1950-1985	-	-
Acton-Vale	7020055	45.65	-72.5662	94	1958-1973	-	-
Bedford-Sutton	7020575	45.15	-72.5829	235	1971-1975	-	-
Béthanie	7020750	45.5	-72.4329	198	1968-1985	-	-
Bonsecours	7020828	45.4043	-72.3137	300	1966-2009	1213.84	4.3
Brigham	7020833	45.25	-72.8496	91	1968-1972	-	-
Britannia-Mills	7020835	45.6334	-72.8162	69	1968-1976	-	-
Brome	7020840	45.1897	-72.5617	206	1875-2009	1279.75	5.27
Bromont	7020850	45.3	-72.6329	175	1968-1978	-	-
Dunham	7022246	45.15	-72.8162	121	1968-1985	-	-
Dunham-2	7022247	45.1779	-72.8278	131	2008-2009	-	-
Durham-Sud	70222DR	45.6334	-72.3495	191	1981-1994	-	-
Farnham	7022320	45.2894	-72.9028	68	1917-2009	1153.48	6.01
Farnham-S	7022325	45.2834	-72.9662	69	1950-1977	-	-
Fleury	7022375	45.8	-72.9829	30	1966-2009	1101.24	5.53

Tableau 1.6 : Liste des stations météorologiques dans la zone d'étude (suite)

Nom station	No. station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période	Ptot (mm)	Tmoy (˚C)
Granby	7022800	45.3874	-72.7056	175	1948-2009	1230.62	5.9
Henryville	7023095	45.1187	-73.1689	37	2008-2009	-	-
Iberville	7023270	45.3428	-73.2567	33	1958-2009	1083.27	6.37
Knowlton	7023530	45.2167	-72.4995	206	1958-1982	-	-
Lac-Bromont	7023568	45.2667	-72.6662	137	1968-1973	-	-
La Providence	7024102	45.6167	-72.9496	33	1990-2009	-	-
Marieville	7024627	45.3862	-73.1364	40	1960-2009	1082.92	6.24
Mathias	7024690	45.4804	-73.2651	15	2008-2009	-	-
Mt-St-Hilaire	7025328	45.5834	-73.1829	30	1975-1979	-	-
Mt-St-Hilaire	7025330	45.55	-73.0829	174	1960-1969	-	-
Mt-St-Hilaire-M	7025332	45.55	-73.1662	210	1967-1975	-	-
Philipsburg	7026040	45.0974	-73.0384	65	1950-2009	1060.44	6.72
Rougemont	7026700	45.4334	-73.0996	40	1940-1985	-	-
Roxton	7026729	45.5303	-72.5403	137	2006-2009	-	-
Roxton-Falls	7026730	45.55	-72.5329	130	1968-1982	-	-
Sabrevois	7026734	45.2167	-73.1996	38	1975-2009	1038.63	6.14
Saint-Amable	7026818	45.6602	-73.2871	43	1980-2009	-	-
St-Bernard	7026916	45.0334	-73.3829	46	1973-2009	975.51	6.67
Sainte-Brigide	7026918	45.3167	-73.0662	47	1977-1982	-	-
Saint-Bruno	7026920	45.55	-73.3496	61	1926-1958	-	-
St-Guillaume	7027302	45.8638	-72.7701	42	1958-2009	1045.94	6.23
St-Hyacinthe	7027360	45.6334	-72.9496	31	1890-1980	-	-
St-Hyacinthe-2	7027361	45.5792	-72.9348	33	1963-2009	972.09	6
Saint-Jean	7027390	45.3	-73.2662	39	1959-1965	-	-
Ste-Madeleine	7027517	45.6338	-73.1324	35	1979-2009	988.43	5.3
Saint-Nazaire	7027588	45.7558	-72.5848	77	1973-2009	1104.14	5.58
Sainte-Rosalie	7027718	45.6167	-72.8662	43	1968-1982	-	-
Saint-Simon	7027736	45.7158	-72.8403	40	1989-2009	-	-
Saint-Valérien	7027772	45.5667	-72.6662	91	1968-1994	-	-
Sorel	7028200	46.0332	-73.1156	15	1914-2009	958.44	6.02
South-Durham	7028211	45.6334	-72.3495	191	1968-1981	-	-
Sutton	7028290	45.1167	-72.6162	180	1960-1972	-	-
Sutton	7028292	45.0766	-72.6755	243	1978-2009	1274.96	5.88
Sutton-Jct	7028295	45.15	-72.6329	213	1962-1985	-	-
Sutton-Jct-A	7028296	45.15	-72.5829	237	1975-1975	-	-
Upton	7028570	45.65	-72.6829	61	1968-1982	-	-
Valcourt	7028580	45.4834	-72.3162	206	1968-1982	-	-
Upton-2	70285G0	45.6142	-72.69	75	2008-2009	-	-
Warden	7028890	45.4167	-72.4995	198	1968-1991	-	-
Barr. Choinière	7029020	45.4174	-72.6096	122	1900-2009	-	-

Notes : Les stations surlignées en gris correspondent aux stations actives avec plus de 15 ans de données en 2009

Les normales climatiques (mensuelles et annuelles) pour les 16 stations actives avec plus de 15 ans de données sont illustrées à la figure 1.2. Bien que cette figure ne présente que les précipitations sous forme de pluie et de neige ainsi que les températures minimale et maximale, les paramètres fournis par la DSEE pour la période 1970-2000 incluent également les précipitations totales, les températures moyennes ainsi que l'évapotranspiration potentielle. Pour l'ensemble de ces stations, les précipitations totales annuelles sont d'environ 1 100 mm/an en moyenne. Un peu plus de 80 % des précipitations totales est sous forme de pluie, dont la majorité tombe généralement au cours des mois de juillet, août et septembre. Les précipitations totales les plus élevées sont observées à la station de Brome (~ 1 280 mm/an) et les plus faibles à la station de Sorel (~ 960 mm/an). La température annuelle moyenne dans la région d'étude est de 5.9 °C, variant de 4.3 à 6.7 °C tandis que les températures mensuelles moyennes fluctuent entre -12 et 21 °C. Les températures mensuelles minimales sont observées en janvier (-17.1 à -13.6 °C) tandis que les températures mensuelles maximales sont observées en juillet (24 à 26.7 °C). Les températures les plus élevées sont généralement observées aux stations de Philipsburg et Saint-Bernard-de-Lacolle (température annuelle moyenne de 6.7 °C) et les plus faibles à la station de Bonsecours (température annuelle moyenne de 4.3 °C).

Les figures 1.3 et 1.4 illustrent respectivement les variations spatiales des précipitations totales annuelles et de la température moyenne annuelle pour la période de 1970-2000. Les valeurs présentées sur ces figures ont été interpolées par krigeage ordinaire sur une grille de 250 x 250 m, à partir des valeurs rapportées pour les 16 stations actives mentionnées ci-haut. Dans la région d'étude, la tendance générale indique que les précipitations annuelles totales diminuent du sud-sud-est vers le nord-nord-ouest et que les températures annuelles moyennes diminuent du sud-ouest vers le nord-est. Outre l'influence de la latitude, la température de la région est également influencée par la présence des Appalaches au sud-est et du fleuve Saint-Laurent au nord-ouest.

En supplément aux données climatiques mentionnées précédemment, des données d'apports verticaux ont également été obtenues du CEHQ (Poirier et al., 2012). Les apports verticaux correspondent aux quantités d'eau provenant de la pluie et de la fonte des neiges, estimées avec un modèle de fonte de neige qui simule l'évolution du couvert nival. A titre de comparaison, les figures 1.5 et 1.6 présentent les apports verticaux moyens annuels et la température moyenne annuelle pour la période 1900-2010, interpolées sur une grille de 0.1 x 0.1 degré pour l'ensemble du Québec méridional (43° à 55° de latitude) par le Centre d'expertise hydrique du Québec (Poirier et al., 2012). Les tendances observées sur ces figures sont similaires à celles représentées sur les figures 1.3 et 1.4, à l'exception que les apports verticaux présentent des valeurs annuelles moyennes généralement plus faibles que celles interpolées à partir des données rapportées aux 16 stations actives. Les différentes périodes (1970-2000 versus 1900-2010) et régions considérées (Montérégie Est versus Québec méridional) pour générer ces figures peut expliquer en partie cette différence dans les données interpolées. Toutefois, cette différence pourrait être également attribuable au fait que la modélisation des apports verticaux avec le modèle HYDROTEL (Poirier et al., 2012) permettrait une meilleure intégration du phénomène de sublimation du couvert nival, résultant ainsi en des valeurs annuelles moyennes plus faibles. A noter que les apports verticaux sont dérivés des données de neige au sol et de précipitations sous forme de pluie alors que les valeurs interpolées à partir des stations actives sont dérivées des données de précipitations totales estimées aux stations, qui représentent la somme des précipitations sous forme de pluie et de l'équivalent en eau des précipitations sous forme de neige). Bien que les apports verticaux constituent un intrant d'intérêt pour l'évaluation de la recharge à l'échelle régionale, les données d'apports verticaux validés n'ont été rendues disponibles qu'à la fin 2012, limitant ainsi leur utilisation dans le cadre du présent projet.

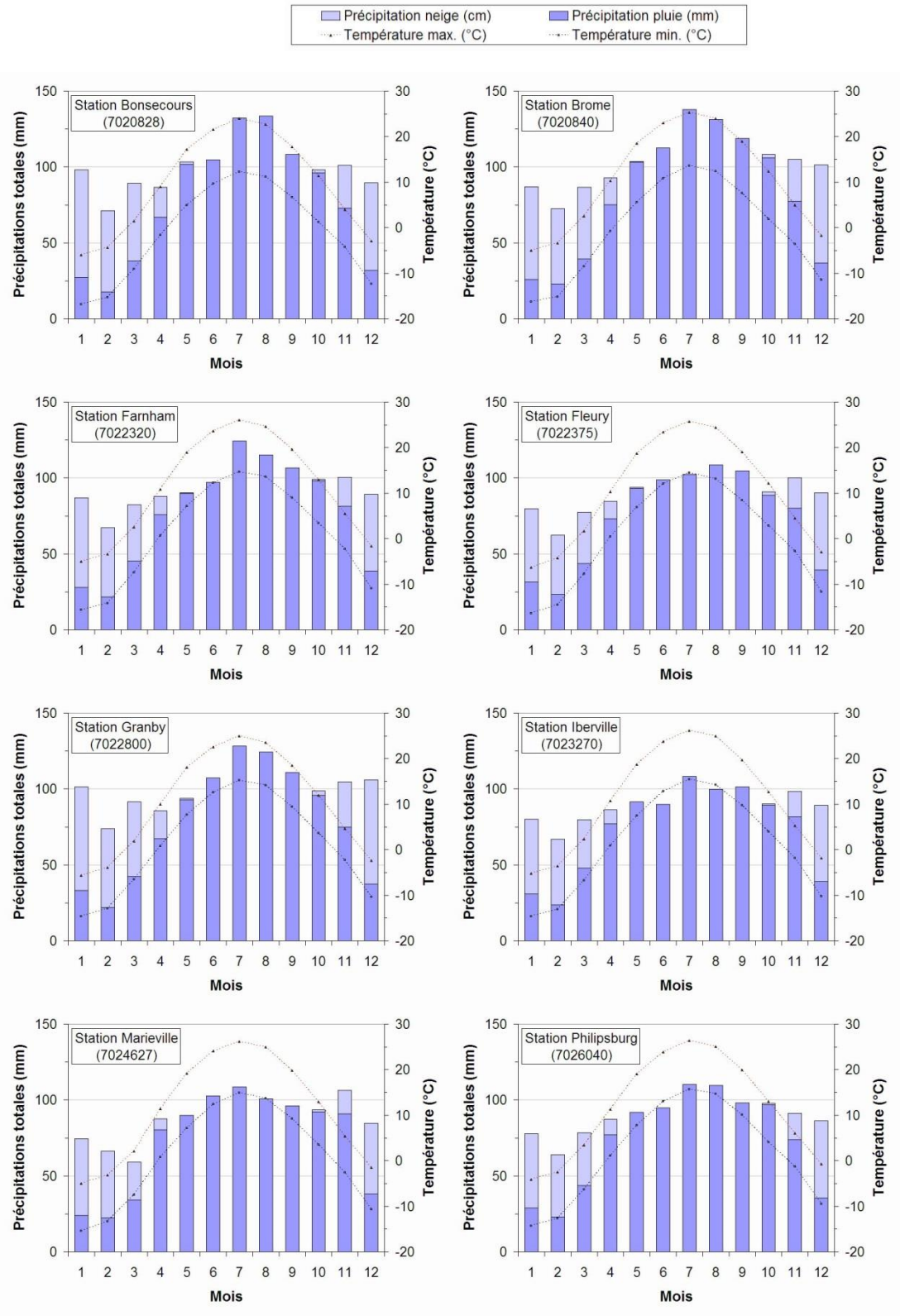


Figure 1.2 : Normales climatiques pour les stations météorologiques actives de la zone d'étude

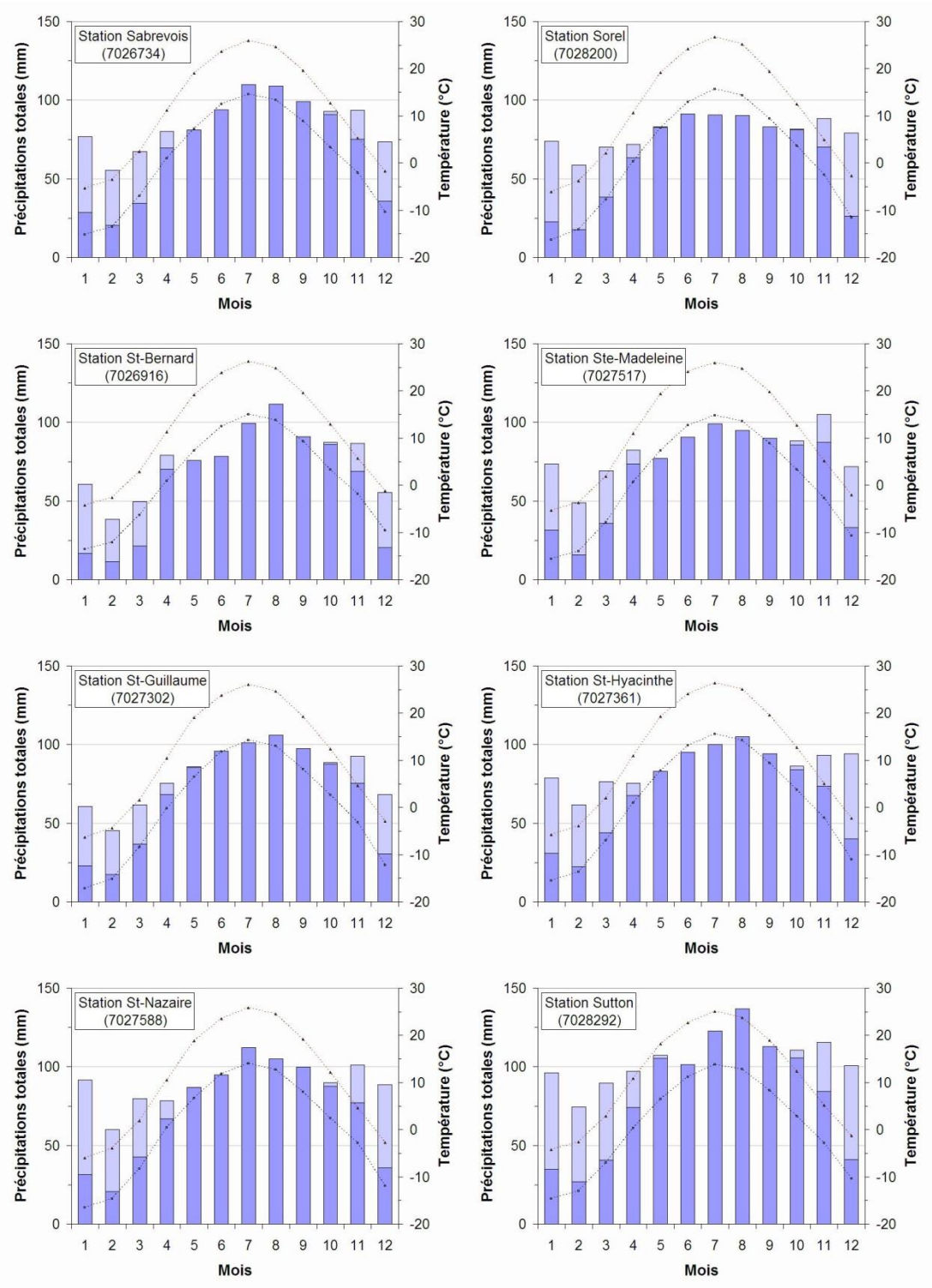


Figure 1.2 : Normales climatiques pour les stations météorologiques actives de la zone d'étude (suite)

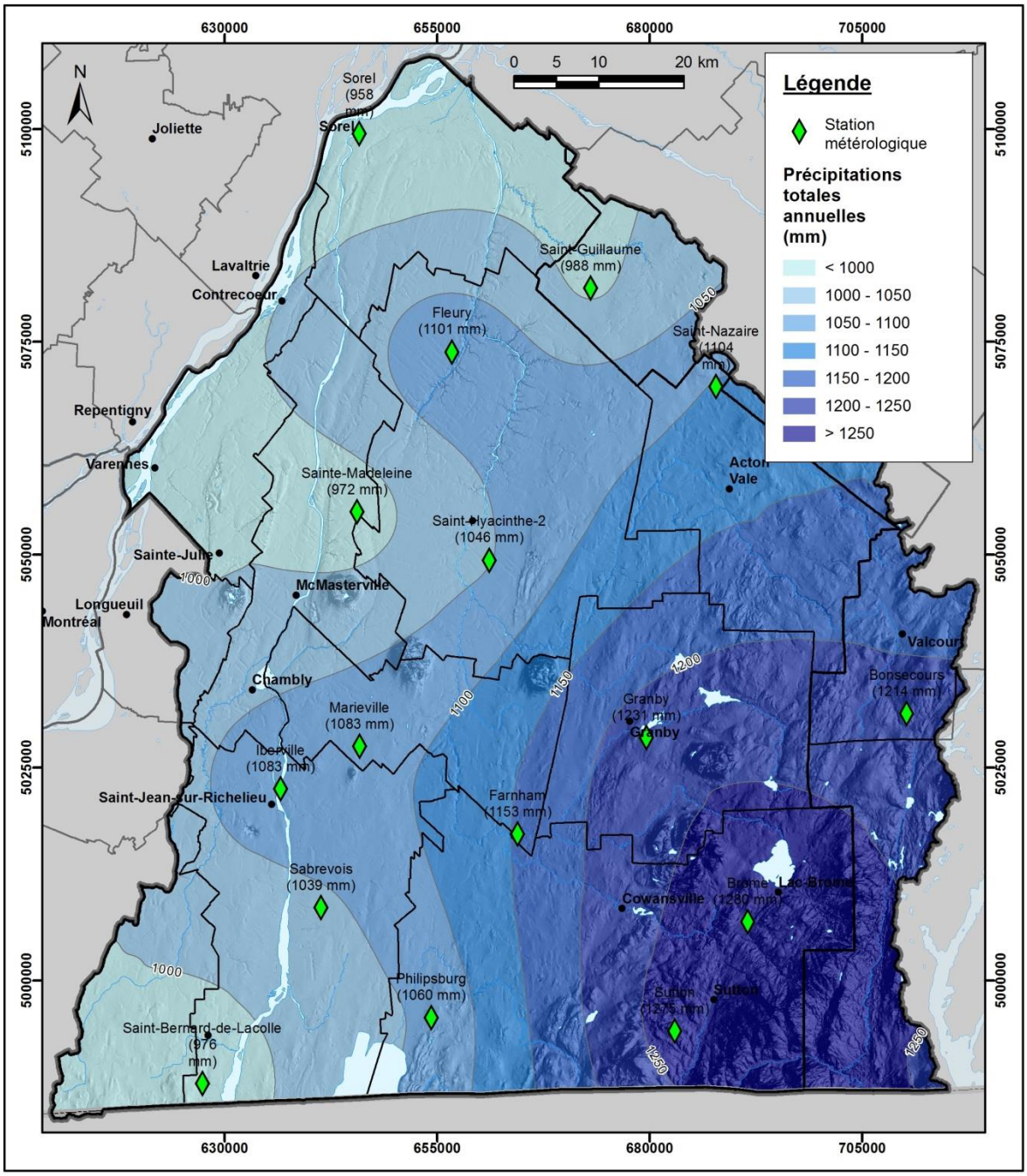


Figure 1.3 : Précipitations totales annuelles moyennes interpolées (période 1970-2000)

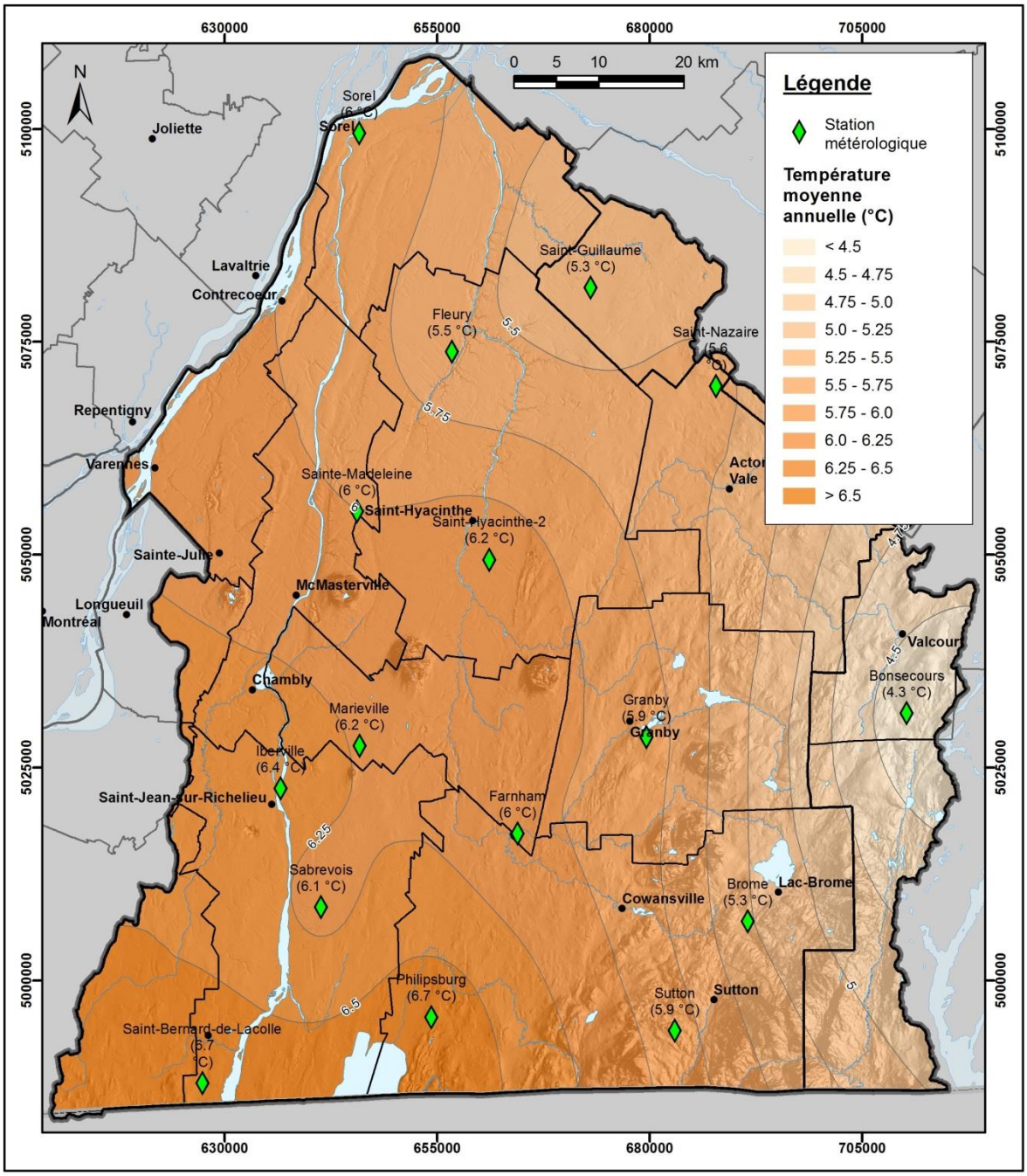


Figure 1.4 : Température moyenne annuelle interpolée (période 1970-2000)

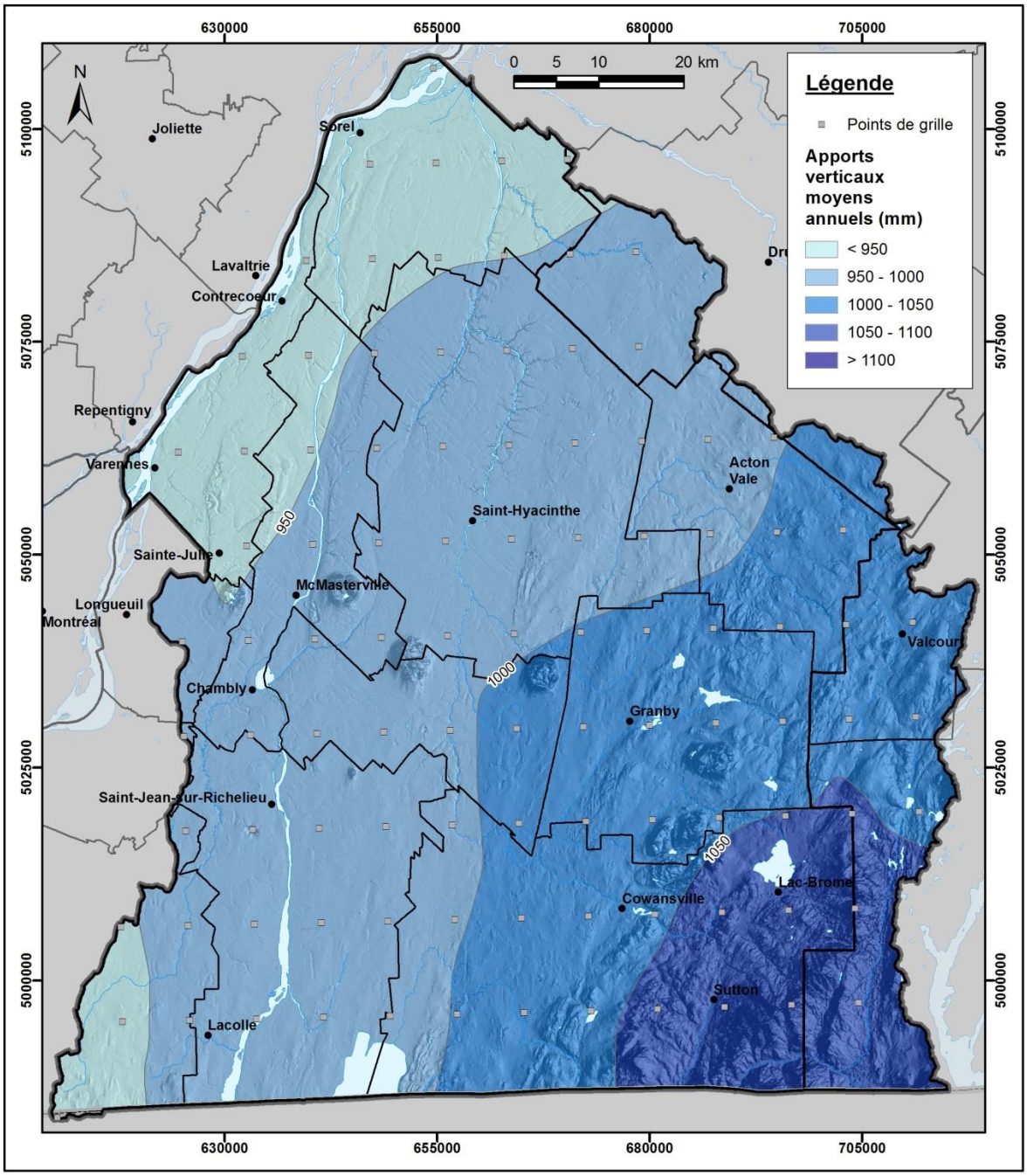


Figure 1.5 : Apports verticaux annuels moyens interpolés (période 1900-2010) (Poirier et al., 2012)

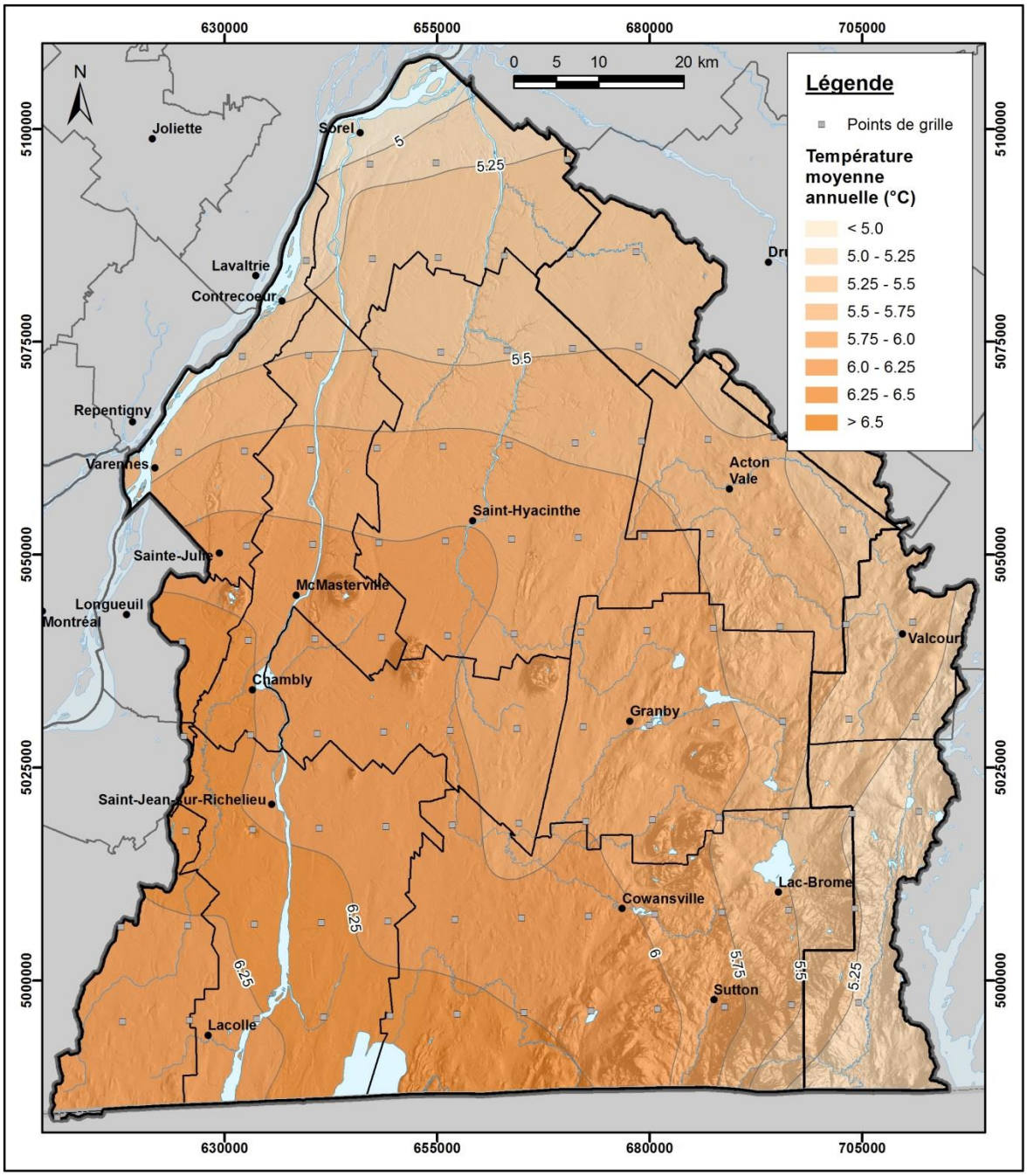


Figure 1.6 : Température moyenne annuelle interpolée (période 1900-2010) (Poirier et al., 2012)

Par ailleurs, les données quotidiennes acquises pour les stations actives ont notamment permis d'évaluer la tendance régionale pour les variations interannuelles des précipitations. En considérant les données des stations actives, on observe une légère tendance à la hausse pour les précipitations totales (figure 1.7). Une tendance similaire est observée pour la température moyenne annuelle bien qu'elle ne soit pas illustrée. En plus de cette tendance à long terme, on peut aussi distinguer sur la figure 1.7 des fluctuations de l'ordre de la décennie illustrant notamment la période de sécheresse vers la fin des années 1980. Ces données ont également été utilisées pour l'évaluation de la recharge et des différentes composantes d'un bilan hydrique.

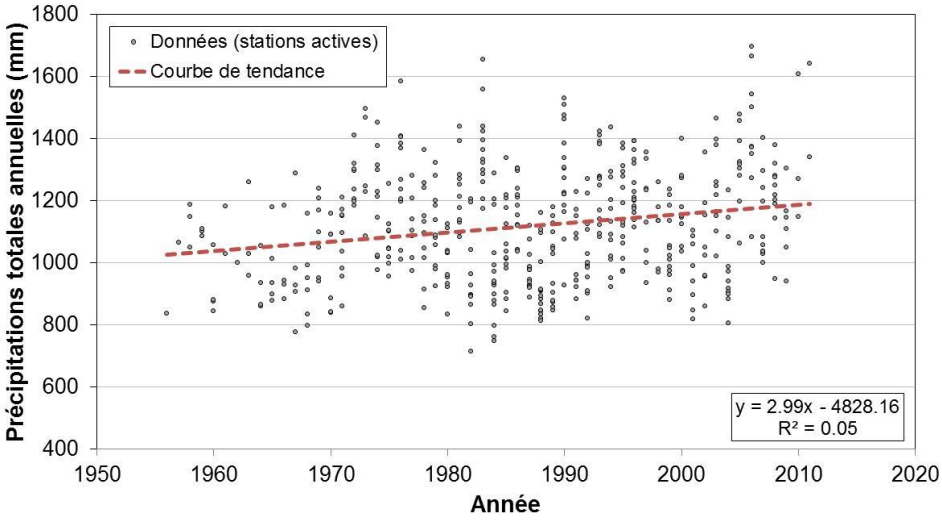


Figure 1.7 : Tendance à long terme pour les données de précipitations totales annuelles

Finalement, certaines données de deux stations météorologiques d'Environnement Canada ont également été utilisées dans le cadre de l'évaluation de la recharge. Ces stations ne sont pas présentées sur le livrable 27 puisqu'elles sont situées à l'extérieur de la zone d'étude, soit à Sherbrooke (station 7028124) et à Longueuil (Saint-Hubert) (station 7027320). Les normales climatiques de ces stations pour la vitesse du vent et l'humidité relative ont notamment été utilisées.

1.5.2.3 Hydrographie et bassins versants

Le réseau hydrographique, présenté au livrable 5 (annexes 1 et 2), est tiré du Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) développé par la Direction du Patrimoine écologique et des Parcs (DPEP) du MDDEFP (MDDEFP, 2011a). Le CRHQ est un réseau hydrographique structuré construit à partir du modèle altimétrique numérique (MAN), aussi fourni par la DPEP. Les bassins versants à l'échelle 1/20 000 ont été fournis par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2012). Les bassins de niveau 1 et 2, ainsi que certains bassins de niveau 3, sont présentés au livrable 6. A noter que les limites du bassin versant de la rivière Richelieu ont été modifiées afin de distinguer le bassin de la baie Missisquoi.

Tel que mentionné plus haut, trois grands bassins versants sont présents en Montérégie Est, soit ceux des rivières Richelieu et Yamaska et de la baie Missisquoi. Les bassins de la rivière Richelieu et de la baie Missisquoi sont transfrontaliers avec les Etats-Unis et ne sont donc que partiellement inclus dans la zone d'étude. Le bassin de la rivière Yamaska est, quant à lui, complètement inclus dans la zone d'étude. Le tableau 1.7 présente les superficies des principaux bassins et sous-bassins de la zone d'étude, calculées à partir des limites de bassins versants obtenues du CEHQ (2012) pour le Québec et du "United States Department of Agriculture" (USDA, 2003) pour les États-Unis. Les superficies totales des bassins ainsi que celles comprises dans la zone d'étude sont indiquées dans le tableau.

En Montérégie Est, le réseau hydrographique naturel est généralement plus dense dans la région des Appalaches que dans celle de la Plate-forme du Saint-Laurent, notamment à cause du relief plus accentué des Appalaches. Toutefois, ce réseau hydrographique est également caractérisé par la présence de drains agricoles, particulièrement dans la région de la Plate-forme du Saint-Laurent. Ce drainage agricole peut influencer de façon significative le régime hydrique et la qualité de l'eau de surface (voir sections 6.1 et 6.5).

Tableau 1.7 : Liste des principaux bassins versants en Montérégie Est

Bassin versant (niveau 1)	Sous-bassin (niveaux 2 et 3)		Superficie (km²) [1]		% dans la zone d'étude
			Totale [2]	Zone d'étude [3]	
Yamaska	à la Barbue		137	137	100 %
	Chibouet		177	177	100 %
	David		323	323	100 %
	Noire	Jaune	79	79	100 %
		le Renne	360	360	100 %
		Mawcook	192	192	100 %
		Total (Noire)	1582	1582	100 %
	Pot-au-Beurre		210	210	100 %
	Salvail		199	199	100 %
	Sud-Ouest		115	115	100 %
	Yamaska Nord		292	292	100 %
	Yamaska Sud-Est		415	415	100 %
	Total (Yamaska)		4 788	4 788	100 %
Richelieu	Amyot		94	94	100 %
	Beloeil		103	103	100 %
	Coderre		88	88	100 %
	des Hurons		336	336	100 %
	du Sud		152	152	100 %
	L'Acadie		557	556	99 %
	Lacolle		126	124	98 %
	Laplante		112	112	100 %
	Total (Richelieu) [3]		20 587	2 537	12.3 %
Baie Missisquoi [4]	aux Brochets		662	554	83.7 %
	de la Roche		146	48	32.9 %
	Missisquoi	Missisquoi Nord	284	284	100 %
		Sutton	168	164	97.6 %
		Total (Missisquoi)	2 233	653	29.2 %
	Total (Baie Missisquoi)		3 113	1 358	43.6 %

Notes :

[1] : Les superficies incluent les sous-bassins de niveau 4 à 6 même si ceux-ci ne sont pas indiqués dans le tableau

[2] : Les superficies totales comprennent les portions de bassin versant situées aux États-Unis

[3] : La superficie totale du bassin versant de la rivière Richelieu inclut les superficies des sous-bassins du lac Champlain, à l'exception du sous-bassin de la baie Missisquoi présenté séparément

[4] : Le bassin versant de la baie Missisquoi est un sous-bassin du bassin de la Rivière Richelieu; il est toutefois présenter ici comme un bassin de niveau 1 compte tenu de son rôle régional et de ses caractéristiques relativement différentes de celles du bassin de la rivière Richelieu (pour la portion située au Québec)

Tableau 1.8 : Liste des principaux plans d'eau en Montérégie Est

Bassin versant	Plan d'eau	Superficie (km²)	Profondeur (m)	Exutoire
Baie Missisquoi	Baie Missisquoi	46.4 (1)	4.5	Riv. Richelieu
	Lac d'Argent	1	16	Riv. Missisquoi
	Lac Long	0.6	11	Riv. Missisquoi
	Lac Orford	1.2	48	Riv. Missisquoi
	Lac Selby	1.2	10	Riv. aux Brochets
	Lac Trousers	0.6	12	Riv. Missisquoi
Richelieu	Bassin Chambly	4.7	7	Riv. Richelieu
Yamaska	Lac Boivin	1.8	6	Riv. Yamaska Nord
	Lac Brome	14.6	13	Riv. Yamaska Nord
	Lac Davignon	1.1	8	Riv. Yamaska Sud-Est
	Lac Roxton	1.9	6	Riv. Mawcook
	Lac Waterloo	1.4	5	Riv. Yamaska Nord
	Réservoir Choinière	4.5	17	Riv. Yamaska Nord

Note :

(1) : La superficie indiquée n'inclut que la portion de la baie Missisquoi située au Québec

Au total, on dénombre plus de 5 500 plans d'eau sur le territoire à l'étude, dont les principaux sont le bassin Chambly, le lac Brome et la baie Missisquoi. Les autres plans d'eau d'importance en Montérégie Est incluent notamment le réservoir Choinière, le lac Roxton, le lac Boivin, le lac Waterloo, le lac Selby, le lac Orford, le lac Davignon, le lac d'Argent, le lac Long et le lac Trousers. Les plans d'eau utilisés pour l'alimentation en potable incluent la baie Missisquoi, le bassin Chambly, le réservoir Choinière ainsi que les lacs Boivin et Davignon. La superficie, la profondeur et l'exutoire de ces plans d'eau sont présentés au tableau 1.8 et proviennent respectivement des données du CRHQ (MDDEFP, 2011a) et des cartes bathymétriques du Gouvernement du Québec (MEQ, 1984; MRN, 1969; MRN, 1970; MRN, 1973a; MRN, 1973b; MRN, 1974; MRN, 1975; MTCP, 1967a; MTCP, 1967b; MTCP, 1969; MTCP, 1970).

Par ailleurs, environ 1150 cours d'eau désignés parcourent la Montérégie Est, les principaux étant les rivières Richelieu et Yamaska, s'écoulant généralement du sud au nord, et la rivière Missisquoi, s'écoulant globalement de l'est vers l'ouest. Cette dernière se déverse dans la baie Missisquoi qui fait partie du Lac Champlain et dont l'exutoire correspond à la rivière Richelieu. Outre la rivière Missisquoi, la baie Missisquoi draine également d'autres cours d'eau, notamment les rivières aux Brochets et de la Roche. Par ailleurs, les principaux affluents de la rivière Richelieu comprennent les rivières L'Acadie, Lacolle, des Hurons et du Sud tandis que ceux de la rivière Yamaska incluent les rivières Noire, Yamaska Sud-Est et Yamaska Nord. La rivière Richelieu est une voie navigable par l'entremise des canaux de Chambly et de Saint-Ours et la profondeur de son chenal varie généralement entre 4 et 8 m (COVABAR, 2009). Le tableau 1.9 présente la longueur, le débit et l'exutoire des principales rivières de la zone d'étude ; les informations présentées ont respectivement été obtenues du CRHQ (MDDEFP, 2011a) pour la longueur et du CEHQ (2010) pour les données hydrométriques, à l'exception des données de débits relatives aux stations 02OJ007 (Rapides Fryers, rivière Richelieu) et 04294000 (Swanton (VT), rivière Missisquoi) qui ont respectivement été obtenues d'Environnement Canada (Environnement Canada, 2011) et du United States Geological Survey (USGS, 2011).

Tableau 1.9 : Liste des principaux cours d'eau en Montérégie Est

Bassin versant	Cours d'eau	Longueur (km) [1]	Débit annuel moyen (m^3/s) [2]			
			Moyenne	Plage	Station	Période
Baie Missisquoi	aux Brochets	69	10.5	9.2-14.8	30424	2002-2009
	de la Roche	10 (37)	1	0.8-1.5	30425	2002-2009
	Missisquoi	24 (149)	51.8	33.3-75.4	04294000	1990-2011
	Missisquoi Nord	58	-	-	-	-
	Sutton	16 (19)	-	-	-	-
Richelieu	Amyot	8	-	-	-	-
	Beloeil	15	-	-	-	-
	Coderre	12	-	-	-	-
	des Hurons	23	5.1	2.8-10.6	30415	1974-2009
	du Sud	19	-	-	-	-
	L'Acadie	85	4.5	2.1-7.3	30421	1979-2009
	Lacolle	24	-	-	-	-
	Laplante	4	-	-	-	-
	Richelieu	129	360.1	39.9-1550	02OJ007	1938-2011
Yamaska	à la Barbue	23	-	-	-	-
	Chibouet	33	2.3	1.5-3.7	30344	1988-1998
	David	54	5.6	3.1-11.5	30316	1969-2009
	Jaune	13	0.8	0.2-1.3-	30333	1978-1986
	Le Renne	53	-	-	-	-
	Mawcook	28	-	-	-	-
	Noire	113	25.9	15.5-41.3	30304	1965-2009
	Pot-au-Beurre	27	-	-	-	-
	Salvail	29	2.9	2.1-4.2	30328	1972-1978
	Sud-Ouest	12	0.9	0.2-1.8	30322	1972-1982
	Yamaska	168	60.8	33.1-93.1	30345	1995-2009
	Yamaska Nord	59	5.0	3.3-7.5	30340	1984-2009
	Yamaska Sud-Est	49	8.3	4.9-14.2	30337	1981-1990

Note :

[1] : Les longueurs représentent la somme des tronçons dont l'ordre de Strahler est égal ou supérieur à 2; les valeurs spécifiées entre parenthèses représentent les longueurs totales incluant les tronçons situés à l'extérieur de la zone d'étude.

[2] : Les débits moyens annuels ont été calculés à partir des données hydrométriques pour les stations les plus en aval du cours d'eau considéré.

A noter que les débits indiqués dans le tableau 1.9 sont des débits annuels moyens et que les variations de débits observées sur une base journalière peuvent être beaucoup plus importantes. Les débits indiqués peuvent également être influencés par la présence de barrages, ce qui est notamment le cas pour les rivières L'Acadie, aux Brochets, Lacolle, Missisquoi Nord, Noire, Sutton, Yamaska, Yamaska Nord, Yamaska Sud-Est et Richelieu. Par ailleurs, étant donné l'emplacement des stations hydrométriques disponibles, les débits indiqués au tableau 1.9 ne sont pas toujours représentatifs des débits réels des cours d'eau à leur

exutoire, qui peuvent être plus élevés ; c'est notamment le cas des rivières Richelieu et Yamaska dont les débits à l'exutoire sont respectivement estimés à 374 m³/s et 87 m³/s (Berryman, 2008).

Trois organismes de bassin versant (OBV) assurent la gestion intégrée de l'eau pour les trois grands bassins du territoire à l'étude, soient l'Organisme de bassin versant de la Yamaska (OBV Yamaska, anciennement COGEBY), le Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu (COVABAR) et la Corporation de bassin versant de la baie Missisquoi (CBVBM). Une description sommaire de ces bassins est présentée ci-dessous mais un portrait plus détaillé est disponible via les plans directeurs de l'eau des OBV (COGEBY, 2009 ; COVABAR, 2009 ; OBVBM, 2011) :

Bassin de la rivière Yamaska :

La rivière Yamaska prend sa source principale dans le lac Brome et se déverse dans le fleuve Saint-Laurent plus de 160 km en aval, à la hauteur du lac Saint-Pierre. Le bassin versant de la rivière Yamaska couvre une superficie de 4 788 km² et est drainé par trois principaux tributaires : les rivières Noire, Yamaska Nord et Yamaska Sud-Est. Il est bordé à l'est par le bassin de la rivière Saint-François, à l'ouest par le bassin de la rivière Richelieu, au nord par le bassin du fleuve Saint-Laurent et au sud par le bassin de la baie Missisquoi. L'écoulement de l'eau se fait généralement d'est en ouest pour les sous-bassins de la rivière Noire et de la haute-Yamaska (qui inclut les rivières Yamaska Nord et Yamaska Sud-Est) et du sud au nord pour le sous-bassin de la basse-Yamaska (qui correspond à la partie en aval de l'exutoire de la rivière Noire). L'utilisation du territoire y est principalement agricole (55 %) et forestière (35 %). La rivière Yamaska se mérite le très peu enviable titre d'affluent du fleuve Saint-Laurent le plus pollué. La qualité de l'eau y est identifiée par le MDDEFP de mauvaise à très mauvaise sur une portion importante de la rivière (Berryman, 2008) (section 5.4.2). Plusieurs municipalités ont des prises d'eau potable dans les cours d'eau ou plans d'eau du bassin, notamment Acton Vale, Ange–Gardien, Bonsecours, Bromont, Cowansville, Farnham, Granby, Saint-Damase, Saint-Hyacinthe, Saint-Hugues, Saint-Pie et Valcourt.

Bassin de la rivière Richelieu :

La superficie totale du bassin versant de la rivière Richelieu, incluant le lac Champlain et ses affluents, est d'environ 23 700 km², dont 88 % se trouvent du côté des États-Unis. Le sous-bassin de la rivière Richelieu représentant la portion aval du lac Champlain draine une superficie de 2 537 km². La rivière s'écoule principalement du sud au nord sur une distance de 129 km, de la frontière américaine jusqu'au fleuve Saint-Laurent, soit à l'embouchure du lac Saint-Pierre. A l'est et à l'ouest, on retrouve respectivement les bassins des rivières Yamaska et Châteauguay. Environ 68 % du territoire est agricole ; les zones urbaines et la forêt occupent respectivement 10 et 18 %. L'eau du bassin versant de la rivière Richelieu est généralement de meilleure qualité dans la partie amont que dans la partie aval du bassin ; elle varie de bonne, dans certains secteurs, à très mauvaise sur certains tronçons, notamment à l'embouchure de la rivière Richelieu (Simoneau et Thibault, 2009) (section 5.4.2). Plusieurs municipalités ont des prises d'eau potable dans la rivière, notamment Beloeil, Chambly, Saint-Jean-sur-Richelieu et Sorel-Tracy.

Bassin de la baie Missisquoi :

Le bassin versant de la baie Missisquoi correspond à un sous-bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Il draine 3 113 km^2, s'étendant au Vermont (56 %) et au Québec (44 % pour 1 358 km²). Il est bordé par les bassins des rivières Yamaska au nord et Saint-François à l'est ; au sud et à l'ouest, on retrouve des sous-bassins du lac Champlain) et de la rivière Richelieu.

Les principaux cours d'eau du bassin incluent les rivières aux Brochets et Missisquoi, dont les sources se situent toutes deux dans l'état du Vermont aux États-Unis. Du côté québécois, l'utilisation du territoire du bassin de la baie Missisquoi est principalement forestière (56 %) et agricole (33 %). Les secteurs plus vallonnés du centre et de l'est sont dominés par la forêt tandis que les activités agricoles sont surtout concentrées dans la partie ouest du bassin, à proximité de la baie Missisquoi. La qualité de l'eau des cours d'eau du secteur ouest varie de très mauvaise à douteuse selon le MDDEFP (Simoneau, 1993). La forte concentration des activités agricoles dans cette partie du bassin est en partie à l'origine de pollution diffuse affectant la qualité de l'eau de la baie et des cours d'eau qui s'y déversent. La baie Missisquoi constitue une source d'approvisionnement en eau potable pour quelques municipalités, notamment celles de Saint-Armand et Bedford.

1.5.2.4 Hydrométrie et débit de base

Les stations hydrométriques (ou stations de jaugeage) dont les données ont été obtenues dans le cadre du projet sont illustrées sur le livrable 27 à l'annexe 2 ainsi qu'avec le livrable 5 à l'annexe 1. Les stations sont gérées, pour la plupart, par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2010), mais l'IRDA possède également deux stations hydrométriques dans la baie Lavallière et Environnement Canada (2011b) possède aussi une station active avec mesure de débit sur la rivière Richelieu. A noter que d'autres stations d'Environnement Canada sont présentes dans la zone d'étude (principalement sur la rivière Richelieu) mais que leurs données n'ont pas été utilisées pour différentes raisons (ex. : stations inactives, stations avec données manquantes ou avec données de niveau d'eau plutôt que données de débit). La figure 1.8 présente les stations hydrométriques de zone d'étude avec les bassins (ou portions de bassin) jaugés par ces stations. La couverture spatiale de ces stations est plutôt bonne, mais aucune station n'est située à l'exutoire de rivières importantes (ex. : Richelieu ou Yamaska).

Les tableaux 1.10 et 1.11 présentent respectivement les stations hydrométriques mesurant le débit et celles mesurant le niveau d'eau des cours d'eau. Pour les stations présentes dans la zone d'étude, ces deux tableaux présentent les informations suivantes : coordonnées, altitude et périodes pour lesquelles des données de débit ou de niveau d'eau sont disponibles, statistiques sur les données de débit ou de niveau d'eau, aire drainée par le cours d'eau, régime du cours d'eau (naturel ou influencé mensuellement ou journalièrement) et statut de la station. Parmi les 49 stations disponibles, 21 stations sont actives. Pour certaines de ces stations, des débits de base estimés par le CEHQ à l'aide de la méthode de séparation d'hydrogramme d'Eckhardt (2005) ont également été obtenus (Poirier, 2012) (voir tableau 1.10).

Pour les stations assurant le suivi des cours d'eau à régime naturel, les statistiques présentées au tableau 1.10 indiquent des débits de base estimés variant entre 18 et 35 % du débit total. Ces estimés de débits de base correspondent à la portion de l'eau souterraine alimentant les cours d'eau et sont utilisés pour fins de comparaison lors de l'évaluation de la recharge (sections 4.3, 6.1 et 6.3).

1.5.2.5 Couverture végétale

Les différents types de peuplements forestiers sont présentés sur le livrable 8. Les données sont issues du Système d'information écoforestière (SIEF) du Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN, 2003).

Le couvert forestier occupe environ le tiers de la zone d'étude (33.5 %). Sur le livrable 8, les peuplements forestiers ont été regroupés en trois classes afin de simplifier la représentation cartographique : peuplements feuillus, résineux et mélangés (mixte). Les feuillus occupent la plus grande partie du couvert forestier avec 22.1 % de la zone d'étude, dont plus de la moitié

correspond à des érablières. La forêt mixte domine ensuite, avec 9.0 % du territoire, suivi des conifères avec 2.4 %. Le tableau 1.12 détaille les types de peuplements forestiers et leur superficie respective pour la zone d'étude.

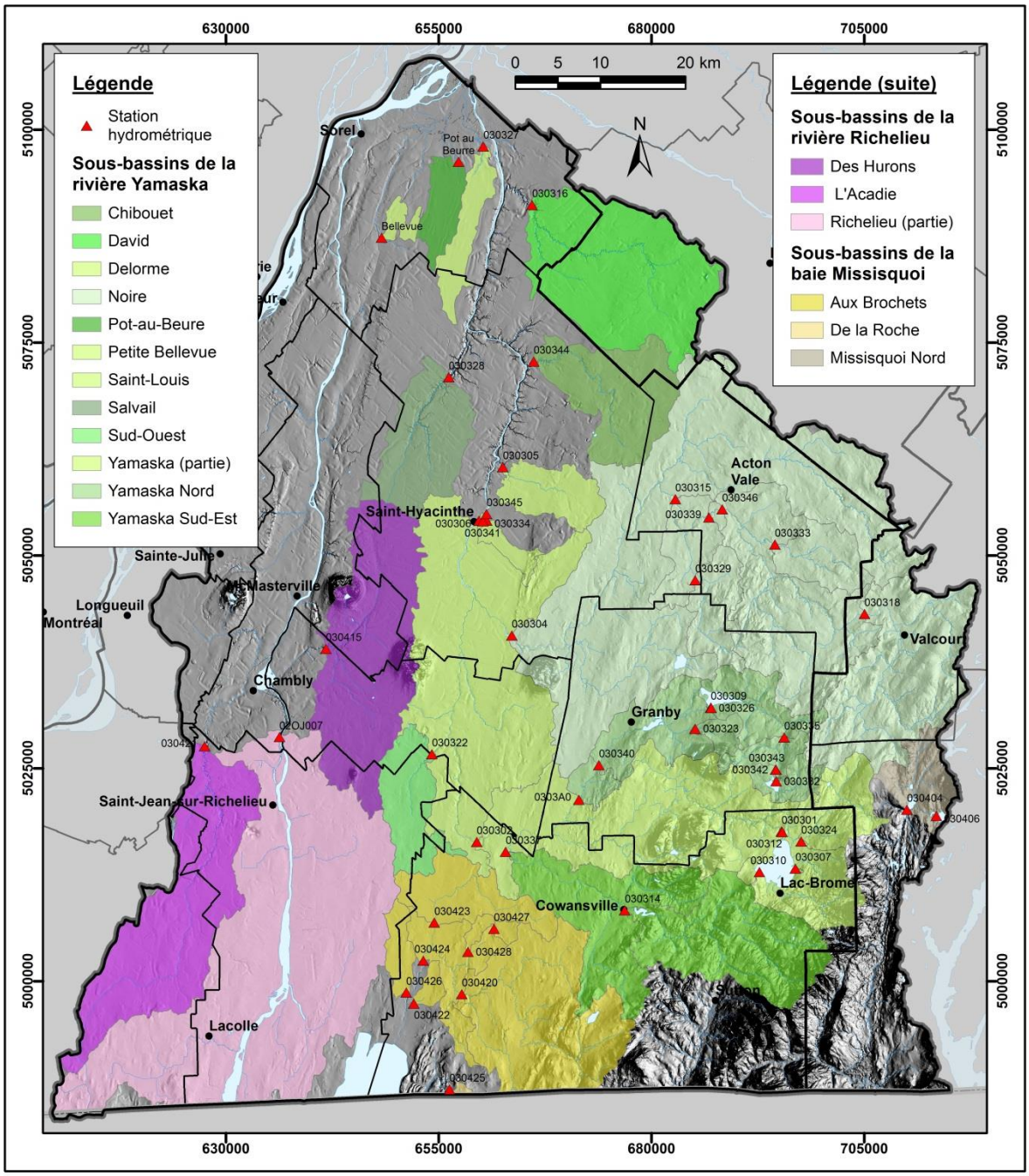


Figure 1.8 : Localisation des stations hydrométriques et des bassins jaugés

Tableau 1.10 : Liste des stations hydrométriques avec mesures de débit

Cours d'eau	Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période	Débit moyen (m³/s)		Débit de base (m³/s)		Aire (km²)	Régime	Statut
						Moyenne	Plage	Moyenne	Plage			
Yamaska	030301	45.285	-72.5098	186.6	1925-1973	3.9	1.3-6.5	-	-	113.5	Influencé (m)	Inactive
Yamaska	030302	45.283	-72.9662	58.8	1929-2009	22.9	11.4-36.3	-	-	1223.2	Influencé (m)	Active
Noire	030304	45.5	-72.9058	34.7	1965-2009	25.9	15.5-41.3	5.3	3.2-10.7	1508.3	Influencé (j)	Active
Delorme	030305	45.678	-72.9126	22.9	1966-1978	1.3	0.2-3	0.32	0.04-0.66	83.5	Naturel	Inactive
Yamaska Nord	030309	45.418	-72.6099	139.9	1968-2009	2.8	1.7-4.5	-	-	131.1	Influencé (m)	Active
Yamaska Sud-Est	030314	45.206	-72.7476	104.7	1968-2009	4.6	1.3-8.5	-	-	212.2	Influencé	Active
Noire	030315	45.639	-72.654	59.9	1969-1972	11	7.6-13.2	-	-	731.5	Naturel	Inactive
David	030316	45.954	-72.8579	15.5	1969-2009	5.6	3-11.5	1.4	0.8-4.5	323.2	Naturel	Active
Noire	030318	45.511	-72.3748	190.5	1970-1978	7	3.1-12.8	2.4	0.6-5.3	270.7	Naturel	Inactive
Sud-Ouest	030322	45.376	-73.0301	32.8	1972-1982	0.9	0.2-1.8	-	-	91.3	Naturel	Inactive
Rivière 03034015	030323	45.396	-72.6343	152.3	1972-1980	0.3	0.2-0.6	-	-	17.2	Naturel	Inactive
Quilliams	030324	45.273	-72.4807	199	1972-1978	1.3	0.9-1.6	-	-	70.4	Naturel	Inactive
Saint-Louis	030327	46.017	-72.9296	11.1	1972-1979	0.8	0.4-1.6	-	-	47.5	Naturel	Inactive
Salvail	030328	45.774	-72.9907	16.8	1972-1978	2.9	2.1-4.2	-	-	148.4	Naturel	Inactive
Runnels	030329	45.553	-72.6278	80	1972-1986	0.7	0.1-3.2	-	-	68.1	Naturel	Inactive
Jaune	030333	45.588	-72.5062	95.9	1978-1986	0.8	0.2-1.3	-	-	65.8	Naturel	Inactive
Yamaska	030334	45.622	-72.939	25.5	1977-1983	67.8	32-96.9	-	-	3341.4	Influencé (j)	Inactive
Yamaska Nord	030335	45.384	-72.5012	196.2	1979-1997	1.2	0.8-1.6	0.39	0.26-0.63	58.8	Influencé (j)	Inactive
Yamaska Sud-Est	030337	45.271	-72.9235	69.1	1981-1990	8.3	4.9-14.2	2.1	1.2-3.3	412.7	Influencé (j)	Inactive
Noire	030339	45.619	-72.6043	77.1	1981-1997	10.5	7.7-14.8	3.1	2.2-4	598.7	Naturel	Inactive
Yamaska Nord	030340	45.36	-72.7802	80.4	1984-2009	5	3.3-7.5	2.9	2-5.7	236.1	Influencé (j)	Active
Yamaska	030341	45.621	-72.9451	25.9	1984-1994	52.4	32.1-82	27.9	15.7-71.1	3321.7	Influencé (j)	Inactive
Yamaska Nord	030343	45.35	-72.5154	203	1985-2009	0.6	0.4-0.9	0.14	0.07-0.54	31.3	Influencé (j)	Active
Chibouet	030344	45.789	-72.8618	17.8	1988-1998	2.3	1.5-3.7	-	-	161.9	Naturel	Inactive
Yamaska	030345	45.629	-72.9391	29.5	1995-2009	60.8	33-93.1	21.4	13.4-31	3365.5	Influencé (j)	Active
Noire	030346	45.627	-72.5839	76.7	1996-2003	8.8	3.5-12.1	-	-	593.6	Naturel	Inactive
Yamaska Nord	0303A0	45.324	-72.8118	77.3	1976-1983	5	4-5.6	3.5	2.7-4	257	Influencé (j)	Inactive
Des Hurons	030415	45.491	-73.1858	19.4	1974-2009	5.1	2.8-10.6	0.94	0.6-1.5	308.3	Naturel	Active

Tableau 1.10 : Liste des stations hydrométriques avec mesures de débit (suite)

Cours d'eau	Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période	Débit moyen (m³/s)		Débit de base (m³/s)		Aire (km²)	Régime	Statut
						Moyenne	Plage	Moyenne	Plage			
Aux Brochets	030420	45.122	-72.9943	49.2	1979-2009	6.8	3.8-10.5	1.4	0.8-2	396.7	Naturel	Active
L'Acadie	030421	45.39	-73.3709	26.4	1979-2009	4.5	2.1-7.3	1.1	0.52-1.6	368.1	Naturel	Active
Au Castor	030422	45.114	-73.0662	33.3	1998-2007	0.2	0.1-0.3	0.04	0.01-0.08	11.9	Naturel	Inactive
Morpions	030423	45.198	-73.0328	43.3	1999-2009	1.6	1-4.2	0.42	0.29-0.57	94.4	Naturel	Active
Aux Brochets	030424	45.159	-73.0507	39.2	2002-2009	10.5	9.2-14.8	1.9	0.8-2.9	585.8	Naturel	Active
De la Roche	030425	45.022	-73.0162	55.1	2002-2009	1	0.8-1.5	-	-	73	Naturel	Active
Ewing	030426	45.125	-73.0773	34.7	2002-2009	0.4	0.3-0.6	0.08	0.06-0.11	26.4	Naturel	Active
Wallbridge	030427	45.19	-72.9439	72.6	2002-2006	0.1	0.1-0.2	-	-	6.3	Naturel	Inactive
Wallbridge	030428	45.167	-72.9834	60.2	2002-2006	0.2	0.1-0.2	-	-	7	Naturel	Inactive
Pot-au-Beurre	0303BE	46.002	-72.9677	18.6	2009-2009	-	-	-	-	45.4	Naturel	Active
Petite Bellevue	0303PB	45.924	-73.0874	14.9	2009-2009	-	-	-	-	14.5	Naturel	Active
Richelieu (Fryers)	02OJ007	45.398	-73.2583	-	1938-2011	360.1	39.9-1550	-	-	19 456	Influencé	Active

Tableau 1.11 : Liste des stations hydrométriques avec mesures de niveau

Cours d'eau	Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période	Niveau moyen (m)		Aire (km²)	Régime	Statut
						Moyenne	Plage			
Yamaska	030306	45.622	-72.9508	29.9	1966-2002	27	25.8-29	3310	Influencé	Inactive
Lac Brome	030307	45.245	-72.4907	193.7	1966-1995	196.7	196-197.6	188	Influencé	Inactive
Lac Brome	030310	45.243	-72.5446	190.1	1947-1965	1.5	0.6-2.5	188	Influencé	Inactive
Lac Brome	030312	45.284	-72.5087	190.1	1935-1956	13.4	12-14.1	188	Influencé	Inactive
Yamaska Nord	030326	45.417	-72.6096	148.4	1977-2009	142.2	139.3-144	137	Influencé	Active
Lac Waterloo	030332	45.338	-72.5152	202	1977-2009	96.8	96.4-97.6	30.5	Influencé	Active
Lac Waterloo	030342	45.35	-72.5154	203	1984-2009	208	207-208.4	30.5	Influencé (j)	Active
Lac d'Argent	030404	45.303	-72.3209	243	1968-1973	30	29.4-30.7	65.1	Naturel	Inactive
Lac Orford	030406	45.296	-72.2773	300.8	1970-1982	30	29.4-30.6	8.6	Naturel	Inactive
Lac Champlain	02OH001	45.04	-73.0797	-	1964-2011	-	-	-	Influencé	Active
Richelieu (St-Jean)	02OJ016	45.302	-73.25	-	1972-2011	-	-	-	Influencé	Active

Tableau 1.12 : Types et superficies des peuplements forestiers

Peuplement forestier	Sous-catégorie	Superficie (km²)	Proportion de la zone d'étude (%)
Feuillu (> 75 % de la surface)	Bétulaie à bouleaux blancs	88.9	1
	Bétulaie à bouleaux jaunes	3.2	< 0.1
	Érablière	1 233	13.6
	Feuillus indifférenciés	569.9	6.3
	Peupleraie	98.6	1.1
	Total (feuillu)	1 993.6	22.1
Mélangé (25-75 % de résineux)	Bétulaie à bouleaux blancs avec résineux	48.2	0.5
	Bétulaie à bouleaux jaunes avec résineux	16.1	0.2
	Érablière avec résineux	372.9	4.1
	Feuillus indifférenciés avec résineux	223.3	2.5
	Peuplements mélangés indifférenciés	107.5	1.2
	Peupleraie avec résineux	36.6	0.4
	Plantation de résineux envahie de feuillus	3.8	< 0.1
	Total (mélangé)	808.4	9.0
Résineux (> 75 % de la surface)	Cédrière	30.5	0.3
	Mélèzaie	11.5	0.1
	Pessière	17.3	0.2
	Pinède	19	0.2
	Plantation de résineux	19	0.2
	Prucheraie	14.4	0.2
	Résineux indifférenciés	48	0.5
	Sapinière	61.7	0.7
	Total (résineux)	221.4	2.4
Total		3 023.4	33.5

1.5.2.6 Milieux humides

Le livrable 9 présente la localisation et la différenciation des milieux humides. Ceux-ci ont également été intégrés au livrable 7 (Occupation du sol), mais sans différenciation et à l'intérieur de la classe « friche » incluant les sites dénudés ou semi-dénudés secs et humides. Les données sur les milieux humides de la Montérégie ont été obtenues de Géomont et sont le fruit d'un projet conjoint entre Canards Illimités Canada et Géomont. Les données sur les milieux humides de l'Estrie et du Centre-du Québec ont été obtenues du MDDEFP. Les différents types de milieux humides illustrés sur le livrable 9 sont résumés au tableau 1.13 avec leur superficie respective. La définition complète de chaque type est disponible dans le rapport synthèse sur la cartographie de base des milieux humides de la Montérégie (Géomont, 2008). Au total, les milieux humides couvrent 4.4 % du territoire à l'étude. Les marécages, marais, tourbières boisées et milieux humides potentiels sont proportionnellement plus importants que les autres types de milieux humides dans la zone d'étude avec 37.3 %, 16.3 %, 17.9 % et 21.1 %, respectivement. Les milieux humides potentiels sont toutefois surreprésentés étant donné qu'ils constituent présentement la seule classe de milieu humide en Estrie, où la cartographie détaillée

des milieux humides est en révision. Les zones d'eau peu profonde, les prairies humides et les tourbières « bog » et « fen » couvrent quant à elles les 7.3% restants de la zone d'étude.

Tableau 1.13 : Types et superficies des milieux humides

Type de milieu humide		Superficie (km²)	Proportion (%)	
			Milieux humides	Zone d'étude
Eau peu profonde		112.4	2.9	0.1
Marais		67.8	16.3	0.7
Marécage		155.5	37.3	1.7
Milieu humide potentiel		88.2	21.1	0.9
Prairie humide		0.3	0.06	< 0.01
Tourbière	Tourbière « bog »	17.9	4.3	0.2
	Tourbière boisée	74.6	17.9	0.8
	Tourbière « fen »	0.6	0.1	0.01
Total		417.3	100	4.4

Les milieux humides se retrouvent dispersés dans la région d'étude, mais on distingue quelques milieux humides plus importants en termes de superficie. Dans le bassin de la rivière Yamaska, on y trouve notamment les milieux humides de la baie Lavallière à l'embouchure de la rivière Yamaska, le marais du lac Boivin à proximité de Granby, les milieux humides à l'embouchure du ruisseau Quilliams (affluent du lac Brome), les milieux humides alimentant la rivière des Écossais (affluent de la rivière Yamaska à Farnham et Sainte-Brigide-d'Iberville), la tourbière de Saint-Joachim-de-Shefford alimentant le ruisseau Castagne (affluent de la rivière Noire) et les tourbières Béthanie et Sainte-Christine à la tête d'affluents de la rivière Jaune. Quant aux bassins versant de la rivière Richelieu et de la Baie Missisquoi, on y retrouve notamment les marécages au pourtour de la baie Missisquoi (entre autre au nord, à l'embouchure de la rivière aux Brochets), les tourbières de Sainte-Sabine à la tête du ruisseau Morpions (affluent de la rivière aux Brochets), le marécage de Bedford le long du cours d'eau Thompson (affluent de la rivière aux Brochets), les marais et marécages aux abords des rivières du Sud et Richelieu (portion sud, dans le secteur de Henryville et Saint-Paul-de-l'Ile-aux-Noix) ainsi que les tourbières boisées du secteur d'Hemmingford, Saint-Patrice-de-Sherrington, Saint-Cyprien-de-Napierville et Saint-Valentin. Bien que les relations potentielles entre les milieux humides et les eaux souterraines de la zone d'étude n'aient pas été établies dans le cadre de ce projet ou de travaux antérieurs, certains types de milieux humides peuvent, selon leur définition, être associés à des zones de résurgence (ex. : tourbière « fen ») ou des zones de recharge potentielles (ex. : tourbière « bog » selon la perméabilité du substrat de la tourbière). Des travaux spécifiques aux relations entre les milieux humides et les aquifères ont par ailleurs été réalisés dans le cadre d'un autre projet PACES dans le bassin de la rivière Bécancour.

1.5.2.7 Pédologie

La carte pédologique numérique présentée au livrable 11 a été constituée à partir des études pédologiques de comté publiées dans les différentes régions au fil des années, et à différentes échelles. L'assemblage des cartes pédologiques sous forme numérique a été réalisé par l'IRDA en conformité avec le Plan géomatique gouvernemental. Une description détaillée des séries de sols utilisées pour préparer le livrable 11 est disponible dans les rapports pédologiques indiqués au tableau 1.14 et accessibles sur le site internet de l'IRDA (IRDA, 2008).

Tableau 1.14 : Études pédologiques utilisées pour la cartographie pédologique

Numéro d'étude	Échelle	Comté
5	63 360	Bagot
7	63 360	Beauharnois-Huntingdon
9	63 360	Berthier
11	63 360	Brome-Missisquoi-Shefford
12	20 000	Chambly
16	63 360	Châteauguay
18	126 720	Compton-Richmond-Sherbrooke-Stanstead
20	63 360	Drummond
26	50 000	Iberville
31	50 000	Laprairie
32	63 360	L'Assomption-Montcalm
41	63 360	Montreal-Ile Jésus-Ile Bizard
42	50 000	Napierville
46	20 000	Richelieu
49	20 000	Rouville
51	20 000	St-Hyacinthe
52	50 000	St-Jean
57	20 000	Verchères
59	63 360	Yamaska
62	20 000	Ile Sainte-Thérese

Il est important de mentionner que, bien que la plupart des unités cartographiques identifiées sur les cartes numériques se composent souvent d'une seule série de sol, il arrive qu'une unité cartographique puisse représenter une combinaison de séries, identifiées suivant leur dominance respective. Les données provenant de la base de données des sols, disponible sur le site internet de l'IRDA (IRDA, 2008), ont également été annexées aux unités cartographiques. Cette base de données renferme de l'information au niveau de la famille de sols, tels que la granulométrie, l'ordre, le drainage ou le mode de dépôt mais aussi des résultats analytiques de certaines propriétés physiques et chimiques des couches de sols comme la densité apparente et la conductivité hydraulique. Une soixantaine d'études pédologiques ont également été consultées afin d'y extraire manuellement les profondeurs des sols et certains paramètres manquants puisque la base de données des sols ne contient pas toutes les séries de sols du Québec, ni l'épaisseur des différentes couches de sols. Toutes ces données ont permis de classifier et représenter chaque série de sols selon sept catégories de textures (sableux, loameux, argileux, graveleux, tills, organiques et autres) et sept classes de drainage (très rapidement drainé, rapidement drainé, bien drainé, modérément bien drainé, imparfaitement drainé, mal drainé et très mal drainé). Le tableau 1.15 résume les types de sol rencontrés dans la zone d'étude pour cette classification.

Les sols issus de till sont les plus répandus (32 %) dans la zone d'étude, particulièrement dans les Appalaches et la partie sud de la Plate-forme du St-Laurent. Les sols argileux couvrent environ 20 % de la zone d'étude et sont quant à eux principalement rencontrés dans la Plate-forme du St-Laurent et certaines vallées des Appalaches. Les sols sableux et loameux, qui

couvrent respectivement 19 % et 5 % de la zone d'étude, se retrouvent dans plusieurs contextes mais sont plus répandus dans la partie nord de la Plate-forme du St-Laurent. Les sols graveleux sont principalement rencontrés au pourtour des collines montérégiennes et dans la portion nord-ouest de la zone externe des Appalaches. Les sols organiques et les sols divers sont dispersés dans le reste du territoire et occupent respectivement 4.5 % et 13.8 % de la zone d'étude.

Tableau 1.15 : Types de sol rencontrés dans la zone d'étude

Type de sol	Classe de drainage	Superficie (km²)	Proportion de la zone d'étude (%)
Sols argileux	Bien drainé	9.7	0.1 %
	Modérément bien drainé	37.2	0.4 %
	Imparfaitement drainé	749.3	8.3 %
	Mal drainé	978.3	10.8 %
	Très mal drainé	27.9	0.3 %
	Total (argileux)	1 802.4	20 %
Sols loameux	Modérément bien drainé	109.5	1.2 %
	Imparfaitement drainé	2.4	0 %
	Mal drainé	450.9	5 %
	Total (loameux)	562.7	6.2 %
Sols sableux	Très rapidement drainé	33.4	0.4 %
	Bien drainé	224.8	2.5 %
	Modérément bien drainé	14.1	0.2 %
	Imparfaitement drainé	638.2	7.1 %
	Mal drainé	609.4	6.7 %
	Ne s'applique pas	204.4	2.3 %
	Total (sableux)	1 724.3	19.1 %
Sols graveleux	Très rapidement drainé	67.3	0.7 %
	Rapidement drainé	67	0.7 %
	Bien drainé	217.8	2.4 %
	Imparfaitement drainé	2.4	< 0.1 %
	Mal drainé	6.1	0.1 %
	Ne s'applique pas	1.3	< 0.1 %
	Total (graveleux)	361.8	4 %
Sols issus de dépôts de till	Rapidement drainé	62.3	0.7 %
	Bien drainé	1 465.5	16.2 %
	Modérément bien drainé	136.2	1.5 %
	Imparfaitement drainé	424.2	4.7 %
	Mal drainé	838.6	9.3 %
	Total (sols issus de till)	2 926.7	32.4 %
Sols divers	Bien drainé	23.3	0.3 %
	Ne s'applique pas	1 222.8	13.5 %
	Total (divers)	1 246.1	13.8 %
Sols organiques	Très mal drainé	407.9	4.5 %

1.5.3 Population et territoire

La population totale des municipalités inclues en partie ou en totalité dans la zone d'étude est présentée au tableau 1.16. Les chiffres ont été obtenus du décret de population de 2011 du ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec, et correspondent à l'estimation de la population au 1er juillet 2010 par l'Institut de la Statistique du Québec (MAMROT, 2010a). Les superficies totales des municipalités, obtenues du Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA) (MRN, 2012a) à l'échelle 1/20 000, sont également présentées dans ce tableau, de même que les densités de population municipale, calculées à partir des valeurs de population et superficie totale pour chaque municipalité.

La population totale de la zone d'étude est estimée à 792 635[1] habitants lorsqu'on considère toutes les municipalités inclues au moins en partie dans la zone d'étude, soient 148 municipalités et 2 territoires non organisés. La population totale des 9 MRC de la CRÉ Montérégie Est, qui comptent 106 municipalités totalement inclues dans la zone d'étude, est de 624 111 habitants, ce qui représente la troisième population en importance au Québec après celles de l'Île de Montréal et de la Capitale Nationale. Parmi les municipalités inclues au moins en partie dans la zone d'étude, on dénombre 30 municipalités avec une population supérieure à 5 000 habitants, représentant 21 % des municipalités et 79 % de la population totale estimée dans la zone d'étude (avec un peu plus de 625 000 habitants) ; parmi cette trentaine de municipalité, on compte 10 municipalités de plus de 20 000 habitants, soient Beloeil, Chambly, Granby, Longueuil, Saint-Bruno-de-Montarville, Sainte-Julie, Saint-Hyacinthe, Saint-Jean-sur-Richelieu, Sorel-Tracy et Varennes. Pour l'ensemble de la zone d'étude, la densité moyenne de la population est de 87.8 personnes/km² tandis que les valeurs minimales et maximales de densité à l'échelle municipale sont respectivement de 6.3 personnes/km² (Melbourne, MRC Le Val-Saint-François) et de 1918.8 personnes/km² (Longueuil, MRC Longueuil). Finalement, les taux de croissance de la population prévus pour la période 2006-2031 sont de 21.5 % pour la région de la Montérégie, de 11.4 % pour la région de l'Estrie et de 12.3 % pour la région du Centre-du-Québec (Institut de la statistique du Québec, 2009).

1.5.3.1 Utilisation du territoire

La carte de l'utilisation (ou occupation) du territoire présentée au livrable 7 a été préparée à l'aide de deux sources de données. La première source est la carte écoforestière du système d'information écoforestière (SIEF) (MRNF, 2003), qui constitue la carte de base. Toutefois, ce produit ayant pour but de décrire les peuplements forestiers, ces derniers comprennent plusieurs catégories alors que d'autres types d'utilisation du territoire sont moins détaillés. Les peuplements forestiers ont donc été regroupés en une seule catégorie afin de simplifier la manipulation et la représentation cartographique. De la même manière, certaines autres catégories d'utilisation du sol (ex. : parc industriel, mine, colonie de vacances, ...) ont été regroupées sous « zones industrielles » ou « aires de villégiature ». Les vergers ont été joints à la catégorie « terre agricole ». Cette couche de données vectorielles a ensuite été transformée en format matriciel à une résolution de 5 m et bonifiée avec les données de la Base de données des cultures assurées (BDCA) (FADQ, 2009), qui représentent les superficies agricoles cultivées. Comme seules les superficies assurées sont représentées dans la BDCA, le livrable 7 présente aussi des champs pour lesquels le type de culture n'est pas défini et qui entrent plutôt dans la catégorie « autres superficies agricoles » de la carte écoforestière.

[1] Ce chiffre est un estimé de la population totale dans la zone d'étude, obtenu en faisant la somme des populations municipales ajustées au prorata de la superficie de la municipalité inclue dans la zone d'étude. A titre comparatif, la somme des populations municipales non ajustées est de 1 155 349.

Tableau 1.16 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude

MRC	Municipalité	Superficie (km²)		Population		Densité (pers./km²)	
		Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude
Acton	Acton Vale	91.1	91.1 (100 %)	7 504	7 504	82.4	82.4
	Béthanie	46.9	46.9 (100 %)	332	332	7.1	7.1
	Roxton	150	149.9 (100 %)	1 032	1 032	6.9	6.9
	Roxton Falls	5.1	5.1 (100 %)	1 323	1 323	260	260
	Sainte-Christine	91.6	91.6 (100 %)	744	744	8.1	8.1
	Saint-Nazaire-d'Acton	58.1	58.1 (100 %)	872	872	15	15
	Saint-Théodore-d'Acton	83.6	83.6 (100 %)	1 504	1 504	18	18
	Upton	55.8	55.8 (100 %)	1 971	1 971	35.3	35.3
	Total (Acton)	582	582.2 (100 %)	15 282	15 282	26.2	26.2
Brome-Missisquoi	Abercorn	26.9	26.9 (100 %)	368	368	13.7	13.7
	Bedford (Canton)	32.2	32.2 (100 %)	739	739	23	23
	Bedford (Ville)	4.4	4.4 (100 %)	2 622	2 622	593	593
	Bolton-Ouest	102	101.8 (100 %)	766	766	7.5	7.5
	Brigham	88.1	88.1 (100 %)	2 549	2 549	28.9	28.9
	Brome	11.5	11.5 (100 %)	281	281	24.4	24.4
	Bromont	116	115.7 (100 %)	7 396	7 396	63.9	63.9
	Cowansville	48.5	48.5 (100 %)	12 408	12 408	256	256
	Dunham	196	195.5 (100 %)	3 484	3 484	17.8	17.8
	East Farnham	5	5 (100 %)	484	484	97.5	97.5
	Farnham	93.8	93.8 (100 %)	8 060	8 060	85.9	85.9
	Frelighsburg	124	124 (100 %)	1 049	1 049	8.5	8.5
	Lac-Brome	223	222.9 (100 %)	5 686	5 686	25.5	25.5
	Notre-Dame-de-Stanbridge	44	44 (100 %)	707	707	16.1	16.1
	Saint-Armand	83.7	83.7 (100 %)	1 159	1 159	13.9	13.9
	Sainte-Sabine	55.2	55.2 (100 %)	1 082	1 082	19.6	19.6
	Saint-Ignace-de-Stanbridge	69.6	69.6 (100 %)	660	660	9.5	9.5
	St-Pierre-de-Véronne-à-Pike-River	41.6	41.6 (100 %)	542	542	13	13
	Stanbridge East	49.7	49.7 (100 %)	836	836	16.8	16.8

Tableau 1.16 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude (suite)

MRC	Municipalité	Superficie (km²)		Population		Densité (pers./km²)	
		Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude
Brome-Missisquoi (suite)	Stanbridge Station	18.2	18.2 (100 %)	303	303	16.7	16.7
	Sutton	247.5	247.5 (100 %)	4 047	4 047	16.4	16.4
	Terr. non organisé aquatique	20.8	20.8 (100 %)	-	-	-	-
	Total (Brome-Missisquoi)	1 700.6	1 700.6 (100 %)	55 228	55 228	32.5	32.5
Drummond	Drummondville	260	2.8 (1 %)	71 117	778	274	274
	Durham-Sud	92.6	35.5 (38 %)	1 066	409	11.5	11.5
	Lefebvre	66.2	26.4 (40 %)	849	338	12.8	12.8
	Saint-Bonaventure	81	25.7 (32 %)	1 008	320	12.4	12.4
	Saint-Edmond-de-Grantham	48.6	48.6 (100 %)	696	696	14.3	14.3
	Saint-Eugène	76.1	76.1 (100 %)	1 161	1 161	15.3	15.3
	Saint-Germain-de-Grantham	87.6	43.8 (50 %)	4 411	2 204	50.3	50.3
	Saint-Guillaume	88.3	88.3 (100 %)	1 573	1 573	17.8	17.8
	Saint-Majorique-de-Grantham	58.8	7.6 (13 %)	1 227	158	20.9	20.9
	Saint-Pie-de-Guire	52.6	6.7 (13 %)	452	58	8.6	8.6
	Wickham	99	17 (17 %)	2 530	434	25.6	25.6
	Total (Drummond) (1)	1 010.8	378.6 (37 %)	86 090	8 130	85.2	21.5
La Haute-Yamaska	Granby	155.7	1 55.7 (100 %)	62 559	62 559	402	402
	Roxton Pond	103.1	103.1 (100 %)	3 844	3 844	37.3	37.3
	Saint-Alphonse-de-Granby	50	50 (100 %)	3 093	3 093	61.8	61.8
	Sainte-Cécile-de-Milton	73.1	73.1 (100 %)	1 960	1 960	26.8	26.8
	Saint-Joachim-de-Shefford	128.9	128.9 (100 %)	1 188	1 188	9.2	9.2
	Shefford	119	119 (100 %)	7 195	7 195	60.5	60.5
	Warden	5.6	5.6 (100 %)	360	360	64.7	64.7
	Waterloo	13.3	13.3 (100 %)	3 935	3 935	296	296
	Total (La Haute-Yamaska)	648.8	648.8 (100 %)	84 134	84 134	130	130
La Vallée-du-Richelieu	Beloeil	25.5	25.5 (100 %)	20 277	20 277	796	796
	Carignan	65	65 (100 %)	8 084	8 084	124	124
	Chambly	27.5	27.5 (100 %)	24 996	24 996	908	908

Tableau 1.16 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude (suite)

MRC	Municipalité	Superficie (km²)		Population		Densité (pers./km²)	
		Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude
La Vallée-du-Richelieu (suite)	McMasterville	3.4	3.4 (100 %)	5 658	5 658	1674	1674
	Mont-Saint-Hilaire	45.4	45.4 (100 %)	17 414	17 414	383.8	383.8
	Otterburn Park	5.7	5.7 (100 %)	8 543	8 543	1 499	1 499
	Saint-Antoine-sur-Richelieu	67.9	67.9 (100 %)	1 671	1 671	24.6	24.6
	Saint-Basile-le-Grand	36.8	36.8 (100 %)	16 590	16 590	450.5	450.5
	Saint-Charles-sur-Richelieu	66.5	66.5 (100 %)	1 715	1 715	25.8	25.8
	Saint-Denis-sur-Richelieu	86.3	86.3 (100 %)	2 306	2 306	26.7	26.7
	Saint-Jean-Baptiste	72.9	72.9 (100 %)	3 139	3 139	43.1	43.1
	Saint-Marc-sur-Richelieu	62.3	62.3 (100 %)	1 997	1 997	32.1	32.1
	Saint-Mathieu-de-Beloeil	39.3	39.3 (100 %)	2 562	2 562	65.2	65.2
	Total (La Vallée-du-Richelieu)	604	604.4 (100 %)	114 952	114 952	190.2	190.2
Le Haut-Richelieu	Henryville	69.3	69.3 (100 %)	1 526	1 526	22	22
	Lacolle	53.3	53.3 (100 %)	2 569	2 569	48.2	48.2
	Mont-Saint-Grégoire	81.1	81.1 (100 %)	2 995	2 995	36.9	36.9
	Noyan	49.7	49.7 (100 %)	1 394	1 394	28	28
	Saint-Alexandre	76	76 (100 %)	2 399	2 399	31.6	31.6
	Saint-Blaise-sur-Richelieu	72	72 (100 %)	1 961	1 961	27.2	27.2
	Sainte-Anne-de-Sabrevois	48.4	48.4 (100 %)	1 985	1 985	41	41
	Sainte-Brigide-d'Iberville	70.7	70.7 (100 %)	1 277	1 277	18.1	18.1
	St-Georges-de-Clarenceville	81.4	81.4 (100 %)	1 137	1 137	14	14
	Saint-Jean-sur-Richelieu	234	233.5 (100 %)	92 348	92 348	395.5	395.5
	Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix	37.2	37.2 (100 %)	2 010	2 010	54	54
	Saint-Sébastien	63.7	63.7 (100 %)	671	671	10.5	10.5
	Saint-Valentin	39.4	39.4 (100 %)	472	472	12	12
	Venise-en-Québec	20.2	20.2 (100 %)	1 393	1 393	68.9	68.9
	Total (Le Haut-Richelieu)	996	996 (100 %)	114 137	114 137	114.6	114.6
Le Val-Saint-François	Bonsecours	61.1	57 (93 %)	560	523	9.2	9.2
	Lawrenceville	17.2	17.2 (100 %)	683	683	39.7	39.7

Tableau 1. 16 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude (suite)

MRC	Municipalité	Superficie (km²)		Population		Densité (pers./km²)	
		Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude
Le Val-Saint-François (suite)	Maricourt	62	44.9 (72 %)	437	316	7	7
	Melbourne	174	0.3 (< 1 %)	1 099	2	6.3	6.3
	Racine	107	42.3 (39 %)	1 306	515	12.2	12.2
	Sainte-Anne-de-la-Rochelle	61.9	61.9 (100 %)	656	656	10.6	10.6
	Valcourt (Canton)	80.4	80.4 (100 %)	1 018	1 018	12.7	12.7
	Valcourt (Ville)	5.5	5.5 (100 %)	2 328	2 328	425	425
	Total (Le Val-St-François) (1)	569	309.6 (54 %)	8 087	6 041	14.2	19.5
Les Jardins-de-Napierville	Hemmingford (Canton)	157	59.2 (38 %)	1 766	664	11.2	11.2
	Hemmingford (Ville)	0.9	0.9 (100 %)	758	758	830	830
	Napierville	4.5	4.5 (100 %)	3 756	3 756	838	838
	Saint-Édouard	52.5	2 (4 %)	1 282	48	24.4	24.4
	Saint-Bernard-de-Lacolle	113	113.4 (100 %)	1 518	1 518	13.4	13.4
	Saint-Cyprien-de-Napierville	98	97.9 (100 %)	1 750	1 750	17.9	17.9
	Saint-Jacques-le-Mineur	67.7	39.4 (58 %)	1 672	973	24.7	24.7
	Saint-Patrice-de-Sherrington	92.5	58.5 (63 %)	1 954	1 235	21.1	21.1
	Total (Jardins-de-Napierville) (1)	587	375.6 (64 %)	14 456	10 700	24.6	28.5
Les Maskoutains	La Présentation	94.7	94.7 (100 %)	2 332	2 332	24.6	24.6
	Saint-Barnabé-Sud	58	58 (100 %)	884	884	15.2	15.2
	Saint-Bernard-de-Michaudville	65.8	65.8 (100 %)	507	507	7.7	7.7
	Saint-Damase	80.7	80.7 (100 %)	2 529	2 529	31.3	31.3
	Saint-Dominique	71	71 (100 %)	2 269	2 269	32	32
	Sainte-Hélène-de-Bagot	71.3	71.3 (100 %)	1 642	1 642	23	23
	Sainte-Madeleine	5.3	5.3 (100 %)	2 273	2 273	426	426
	Sainte-Marie-Madeleine	49.8	49.8 (100 %)	2 798	2 798	56.2	56.2
	Saint-Hugues	85.9	85.9 (100 %)	1 295	1 295	15.1	15.1
	Saint-Hyacinthe	191	191.2 (100 %)	53 131	53 131	278	278
	Saint-Jude	77.8	77.8 (100 %)	1 190	1 190	15.3	15.3
	Saint-Liboire	75.1	75.1 (100 %)	2 959	2 959	39.4	39.4

Tableau 1.16 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude (suite)

MRC	Municipalité	Superficie (km²)		Population		Densité (pers./km²)	
		Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude
Les Maskoutains (suite)	Saint-Louis	48.4	48.4 (100 %)	708	708	14.6	14.6
	Saint-Marcel-de-Richelieu	51.3	51.3 (100 %)	550	550	10.7	10.7
	Saint-Pie	108	108.3 (100 %)	5 130	5 130	47.4	47.4
	Saint-Simon	69.8	69.8 (100 %)	1 245	1 245	17.8	17.8
	Saint-Valérien-de-Milton	108	107.5 (100 %)	1 704	1 704	15.8	15.8
	Total (Les Maskoutains)	1 312	1 312 (100 %)	83 146	83 146	63.4	63.4
Longueuil	Boucherville	80.9	13.7 (17 %)	41 179	6 987	509.1	509.1
	Brossard	52.1	6.3 (12 %)	78 666	9 535	1 510	1 510
	Longueuil	123	49.3 (40 %)	235 310	94 505	1 919	1 919
	Saint-Bruno-de-Montarville	43.2	42.9 (99 %)	25 804	25 625	597.8	597.8
	Total (Longueuil) (1)	299	112.2 (38 %)	380 959	136 652	1 275	1 218
Marguerite-D'Youville	Calixa-Lavallée	32.7	32.7 (100 %)	520	520	15.9	15.9
	Contrecoeur	87.6	87.6 (100 %)	6 131	6 131	70	70
	Saint-Amable	36.9	36.9 (100 %)	10 337	10 337	280.1	280.1
	Sainte-Julie	48.8	48.8 (100 %)	29 318	29 318	600.2	600.2
	Varennes	114	114.2 (100 %)	20 889	20 889	183	183
	Verchères	85.1	85.1 (100 %)	5 519	5 519	64.9	64.9
	Total (Marguerite-D'Youville)	405	405.3 (100 %)	72 714	72 714	179.4	179.4
Memphrémagog	Austin	86.2	3.7 (4 %)	1 641	71	19	19
	Bolton-Est	81.3	58.5 (72 %)	766	551	9.4	9.4
	Eastman	76.9	72.6 (94 %)	1 531	1 445	19.9	19.9
	Orford	148	4.9 (3 %)	3 250	108	21.9	21.9
	Potton	278	220.5 (79 %)	1 773	1 409	6.4	6.4
	Saint-Étienne-de-Bolton	48.8	48.8 (100 %)	536	536	11	11
	Stukely-Sud	63.6	63.6 (100 %)	949	949	14.9	14.9
	Total (Memphrémagog) (1)	783	472.6 (60 %)	10 446	5 068	13.3	10.7
Nicolet-Yamaska	Saint-François-du-Lac	83.4	0.6 (< 1 %)	1 979	15	23.7	23.7
	Total (Nicolet-Yamaska) (1)	83.4	0.6 (< 1 %)	1 979	15	23.7	23.7

Tableau 1.16 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude (suite)

MRC	Municipalité	Superficie (km²)		Population		Densité (pers./km²)	
		Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude	Totale	Zone d'étude
Pierre-De Saurel	Massueville	1.3	1.3 (100 %)	508	508	391	391
	Saint-Aimé	62.4	62.4 (100 %)	508	508	8.1	8.1
	Saint-David	92.7	92.7 (100 %)	798	798	8.6	8.6
	Sainte-Anne-de-Sorel	59.1	59.1 (100 %)	2 835	2 835	48	48
	Sainte-Victoire-de-Sorel	76.3	76.3 (100 %)	2 466	2 466	32.3	32.3
	Saint-Gérard-Majella	38.2	38.2 (100 %)	258	258	6.8	6.8
	Saint-Joseph-de-Sorel	3.4	3.4 (100 %)	1 593	1 593	470	470
	Saint-Ours	60.9	60.9 (100 %)	1 695	1 695	27.8	27.8
	Saint-Robert	64.6	64.6 (100 %)	1 738	1 738	26.9	26.9
	Saint-Roch-de-Richelieu	36.7	36.7 (100 %)	2 070	2 070	56.5	56.5
	Sorel-Tracy	66.7	66.7 (100 %)	34 234	34 234	513	513
	Terr. non organisé aquatique	0.4	0.4 (100 %)	-	-	-	-
	Yamaska	76.6	76.6 (100 %)	1 649	1 649	21.5	21.5
	Total (Pierre-De Saurel)	639	639.2 (100 %)	50 352	50 352	78.8	78.8
Roussillon	La Prairie	54.6	4.1 (7 %)	23 617	1 770	432	432
	Saint-Philippe	61.9	1.6 (3 %)	5 604	146	90.6	90.6
	Total (Roussillon) (1)	117	5.7 (5 %)	29 221	1 916	251	336
Rouville	Ange-Gardien	90.2	90.2 (100 %)	2 306	2 306	25.6	25.6
	Marieville	62.7	62.7 (100 %)	9 069	9 069	145	145
	Richelieu	32.4	32.4 (100 %)	5 491	5 491	169	169
	Rougemont	44.4	44.4 (100 %)	2 607	2 607	58.7	58.7
	Saint-Césaire	84	84 (100 %)	5 526	5 526	65.8	65.8
	Sainte-Angèle-de-Monnoir	45	45 (100 %)	1 726	1 726	38.4	38.4
	Saint-Mathias-sur-Richelieu	50	50 (100 %)	4 568	4 568	91.4	91.4
	Saint-Paul-d'Abbotsford	80	80 (100 %)	2 873	2 873	35.9	35.9
	Total (Rouville)	489	488.7 (100 %)	34 166	34 166	69.9	69.9
Total		10 825.2	9 032	115 5349	792 635	106.7	87.8

(1) : Les totaux indiqués pour les MRC partiellement inclues dans la zone d'étude ne représentent pas les superficies ou populations totales des MRC.

Les statistiques tirées du livrable 7 et présentées au tableau 1.17 montrent que plus de la moitié du territoire (55%) est en zone agricole. De cette zone couvrant près de 5 000 km^2, ce sont les cultures de maïs (41%) et de soya (17%) qui dominent, suivies du foin (8.8%) et des autres céréales (3.6%). Le territoire non agricole, d'environ 4 000 km^2, est occupé par les boisés (33%), les zones urbaines et industrielles (6.3%), les zones humides et plans d'eau (3%), les aires de villégiature (< 1%) et les « autres zones », incluant les îles et les zones écoforestières indifférenciées (2.1%).

Tableau 1.17 : Types d'utilisation du territoire

Regroupement d'utilisation du territoire	Type d'utilisation du territoire	Superficie (km²)	Proportion de la zone d'étude (%)	Proportion du regroupement (%)
Zones forestières	Forêts et boisés	2983.6	33 %	100 %
Zones humides	Eau et zones humides	274.6	3 %	100 %
Zones urbaines	Villégiature, sports et tourisme	42.1	0.5 %	6.8 %
	Zones urbaines et industrielles	574.4	6.3 %	93.2 %
Zones agricoles	Culture céréalière (avoine)	24.7	0.3 %	0.5 %
	Culture céréalière (blé)	113.7	1.3 %	2.3 %
	Culture céréalière (maïs)	2027.5	22.4 %	40.6 %
	Culture céréalière (orge)	40.6	0.4 %	0.8 %
	Culture céréalière (soya)	860	9.5 %	17.2 %
	Culture maraîchère (legumes)	80.1	0.9 %	1.6 %
	Culture maraîchère (petits fruits)	2	< 0.1 %	< 0.1 %
	Culture non déclarée/assurée	371.4	4.1 %	7.4 %
	Cultures mixtes	38.3	0.4 %	0.8 %
	Foin, pâturage, engrais vert	440.7	4.9 %	8.8 %
	Friches et sols dénudés	68.9	0.8 %	1.4 %
	Terre agricole	924.7	10.2 %	18.5 %
Autres	Autres	186.9	2.1 %	100 %

1.5.3.2 Affectation du territoire

Les grandes affections du territoire présentées au livrable 10 proviennent du Portrait provincial en aménagement du territoire (PPAT) préparé par le Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT, 2010b). Ces données présentent la vocation ou l'utilisation prévue du territoire (contrairement à l'utilisation réelle cartographiée au livrable 7).

Bien que la Montérégie Est compte à la fois des milieux urbains et ruraux, la grande majorité du territoire est à vocation agricole (60 %), sauf à l'extrémité sud-est, dans les Appalaches, où le type d'affection dominant est agro-forestière. Les principales zones urbaines sont situées le long du fleuve St-Laurent ainsi qu'autour des municipalités de St-Jean-sur-Richelieu, Saint-Hyacinthe et Granby. Plusieurs zones d'affection récréative sont également réparties sur le territoire à l'étude. Finalement, les zones d''affectation industrielle couvrent une superficie relativement faible dans la région d'étude et sont surtout concentrées dans les centres urbains de la moitié ouest de la région d'étude.

2 ACQUISITION DES DONNEES ET CARACTERISATION

2.1 Compilation de l'information existante

La cueillette des informations existantes est une étape particulièrement importante puisqu'elle constitue la base des connaissances hydrogéologiques et géologiques du territoire étudié dans le cadre d'une étude régionale. Cette activité s'est principalement déroulée entre mai 2009 et décembre 2011 bien que des données complémentaires aient également été collectées ou mises à jour en 2012. Elle impliquait essentiellement l'acquisition de bases de données et de séries de données existantes, ainsi que la saisie de données à partir de documents existants provenant de sources variées. Les documents antérieurs disponibles résumant les connaissances hydrogéologiques régionales de certains secteurs (MEQ, 1981 ; MRN, 1978 ; Technorem, 2008) ont également été consultés, notamment afin de dresser un portrait des informations à mettre à jour, à détailler ou à obtenir lors des travaux de terrain liés au projet. De plus, les cartes de sédiments de surface existantes ont fait l'objet d'une compilation en début de projet afin de servir de référence jusqu'à la production de nouvelles cartes. La nouvelle cartographie des formations quaternaires à l'échelle 1 : 50 000 a été réalisée par Géologie Québec ; la version finale des quatorze feuillets cartographiques résultants n'a été disponible que la quatrième année du projet. L'acquisition de données de base à référence spatiale a également été faite en début de projet et cette activité est décrite par thématique de données à la section 2.1.1.

2.1.1 Acquisition de bases de données existantes

Pour les fins de ce projet, le MDDEFP a fourni ou facilité l'acquisition de différentes bases de données pour la zone à l'étude. Les bases de données hydrogéologiques ou géologiques collectées (tabulaires ou à référence spatiale) incluent :

- Système d'information hydrogéologique (SIH), appartenant au MDDEFP (MDDEFP, 2009)
- Base de données géotechniques du Ministère des Transports (MTQ) du Québec (incluant les bases de données FORLOG, BDG et GEOTECH) (MTQ, 2009)
- Système d'information géominière du Québec (SIGEOM) du Ministère des Ressources naturelles (MRN) du Québec (MRN, 2008a)
- Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG) du MRN (2010)
- Données de forages géothermiques du CCEG (Coalition Canadienne de l'Énergie Géothermique) (CCEG, 2010)
- Base de données géochimiques du Québec (BADGEQ) du Ministère des Ressources naturelles (MRN) du Québec (MRN, 2008b)

A l'exception des données du BADGEQ, ces données ont été intégrées à la base de données du projet afin d'être validées et utilisées, si elles se révélaient valides, pour la réalisation des livrables (voir section 2.3.3). Les données géochimiques du BADGEQ n'ont pas été utilisées car elles ne couvraient qu'une petite partie du territoire à l'étude et, pour la plupart, étaient redondantes avec les données géochimiques du SIH. Les données les plus nombreuses proviennent du SIH, suivi des sondages géotechniques, tel que résumé au tableau 2.1. Les puits répertoriés dans le SIH représentent en grande majorité des puits résidentiels ouverts au roc, c'est-à-dire sans crépine, avec un tubage uniquement placé vis-à-vis les dépôts meubles.

Tableau 2.1 : Résumé des données acquises via les bases de données existantes

Base de données	Source	Nombre
Système d'information hydrogéologique (SIH) (prof. totale du puits, niveau d'eau, stratigraphie, prof. du roc, géochimie)	MDDEFP	33 829 puits ou forages
Base de données géotechniques (profondeur du forage, stratigraphie)	MTQ	1 716 forages
Système d'information géominière (profondeur du forage, stratigraphie)	MRN	364 forages
Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (profondeur du forage, stratigraphie)	MRN	291 forages
Données de forages géothermiques (profondeur du forage, profondeur au roc)	CCEG	98 forages

D'autres bases de données existantes ont également été acquises afin de produire des cartes thématiques. Ces données, principalement des données de base à référence spatiale, ont été majoritairement obtenues via le MDDEFP mais également auprès de divers partenaires du projet, notamment l'IRDA, Géomont, l'OBV Yamaska et les MRC de la région d'étude. Ces bases de données incluent :

- Base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT) du MRN
- Système de découpage administratif du Québec (SDA) du MRN
- Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) développé par la Direction du Patrimoine écologique et des Parcs (DPEP) du MDDEFP
- Répertoire des bassins versants du Québec (échelle 1/20 000) du CEHQ
- Milieux humides de la Montérégie inventoriés par Géomont et Canards Illimités
- Système d'information écoforestière (SIEF) du MRN
- Portrait provincial en aménagement du territoire (PPAT) du MAMROT

Le projet a également bénéficié de séries de données climatiques, hydrologiques et géochimiques (eau de surface) qui ont été obtenues du MDDEFP, d'Environnement Canada, du CEHQ et de l'IRDA. Les données climatiques et hydrologiques sont respectivement présentées aux sections 1.5.2.2 et 1.5.2.4. Quant aux données géochimiques sur les eaux de surface, elles ont été obtenues principalement du MDDEFP (43 stations) mais aussi de l'IRDA (4 stations). Les données du MDDEFP proviennent de la Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA) (MDDEFP, 2011d) pour la période 1979-2011 tandis que celles de l'IRDA proviennent d'une base de données interne.

Par ailleurs, avant le début de cette étude, le Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec possédait quatre puits de surveillance provinciaux du niveau d'eau en Montérégie Est, tous localisés dans le bassin de la rivière Yamaska (ou très proche), soit à Sainte-Christine, Saint-Paul-d'Abbotsford, Saint-Alphonse et Sainte-Angèle-de-Monnoir près de Rougemont. Ce dernier puits n'est toutefois plus en fonction depuis 2008. Leur localisation est fournie sur le livrable 27 à l'annexe 2. Le suivi de ces quatre puits a débuté dans les années 1970, puis il a été abandonné dans les années 1980 ou 1990. Ces puits ont été réintégrés dans le programme de surveillance en 2006 ou 2007. Les données de ces puits ont été téléchargées du site internet du MDDEFP (www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm). Elles montrent que les niveaux ne semblent pas baisser significativement, sauf dans le cas de Sainte-Angèle-de-Monnoir, où un puits de production a été construit à proximité du puits de surveillance. Les données couvrant la période 1970-1993 montrent en effet que le niveau tendait à baisser ; tendance qui semble se poursuivre selon les données disponibles les plus récentes.

2.1.2 Acquisition de données à partir des documents existants

Un effort important a été dédié à la collecte de documents existants auprès des municipalités et des MRC du territoire à l'étude, des ministères fédéraux et provinciaux, des instituts de recherche, des consultants et des organismes sans but lucratif afin d'acquérir des données supplémentaires de qualité. Ces documents ont été répertoriés dans une librairie (ou bibliothèque virtuelle) et les informations extraites de ces documents de référence ont été intégrées dans la base de données du projet (ex. : caractéristiques de puits, descriptions stratigraphiques de forages et résultats d'analyses géochimiques).

2.1.2.1 Élaboration de la librairie de documents

Les documents et ouvrages de référence obtenus ont été recueillis principalement sous forme de cartes et de rapports gouvernementaux ou de rapports de recherche (271 documents) ainsi que de rapports de consultants (237 études hydrogéologiques ou géotechniques). Des articles scientifiques et des thèses (17 références) ont également été recueillis.

Les documents gouvernementaux et rapports de recherche ont principalement été obtenus des archives du MDDEFP en mai 2009. Des 271 documents répertoriés dans ces archives, 36 documents n'étaient pas disponibles au moment de la réalisation du projet et n'ont pas pu être consultés. Ces références ont tout de même été incluses dans la librairie puisqu'elles constituent des sources d'informations potentielles pouvant être retrouvées ultérieurement. Les rapports de consultants ont quant à eux été principalement obtenus suite à une demande écrite adressée aux municipalités et MRC du territoire étudié (ou adjacent au territoire étudié). Afin de compléter cette collecte de documents auprès des municipalités de la Montérégie Est, un mandat a été octroyé à la firme Laforest Nova Aqua afin de répertorier et fournir les nombreuses études réalisées par leur firme sur le territoire à l'étude.

Chacun des documents collectés a été numérisé, identifié par un numéro d'enregistrement et compilé dans une bibliothèque virtuelle créée à l'aide du logiciel EndNote, conformément au protocole de numérisation et d'archivage présenté à l'annexe 3. Les identifiants des documents dont les données ont été extraites ont été ajoutés à la base de données du projet afin d'indiquer la source originale des données.

2.1.2.2 Extraction des informations provenant des documents

Suite à l'archivage des documents obtenus, les informations jugées pertinentes pour le projet ont été extraites. Bien que fastidieux, cet exercice a permis d'obtenir des informations de qualité incluant notamment des données liées aux forages, aux puits, à la stratigraphie, aux essais de pompage, ainsi qu'aux résultats géochimiques. Le nombre d'objets relatifs aux différentes données extraites est présenté au tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Résumé des données extraites des documents collectés

Type de données	Nombre
Données stratigraphiques	2 113
Caractéristiques des puits (ex. : profondeur, diamètre, …)	3 072
Niveaux d'eau dans les puits	1 553
Essais de pompage	703
Échantillons d'eau souterraine	508

Ces informations ont été compilées dans un chiffrier électronique et transférées dans la base de données du projet. Chacun des puits ou forages (désignés sous le nom d'« objet ») a été référencé à l'aide d'un identifiant unique. Cet exercice a permis d'extraire différentes données pour un total de 3 138 objets (i.e. puits ou forages) pour l'ensemble du territoire étudié ainsi que sur les territoires limitrophes.

2.1.3 Faits saillants de la collecte

La collecte de données de différentes sources a permis de constater différents problèmes, qui sont résumés ci-dessous.

Faible couverture pour certaines MRC

Il existe une très faible concentration d'informations pour la MRC Pierre-De Saurel. Cette situation s'explique notamment par la rareté des puits d'approvisionnement en eau dans ce secteur puisque l'eau souterraine y est saumâtre (voir section 4.6).

Doublons

Suite à l'analyse des données compilées, soit 39 585 puits et forages, il a été constaté que plusieurs éléments apparaissent deux fois ou plus dans la base de données. Ceci s'explique en partie par le fait que les puits ou forages compilés ont systématiquement été intégrés à la base de données du projet, sans égard à leur présence ou non dans une autre base de données, comme par exemple la base de données du SIH (Système d'Information Hydrogéologique) du MDDEFP. Cette manière de procéder a été retenue pour une raison d'économie de temps mais également parce que l'imprécision des coordonnées géographiques des puits ou forages et de leur stratigraphie rendent parfois difficile l'identification de doublons, surtout lorsqu'ils datent de plus de 10 ans (avant l'utilisation courante du GPS). Également, certains puits peuvent avoir fait l'objet d'essais de pompage ou d'échantillonnage à plusieurs reprises dans le cadre de plus d'une étude. Pour les mêmes raisons, il est possible qu'un même puits apparaisse sous deux identifiants différents. L'identification des doublons a été réalisée à la toute fin des travaux de compilation de façon à intégrer l'ensemble des données disponibles (voir section 2.3).

Localisation spatiale des éléments d'intérêt

Plusieurs rapports datant de plus d'une dizaine d'années ne comprenaient pas de plans de localisation ou présentaient des plans manuscrits imprécis. Pour ces rapports, la localisation des éléments d'intérêt devait être déduite ou estimée. Par exemple, une carte sans aucune coordonnée devait être géo-référencée à l'aide d'un logiciel de cartographie, ou encore, la localisation géographique d'éléments sur une carte manuscrite devait être déduite à l'aide de repères visuels communs à une carte topographique à l'échelle 1/50 000 ou 1/20 000. Ces procédures peuvent toutefois entraîner une incertitude significative sur la localisation des éléments d'intérêt. Une cote de fiabilité a donc été attribuée à chacune des données afin de documenter le degré de précision de la localisation.

Signification des résultats de géochimie

L'extraction des informations relatives à la géochimie a permis de constater que très peu de certificats d'analyses et/ou de rapports mentionnent si les échantillons ont préalablement été filtrés ou non. Ainsi, il devient parfois impossible de distinguer si les résultats rapportés représentent des concentrations totales ou des concentrations dissoutes. Par exemple, un échantillon filtré donnera une concentration en fer dissous tandis qu'un échantillon n'ayant pas été filtré donnera une concentration en fer total (dissous + solide). Ce problème s'applique à tous les paramètres dont l'analyse nécessite généralement une filtration lors de la collecte de

l'échantillon. Lors de l'extraction des données à partir de rapports, il a été précisé dans la base de données si l'échantillon a été filtré ou non, ou si le rapport n'en fait simplement pas mention.

Exactitude des descriptions stratigraphiques

Les descriptions stratigraphiques issues des rapports sont parfois imprécises ou improbables et sont disponibles uniquement à partir des journaux de forage (i.e. « logs de forages ») faisant la description des matériaux forés. Lors de l'extraction de ces informations, les descriptions originales ont été rapportées textuellement. Cependant, un ajustement ou une interprétation peuvent avoir été faits lors de l'attribution des codes des faciès à partir des descriptions des matériaux.

2.2 Travaux de caractérisation

Les travaux de caractérisation hydrogéologique conventionnelle sont surtout basés sur des travaux de forages. Cependant, l'expérience a montré la limite des méthodes conventionnelles pour caractériser la variabilité spatiale des aquifères, que ce soit à l'échelle régionale ou plus locale (Bélanger et al., 2009 ; Blouin et al., 2013; Tremblay et al., 2013). Bien que les forages soient nécessaires car ils représentent souvent les seules informations directes sur la stratigraphie, il est admis que l'information provenant uniquement de forages ne pourrait pas permettre de caractériser la variabilité spatiale des aquifères régionaux à des coûts réalistes.

Ce projet a par conséquent exploité une approche de caractérisation hydrogéologique impliquant l'emploi de méthodes géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, géochimiques et d'outils de modélisation numérique. L'approche mise sur l'utilisation de mesures « indirectes », telles que les levés géophysiques et les sondages au piézocône afin de fournir des mesures plus détaillées et continues latéralement et verticalement et ainsi mieux caractériser la stratigraphie sur le territoire étudié. Des forages conventionnels réalisés dans le cadre de ce projet ont été nécessaires pour compléter la caractérisation géologique, caler les mesures indirectes, et permettre la mise en place de puits de surveillance qui serviront à diagnostiquer l'évolution à long terme de la qualité et de la quantité d'eau souterraine.

Les travaux de terrain ont été réalisés principalement à l'été et l'automne 2010, mais aussi à l'été 2009 et l'automne 2011. Ceux-ci ont permis de récolter plus de 200 échantillons d'eau souterraine provenant surtout de puits résidentiels et analysés principalement pour les ions majeurs et mineurs, les métaux et certains isotopes (^{2}H, ^{18}O, $^{3}H/^{3}He$) (section 4.6). Plus de 280 km de levés géophysiques ont été réalisés avec trois différentes méthodes, soit des levés de sismique réflexion à haute résolution (~ 105 km), des levés électromagnétiques dans le domaine du temps (TDEM) (~ 175 km) et des levés de résistivité électrique avec imagerie bidimensionnelle (~ 7 km). Par ailleurs, 53 sondages au piézocône (« Cone Penetration Test », CPT) et 23 sondages par rotopercussion (« Rotopercussion Sounding System », RPSS) ont été réalisés pour définir en détail la séquence de sédiments, caler l'interprétation des levés géophysiques et aménager des puits d'observation peu profonds dans certains cas. Deux campagnes de forages ont également permis de réaliser 25 forages conventionnels au roc et 4 forages rotosonic dans les dépôts meubles; ceux-ci ont tous été convertis en puits d'observation. Les sédiments prélevés par carottage continu lors des forages rotosonic ont été analysés en laboratoire par scannographies à rayons X et par fluorescence à rayon X (XRF). Certains échantillons ont également faits l'objet d'analyses granulométriques et géochimiques ainsi que de datation de macrorestes. Tous les puits (dans les dépôts meubles ou au roc) ont fait l'objet d'essais de perméabilité et de levés par diagraphies, en plus de l'échantillonnage d'eau souterraine mentionné plus haut. Un capteur de pression a aussi été installé dans chaque puits afin de suivre les fluctuations du niveau de l'eau souterraine. Finalement, une centaine

d'essais au perméamètre de Guelph ont été effectués sur une trentaine de sites pour mesurer les conductivités hydrauliques des dépôts en surface. Des échantillons de sols ont également été prélevés à trois reprises pour étudier le cycle des nitrates dans 2 sous-bassins (section 6.5).

L'ensemble de ces travaux est décrit plus en détail dans les sous-sections suivantes. Chaque sous-section comprend l'objectif de ces travaux, la méthodologie employée, la synthèse des travaux réalisés et un exemple de traitement ou de résultats. Les travaux réalisés sur le terrain sont d'abord décrits dans les sous-sections 2.2.1 à 2.2.7, puis les travaux réalisés en laboratoire sont abordés dans les sous-sections 2.2.8 à 2.2.9.

2.2.1 Cartographie des formations superficielles

Objectif

Suite à une entente intervenue entre le MRN (Géologie Québec) et le MDDEFP dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Géologie Québec, en collaboration avec la CGC, a reçu le mandat de réaliser la cartographie des formations superficielles de la Montérégie Est à l'échelle 1/50 000 afin de mettre à jour et de détailler les cartes existantes de sédiments de surface. Les cartes existantes avaient des niveaux de qualité très variables et présentaient des incohérences entre les nomenclatures utilisées, ce qui ne rencontrait pas les besoins du projet PACES.

Méthodologie

Pour planifier les deux campagnes de terrain, une photo-interprétation préliminaire a été effectuée afin d'identifier des zones de visites potentielles. L'utilisation de modèles stéréoscopiques de haute résolution dans le logiciel PURVIEW, en relation avec l'environnement ArcGIS, a permis de visualiser ces photos en trois dimensions, et à différentes échelles, en sauvant les étapes de numérisation et de vectorisation généralement nécessaires à ce genre de travail.

Les travaux de terrain ont été réalisés au courant des étés 2010 et 2011 par une équipe formée de deux géologues et deux aides-géologues. Les levés de terrain ont été effectués à la pelle et à la tarière. Les points de contrôle étaient généralement espacés de 1 km. De plus, plusieurs sablières actives ou abandonnées ont été visitées, donnant accès à une exposition fraîche des sédiments. Les rives de la plupart des cours d'eau ont également été investiguées afin de relever les coupes naturelles.

Synthèse des travaux de terrain

Plus de 5 000 levés de terrain ont été effectués, permettant ainsi de raffiner les connaissances sur la géologie des sédiments de surface de la région à l'étude. Quatorze cartes à l'échelle 1/50 000 ont ainsi été produites. Un rapport décrivant l'ensemble de ces travaux est disponible sur le site du MRN (Dubé-Loubert et al., 2013).

Par ailleurs, il importe de mentionner qu'en début de projet une carte synthèse préliminaire de la géologie du Quaternaire a été préparée afin d'orienter 1) les travaux de cartographie des formations superficielles et 2) les travaux de caractérisation hydrogéologique. Cette carte, qui n'est pas présentée ici, a été préparée à l'aide d'une compilation des cartes du MRN réalisée par Gaucher (1984) (rapport DV 84-10) à l'échelle de 1/50 000 et d'une carte de Prichonnet (1984), aussi à l'échelle 1/50 000. A cette carte de compilation ont été ajoutés les affleurements rocheux obtenus du SIGEOM (MRN, 2005) ou numérisés à partir des cartes géologiques existantes.

2.2.2 Levés géophysiques

Les mesures géophysiques acquises en cours de projet ont permis de mieux caractériser l'étendue latérale et verticale des sédiments et d'améliorer les modèles hydrogéologiques conceptuels. Ces mesures indirectes acquises de manière continue et à faibles coûts en regard des données conventionnelles (ex. : forages) peuvent fournir de l'information sur la stratigraphie lorsqu'elles sont mises en commun avec l'information obtenue des sondages au piézocône (« Cone Penetration Test », CPT) et des forages conventionnels. Comme une seule mesure physique ne permet pas de caractériser tous les types de matériaux à différentes échelles et à des coûts raisonnables, plusieurs méthodes géophysiques ont été déployées afin d'obtenir des informations dans les différents contextes de la région d'étude. Le tableau 2.3 résume la longueur des levés géophysiques acquis durant le projet.

Tableau 2.3 : Longueur des levés géophysiques réalisés dans le cadre du projet

Type de levé	Longueur totale (km)
Levés de sismique réflexion	105
Levés électromagnétiques dans le domaine du temps (TDEM)	175
Levés de résistivité électrique	7

L'objectif des différents levés géophysiques est commun : récolter des données de façon continue ou semi-continue afin de pouvoir améliorer les connaissances sur la stratigraphie des sédiments de surface et sur la profondeur du roc entre les forages disponibles. Trois techniques ont été utilisées, de manière à mieux caractériser les formations superficielles: 1) la sismique réflexion, qui permet de parcourir entre 2 et 3 km par jour, mais qui requiert un équipement lourd et dont la profondeur de pénétration ne dépasse pas quelques dizaines de mètres; 2) le TDEM qui permet également de parcourir environ 10 km par jour et qui permet d'évaluer la résistivité électrique des différentes lithologies (son avantage par rapport à la sismique réflexion réside dans le fait que l'équipement utilisé est moins lourd et moins dispendieux à utiliser) et, enfin, 3) la résistivité électrique avec imagerie bidimensionnelle, qui permet également de caractériser la résistivité des matériaux mais avec une meilleure résolution, en contrepartie d'un temps d'acquisition plus lent (~ 1 km/jour).

Par ailleurs, l'intégration des différentes données géophysiques acquises dans un logiciel de modélisation géologique fait l'objet d'un projet doctoral dans une portion de la zone d'étude (Blouin et al., 2011). Ce projet a notamment pour but d'élaborer un modèle géologique en trois dimensions des faciès du système hydrogéologique régional en utilisant les données géophysiques acquises. Ces travaux ne sont toutefois pas traités dans le cadre de ce rapport.

2.2.2.1 Levés de sismique réflexion

Objectif

Les levés de sismique réflexion permettent d'imager à haute résolution les propriétés physiques des dépôts meubles (ex. : élasticité et densité) ainsi que de caractériser l'interface entre ces dépôts et le roc fracturé et/ou le till sous-jacent. Par ailleurs, le traitement avancé des données brutes de sismique réflexion permet de définir des images de vitesses sismiques des ondes, paramètres permettant de caractériser et de différencier les différentes lithologies, notamment les argiles des sables (Pugin et Pullan, 2013; Pugin et al., 2009 et 2013).

Méthodologie

Le principe d'un levé de sismique réflexion consiste à émettre une onde acoustique avec une source vibrante et à enregistrer les signaux réfléchis, transmis ou réfractés à l'aide de capteurs (géophones) déposés sur le sol. Les levés et le traitement des données sismiques ont été réalisés par une équipe de la CGC (Pugin et Pullan, 2013) en deux phases : 1) entre septembre et octobre 2009 (3 semaines) et 2) entre septembre et octobre 2010 (3 semaines). Les levés ont généralement été faits sur des routes secondaires avec un équipement composé d'une source multi-directionnelle installée sur un véhicule (« Minivib II ») et d'une flûte sismique terrestre de 48 géophones à 3 composantes (2 horizontales et 1 verticale).

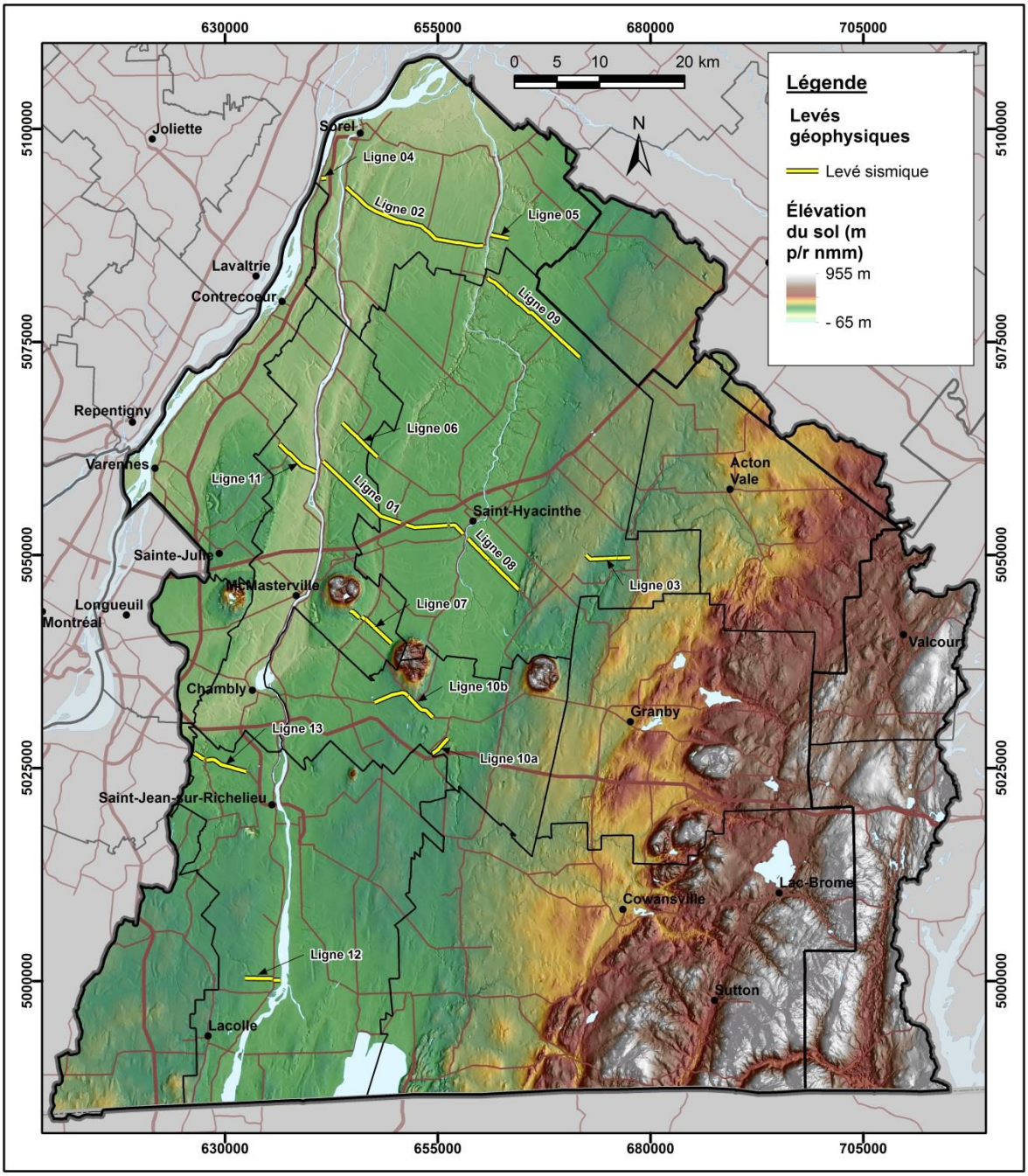


Figure 2.1 : Localisation des levés sismiques

Synthèse des travaux de terrain

L'acquisition de mesures sismiques multi-composantes à haute résolution a permis de récolter des données sur treize profils totalisant un peu plus de 100 km. Tous les profils interprétés sont présentés à l'annexe 4 et l'atlas hydrogéologique (annexe 1) donne aussi un exemple de coupe géologique basée en partie sur un de ces levés sismiques. Ces travaux sont documentés plus en détail dans Pugin et Pullan (2013) tandis que Pugin et al. (2013) résument les travaux et illustrent certains résultats. L'emplacement des levés sismiques réalisés est présenté à la figure 2.1. Le contexte géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres), comprenant une épaisse couche de sédiments silto-argileux, est particulièrement propice à l'utilisation de cette méthode. Ces travaux ont d'ailleurs fourni des profils montrant clairement des stratifications et des changements de matériaux, et fournissant la profondeur du roc ou du till basal. Les mesures sismiques ont aussi permis d'identifier des structures de matériaux plus grossiers d'orientation nord-est sud-ouest sous l'argile, structures inconnues jusqu'à présent. Par ailleurs, un profil vertical sismique (VSP) multi-déport et multi-azimuts a également été réalisé afin de préciser les vitesses sismiques et de quantifier l'anisotropie sismique. Les résultats de ce profil vertical sismique ne sont pas documentés ici mais font l'objet d'un projet doctoral (Blouin et al., 2011).

Exemple de résultat

La figure 2.2 présente les résultats du traitement pour la ligne no.1, d'environ 19 km, réalisée à l'ouest de Saint-Hyacinthe. Les résultats présentés correspondent aux ondes Sv avec l'interprétation des interfaces ou contact stratigraphique en profondeur. On peut clairement identifier le toit du roc mais cette surface est beaucoup plus variable qu'anticipé. Il est évident que des forages espacés de plusieurs dizaines de kilomètres n'auraient pu permettre d'avoir une telle résolution. Par ailleurs, on voit des litages dans la couche d'argile (couche supérieure), qui ont été confirmés par la pression des pores mesurée lors des sondages au piézocône (CPT).

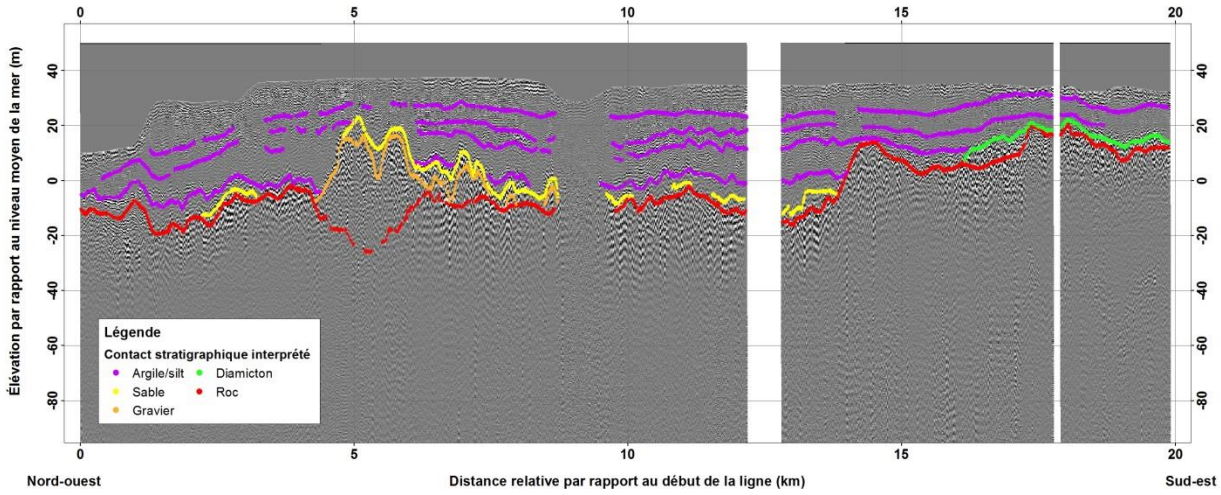


Figure 2.2 : Exemple de résultats traités du levé sismique réalisé le long de la ligne 1, à l'ouest de Saint-Hyacinthe (fourni par A. Pugin, CGC).

2.2.2.2 Levés électromagnétiques dans le domaine du temps (TDEM)

Objectif

Les levés TDEM ont pour objectif d'établir des profils verticaux de résistivité électrique des matériaux. La résistivité électrique est une propriété caractéristique de plusieurs types de matériaux en Montérégie Est et peut donc permettre d'identifier l'interface entre des matériaux présentant un contraste de résistivité.

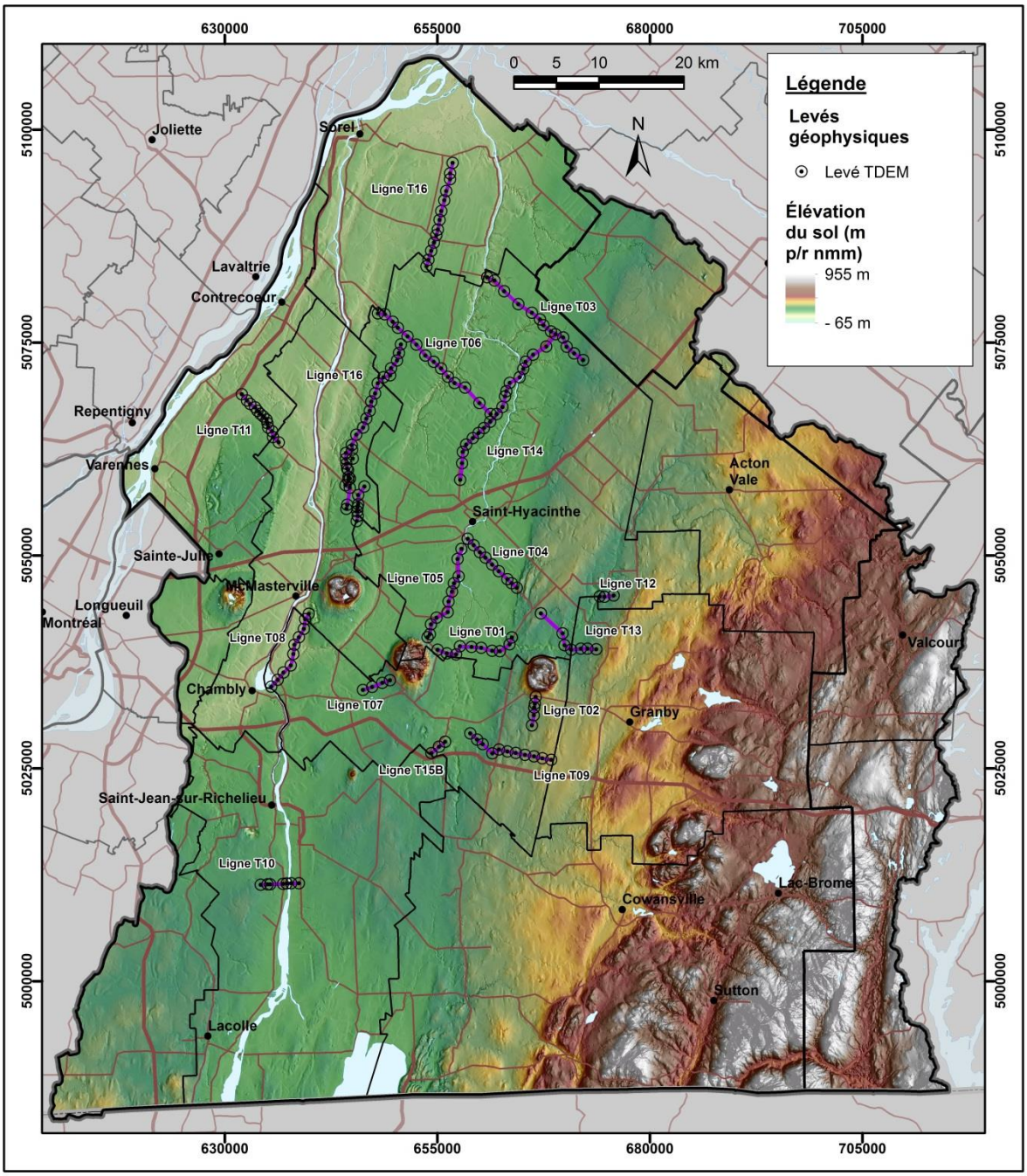


Figure 2.3 : Localisation des levés TDEM

Méthodologie

Ce système consiste en deux boucles, une émettrice et une réceptrice, permettant de mesurer le champ magnétique secondaire vertical induit en fonction du temps. Le champ magnétique mesuré permet, après analyse, d'obtenir des sondages verticaux de la résistivité électrique des matériaux à partir de la surface. L'acquisition de données rapprochées le long de profils permet d'obtenir des images bidimensionnelles de la résistivité à une résolution métrique avec une profondeur d'investigation de plusieurs dizaines de mètres et de les relier à l'hydrostratigraphie. La précision de cette méthode est toutefois plus faible que celle de la tomographie électrique et possède une sensibilité plus faible dans les premiers mètres. Ce système, moins précis, visait surtout à fournir de l'information approximative mais semi-continue (« soft data ») aux endroits où des levés de sismique de surface n'étaient pas disponibles.

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultat

En tout, environ 180 points de mesures ont été réalisés le long de 16 lignes, fournissant des données sur environ 175 km (espacement moyen entre chaque station de 1 km), dont environ 25 km le long des levés de sismique de surface à des fins de calibration. La figure 2.3 montre la localisation des levés. Pour ces travaux, le système nanoTEM de l'INRS a été utilisé.

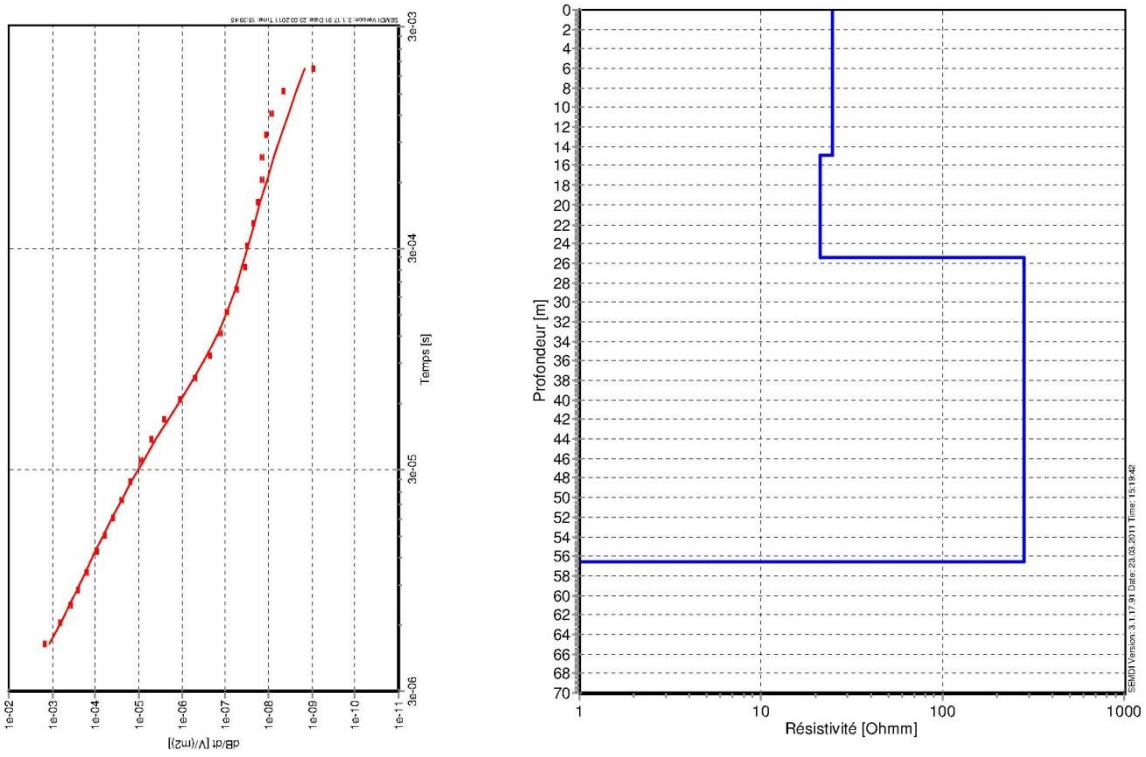


Figure 2.4 : Exemple de levé TDEM dans le secteur de Saint-Hugues (ligne T03)

La figure 2.4 montre le résultat d'un sondage électrique obtenu par TDEM sur la ligne T03. Sur la figure, à gauche, les points rouges représentent les mesures de résistivité en fonction du temps et la figure de droite correspond au meilleur modèle géoélectrique provenant de l'interprétation des données avec le profil de résistivité Les points d'inflexion sur le modèle géoélectrique correspondent à des interfaces probables entre deux types de matériaux présentant un contraste de résistivité.

2.2.2.3 Levés de résistivité électrique

Objectif

Les levés de résistivité électrique (ou tomographie électrique) permettent de caractériser à haute résolution des zones présentant des anomalies de faible dimension définies par les autres méthodes géophysiques. Par exemple, plusieurs profils de tomographie électrique ont été réalisés à l'aplomb d'une anomalie qui avait été détectée sur un profil sismique. Ces levés ont notamment permis de déterminer les propriétés électriques des matériaux à cet endroit et de mieux définir l'extension et l'orientation des matériaux constituant l'anomalie.

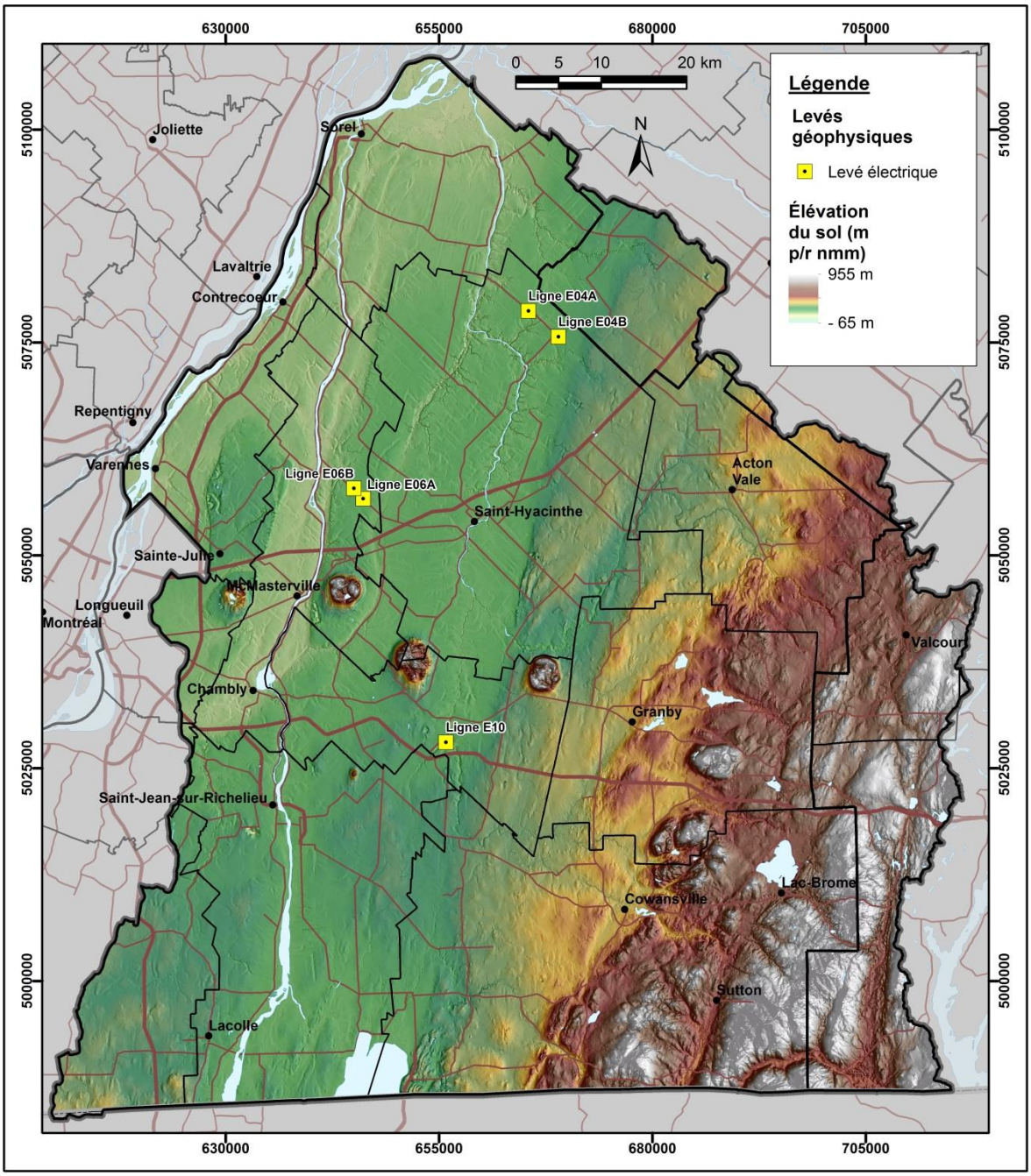


Figure 2.5 : Localisation des levés de résistivité électrique

Méthodologie

Les sols et les roches sont des matériaux qui, selon leur nature, conduisent plus ou moins bien les courants électriques. En injectant dans le sol un courant d'intensité connue et en mesurant la différence de potentiel, on peut mesurer la résistivité électrique des différentes couches de sols ou de roc sous-jacentes. Des électrodes (i.e. des tiges en acier inoxydable) sont enfoncées dans le sol et un courant est appliqué de façon séquentielle dans deux d'entre elles et le reste des électrodes mesure les différences de potentiel électrique. Ces mesures de potentiel électrique sont ensuite transformées grâce à un logiciel spécialisé en profils bidimensionnels de résistivité électrique. Ces mesures sont très précises, mais l'acquisition est relativement longue (environ 1h30 pour un profil de 500 m avec une profondeur d'investigation de 70 m).

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

À l'automne 2009 et l'été 2010, 7 km de levés électriques ont été effectués dans la région d'étude, principalement dans le nord de la région. La figure 2.5 illustre l'emplacement approximatif des levés électriques. Les mesures ont été faites avec le système SYSCAL Pro (IRIS Instruments) de l'INRS en utilisant 96 électrodes espacées de 5 m. Un exemple d'imagerie de résistivité électrique pour le levé réalisé au site E04a est présenté à la figure 2.6.

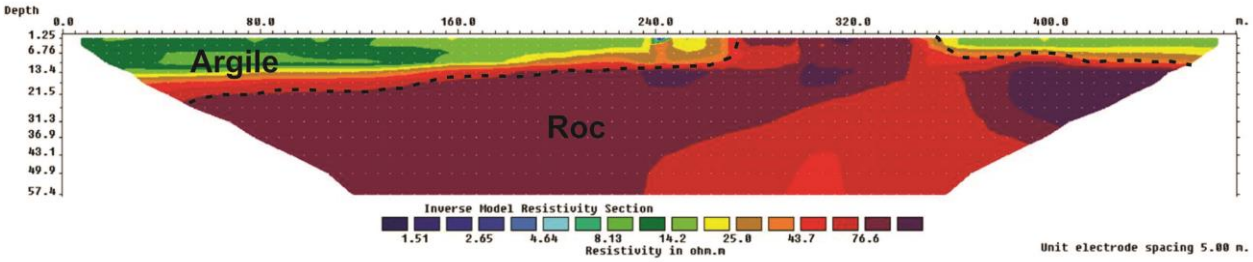


Figure 2.6 : Exemple de levé de résistivité électrique réalisé près de Saint-Hugues

2.2.3 Sondages et forages

2.2.3.1 Sondages

Objectif

Le but premier des travaux de sondage était de servir de points de contrôle à la stratigraphie des dépôts quaternaires et à confirmer la profondeur au roc, de manière à pouvoir valider l'interprétation des données existantes ou de celles acquises par géophysique durant le projet. La réalisation de certains sondages devait aussi permettre de combler des besoins spécifiques où l'information était insuffisante, par exemple dans le secteur nord-ouest de la zone d'étude. Certains sondages ont aussi été transformés en puits d'observation afin de permettre l'échantillonnage de l'eau et de faire un suivi des fluctuations du niveau de la nappe.

Méthodologie

Les sondages ont été effectués à l'aide de la foreuse géotechnique multifonctionnelle de l'INRS (Geotech 605D). Cet équipement permet de travailler avec deux méthodes de sondage selon les conditions géologiques rencontrées, soit par enfoncement ou par rotation-percussion. Pour les deux types d'opération, la foreuse est équipée d'un système d'acquisition de données qui enregistre en temps réel les différents paramètres de forage, qui permettent après interprétation de fournir un profil stratigraphique continu. La première méthode de sondage se fait par enfoncement statique et est donc principalement utilisée dans les sols meubles, tels des argiles,

des silts ou des sables. Ce type d'opération permet notamment de réaliser des sondages au piézocône (« Cone Penetration Test ») qui donnent des mesures fiables et reproductibles des paramètres physiques des sols (friction, résistance en pointe, pression d'eau et inclinaison) ainsi que des mesures géophysiques avec le système SMR (« Soil Moisture Resistivity ») (résistivité et teneur en eau). Ces résultats peuvent être interprétés en classes de sol sur la base de chartes existantes (Lunne et al., 1997; Fellinius et Eslami, 2000). La profondeur d'investigation maximale est d'environ 50 m, mais celle-ci peut varier selon les conditions de terrain.

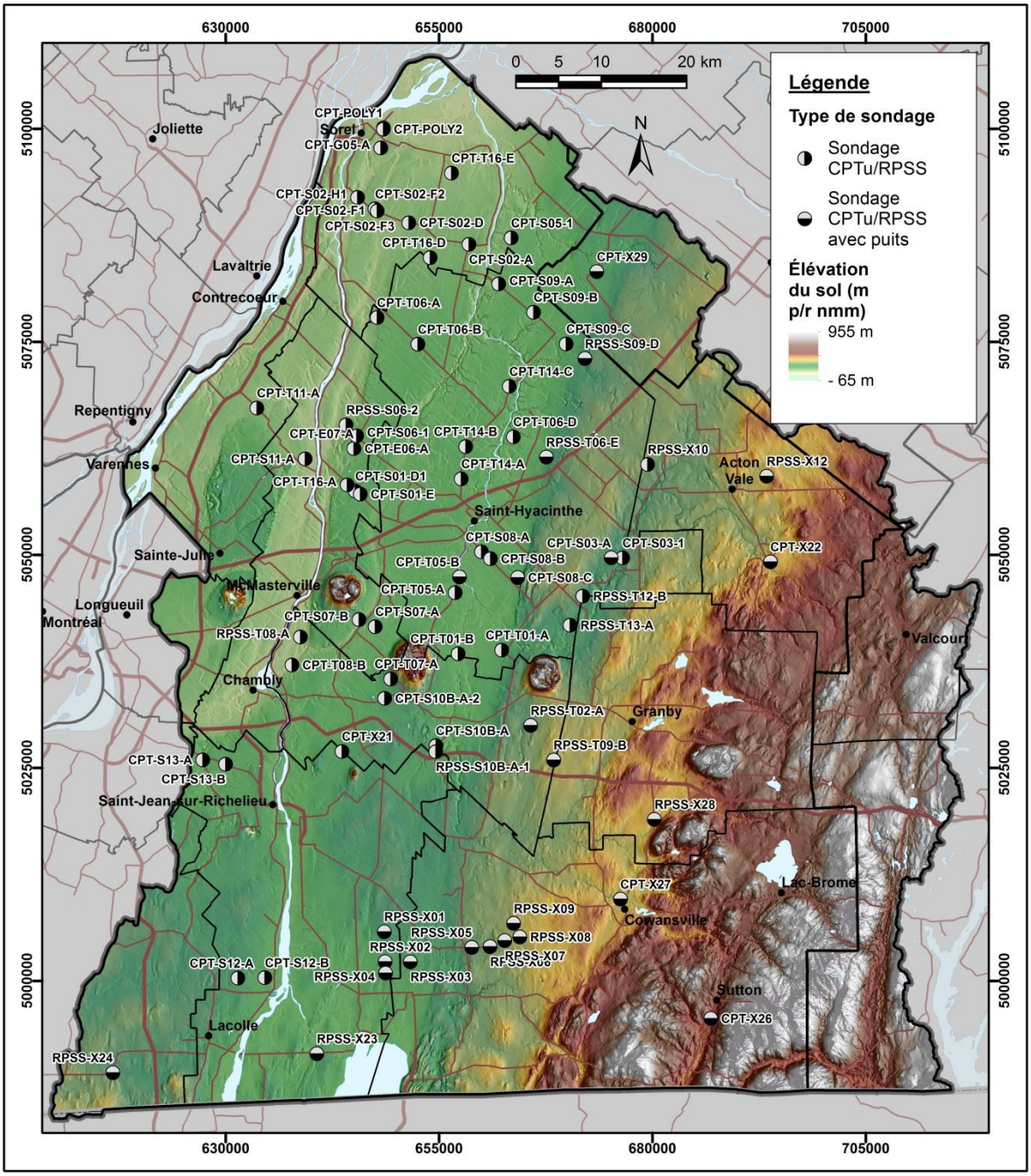


Figure 2.7 : Localisation des sondages CPT et RPSS

La deuxième méthode de sondage se fait par rotopercussion (« Rotopercussion Sounding System », RPSS) avec un marteau hydraulique et de l'air comprimé pour éjecter les déblais de

forage. Le système peut aussi être utilisé pour faire des installations de puits d'observation par enfoncement d'un tubage (tubage en acier de 3.25 po ou 2.25 po) par percussion jusqu'à une profondeur maximale d'environ 30 m. Le système RPSS procure aussi un profil en continu des différents paramètres de forage durant l'enfoncement (pression à l'enfoncement, vitesse et pression de rotation de la tête, pression et vitesse de la percussion du marteau, pression et débit de l'air comprimé, etc.). Les paramètres mesurés en RPSS permettent de déterminer l'énergie requise en fonction de la vitesse de pénétration et d'identifier sommairement les formations géologiques rencontrées. Ce mode de sondage est surtout appliqué à la caractérisation des massifs rocheux, mais peut s'utiliser pour la reconnaissance des unités dans les dépôts meubles, particulièrement les formations difficiles à forer (ex. : graviers avec blocs, diamictons, …). Enfin, le système utilisé permettait aussi l'échantillonnage des sédiments, permettant ainsi de vérifier la nature réelle des matériaux et de procéder à diverses analyses.

Les localisations des sondages sur le territoire d'étude, présentées à la figure 2.7, ont été sélectionnées de façon à combler les manques d'information et à bien représenter les différents contextes hydrostratigraphiques. Les zones d'intérêts ont été identifiées à l'aide des informations existantes (i.e. forages existants, cartes géologiques du roc et du quaternaire) ainsi que, dans certains cas, à l'aide des informations provenant des travaux préliminaires réalisés lors de la première année du projet. Chaque emplacement a dû être localisé et confirmé sur le terrain en fonction des contraintes des lieux et en accord avec les propriétaires. Les résultats provenant des différents travaux des sondages ont servi, entre autre, à l'interprétation des données existantes ou encore au calage de données provenant des autres méthodes d'investigation, comme les levés géophysiques.

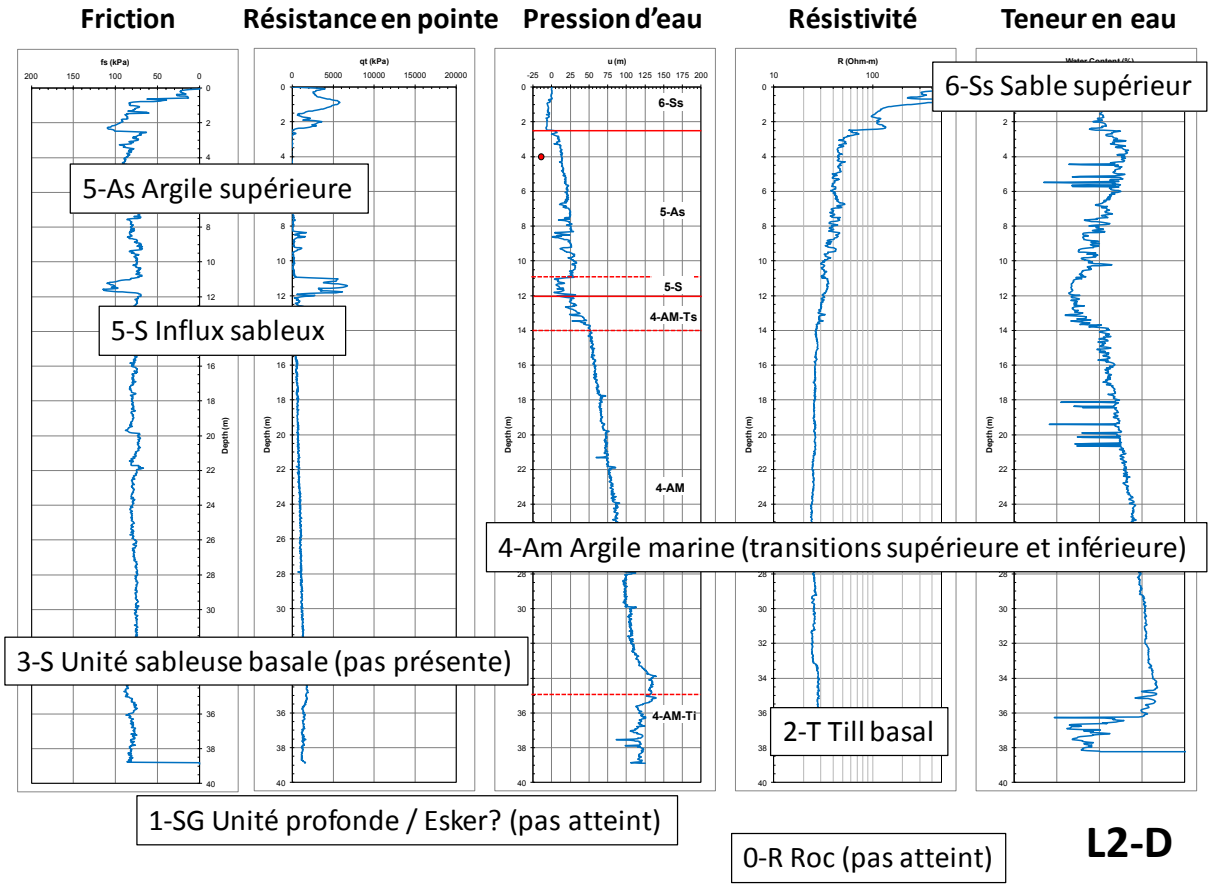


Figure 2.8 : Exemple de journal de sondage avec interprétation pour le sondage CPT-S02-D

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Soixante-seize (76) sondages CPT (46), RPSS (23) ou CPT/RPSS (7) ont été réalisés au cours du projet, pour une longueur totale sondée de 1 517 m. Les profondeurs des sondages réalisés varient entre 2 et 55 m. De ce total, 25 sondages ont été installés en puits d'observation dont 2 à niveau double. Un de ces puits, soit celui aménagé au sondage CPT-X21, a toutefois dû être démantelé au terme du projet.

La figure 2.8 fournit un exemple des données obtenues au sondage CPT-S02-D réalisé à Sainte-Victoire-de-Sorel à l'automne 2009 et montrant les unités hydrostratigraphiques préliminaires définies pour les dépôts meubles. Les journaux de sondages, présentés à l'annexe 4, ont été réalisés à l'aide du logiciel Strater et présentent les différents types de mesure acquises et l'interprétation des formations géologiques selon des classes prédéterminées.

2.2.3.2 Forages conventionnels

Objectif

Le but des forages conventionnels était d'obtenir des informations sur la stratigraphie et d'installer des puits d'observation au roc de façon à mettre en place un réseau de surveillance à long terme des variations du niveau de la nappe ainsi que la qualité de l'eau souterraine. L'installation des puits au roc permet également d'effectuer des essais de pompage ou de perméabilité et de réaliser des diagraphies pour caractériser les fractures. Tout comme pour les sondages CPT et RPSS, les forages conventionnels devaient également permettre de combler des besoins spécifiques aux endroits où l'information était manquante, notamment dans le secteur nord-ouest du territoire d'étude, où l'eau souterraine est saumâtre (voir section 4.6 sur la géochimie pour plus de détails).

Méthodologie

Comme pour les sondages, les localisations des forages ont été choisies en se basant sur les informations existantes, dont les cartes géologiques et les levés géophysiques. Chaque emplacement a été localisé et confirmé sur le terrain en fonction des contraintes des lieux et en accord avec les propriétaires. Des ententes ont été signées avec les propriétaires, dans certains cas des municipalités, pour autoriser le forage et l'installation d'un puits au roc, et pour permettre l'accès au site pour le suivi à long terme des niveaux d'eau. Tous les forages conventionnels aménagés en puits d'observation ont par ailleurs été légués au MDDEFP au terme du projet afin d'être intégrés au Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec. Tous les puits aménagés ont un diamètre de 150 mm (6 po) et ont été forés au minimum à 15 m dans le roc pour permettre d'évaluer les caractéristiques hydrauliques et la qualité de l'eau souterraine de la partie supérieure de l'aquifère rocheux. La figure 2.9 illustre la localisation des forages tandis que la figure 2.10 présente les schémas de construction typiques des puits selon le contexte géologique.

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Les travaux de forage conventionnels ont été réalisés en deux phases, soit à l'automne 2010 et à l'automne 2011. Lors de la première phase, les travaux ont été réalisés par une foreuse de type rotopercussion à double rotation (Foremost DR-12) alors que ceux de la seconde phase ont été réalisés par une foreuse de type rotopercussion avec système Odex (Drilltech T25K4W). En considérant les deux phases, 25 forages conventionnels au roc ont été effectués, pour un total foré de 940 m. Durant le forage, des échantillons (remaniés et lavés) provenant des débris de forage ont été récupérés à intervalles réguliers pour permettre l'identification de la nature minéralogique et granulométrique des sols et du roc. Le forage conventionnel permet de bien

estimer la profondeur au roc (précision de l'ordre du mètre) par l'identification des débris, mais aussi en tenant compte des informations fournies par le foreur sur l'effort à l'avancement du forage. Par la suite, chacun des puits a été muni d'un capteur de pression (« logger ») pour suivre les variations du niveau de la nappe sur une base journalière. Les journaux de forages sont présentés à l'annexe 4.

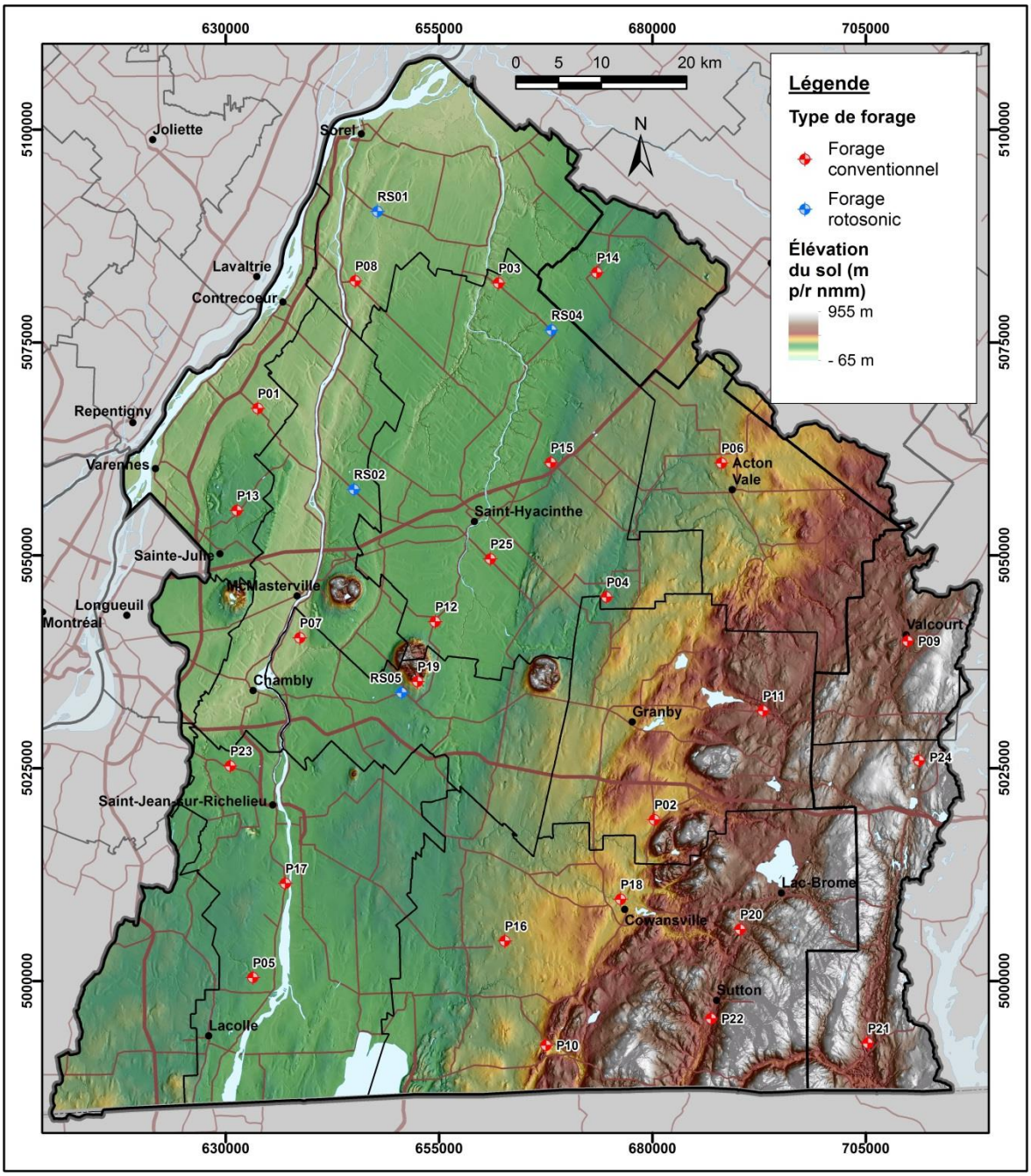


Figure 2.9 : Localisation des forages

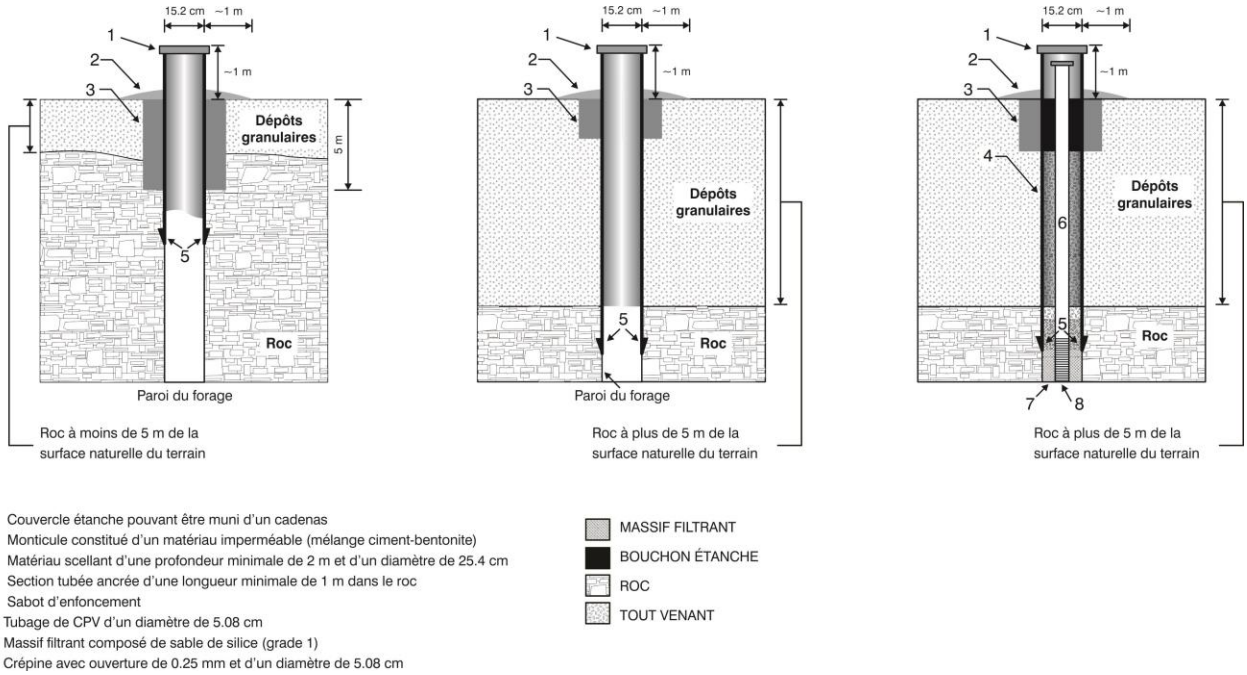


Figure 2.10 : Schémas de construction typiques des puits au roc : a) Roc à moins de 5 m de la surface, b) Roc à plus de 5 m de la surface et c) Roc à plus de 5 m de la surface avec parois instables

2.2.3.3 Forages par rotation-vibration (« rotosonic »)

Objectif

Les forages par rotation-vibration (ou « rotosonic ») ont principalement été réalisés afin d'échantillonner les dépôts meubles de façon continue et ainsi aider à mieux comprendre la mise en place des dépôts quaternaires dans la région d'étude, particulièrement autour des collines Montérégiennes et dans la partie nord de la région. Comme pour les forages conventionnels, les forages rotosonics ont permis d'installer des puits d'observation afin d'échantillonner l'eau souterraine et de suivre les variations de la nappe. Les puits installés ont aussi servi à réaliser des essais de perméabilité pour estimer la conductivité hydraulique.

Méthodologie

Cette méthode de forage permet généralement d'échantillonner tous les types de sols et de roc en continu, même quand il y a présence de cailloux ou de blocs. Les échantillons recueillis dans le cadre du projet ont un diamètre de 100 mm (4 po) et sont peu remaniés, ce qui permet d'effectuer plusieurs analyses et essais.

La localisation des forages rotosonic, présentée ci-haut sur la figure 2.9, a été faite sur la base des résultats préliminaires des levés de sismique de surface et des sondages CPT réalisés en début de projet. Chacun de ces forages visait donc une « anomalie » détectée par les travaux précédents ou une séquence stratigraphique à détailler. De la même façon que pour les forages conventionnels au roc, chaque site choisi a dû être localisé sur le terrain et des ententes ont été signées avec les propriétaires afin de pouvoir réaliser les travaux et aménager des puits de suivi à long terme. Tous ces forages ont atteint le roc et ont été aménagés en puits d'observation, dont certains à double niveau (un puits dans les dépôts meubles et un puits dans la partie supérieure du roc) afin de pouvoir évaluer les gradients hydrauliques verticaux et la qualité

d'eau. Ces puits ont aussi servi à réaliser des essais de perméabilité (slug test) pour mesurer la conductivité hydraulique.

Les échantillons de sol collectés ont fait l'objet de diverses analyses dont la scannographie par rayons X pour étudier la structure interne et la minéralogie basée sur les contrastes de densité. Certains échantillons ont également subi une analyse par fluorescence à rayons X (XRF), qui mesure certains éléments et métaux traces. Tous les échantillons ont été examinés et décrits par un géologue pour fournir des descriptions stratigraphiques détaillées. Un sous échantillonnage ciblé a aussi été effectué afin de réaliser d'autres types d'analyses, notamment des analyses granulométriques, de macro-restes et de microfossiles, ainsi que chimiques sur des sous-échantillons de sols et sur des échantillons d'eau interstitielle extraite des argiles.

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Quatre forages de type « rotosonic » ont été effectués à l'automne 2010, pour un total foré de 140 m. Les 4 forages ont été forés jusqu'au roc (environ 2 m dans le roc) et aménagés en puits d'observation (diamètre de 50 mm ou 2 pouces). Deux des puits ont été construits à double niveau, soit RS02 et RS05. Les deux puits aménagés au forage RS02 ont toutefois dû être démantelés au terme du projet. Des capteurs de pression ont été installés dans chaque puits pour faire le suivi des variations du niveau de la nappe.

Les journaux de forages sont présentés à l'annexe 4. Les analyses XRF et de scannographies effectuées sur une cinquantaine d'échantillons sont décrites dans la section 2.2.8.

2.2.4 Échantillonnage d'eau souterraine

Objectif

L'objectif de la campagne d'échantillonnage d'eau souterraine dans des puits (aménagés au roc ou dans les dépôts meubles) était d'établir un portrait de la qualité et de la géochimie de l'eau souterraine dans la région d'étude. Des travaux complémentaires ont été réalisés dans le cadre d'un projet de maîtrise (Beaudry, 2013), notamment l'identification des différents groupes d'eau associés à l'aquifère régional de roc fracturé et l'établissement des relations entre ceux-ci, ainsi que l'identification et la compréhension des mécanismes contrôlant la géochimie de ces groupes. Ces travaux et les résultats qui en découlent ont pour objectif d'améliorer la compréhension du système d'écoulement régional.

Méthodologie

Le nombre d'échantillons à prélever a été déterminé en considérant le territoire à couvrir mais aussi les limites budgétaires du projet. Un maximum de 250 échantillons a été fixé pour l'analyse des paramètres chimiques de base, incluant les duplicata et les échantillons de contrôle (« blancs »). Chaque échantillon a été prélevé conformément au protocole d'échantillonnage, élaboré par le GRIES spécifiquement pour le PACES (annexe 3).

Afin d'atteindre les objectifs fixés, la planification des travaux d'échantillonnage a été réalisée au printemps 2010. Le territoire à l'étude a été divisé selon un maillage régulier avec des cellules de 7x7 km. Au moins un échantillon devait être prélevé dans chacune des cellules, dans la mesure où la présence de puits le permettait. Les 28 puits d'observation aménagés au cours du projet ont également permis le prélèvement d'échantillons supplémentaires aux endroits présentant des intérêts hydrogéologiques particuliers ou encore aux endroits où aucun puits privé n'était disponible. La campagne d'échantillonnage a été réalisée à l'été et l'automne 2010, bien que certains échantillons supplémentaires aient été également prélevés à l'automne 2011. Deux équipes de deux personnes ont travaillé à temps plein de la mi-juin à la fin août 2010 afin

de prélever des échantillons principalement dans des puits privés, en milieu résidentiel et agricole. Une seule équipe a par la suite complété les travaux d'octobre à décembre 2010 ainsi qu'à l'automne 2011 pour l'échantillonnage des puits d'observation.

Pour aider dans la sélection des puits à échantillonner, la liste des puits du SIH (Système d'information hydrogéologique du MDDEFP) possédant une adresse postale a été consultée pour chacune des cellules du maillage de 7 x 7 km. Chaque équipe d'échantillonnage s'est vu attribuer un certain nombre de cellules pour lesquelles elle devait trouver un des puits de la liste, obtenir l'autorisation du propriétaire et prélever un échantillon. Les équipes se présentaient directement chez le propriétaire, sans rendez-vous préalable. Lorsqu'aucune autorisation de propriétaire n'était obtenue parmi les adresses répertoriées pour une cellule donnée (absence des propriétaires ou refus) ou lorsque le contexte d'échantillonnage pour les adresses répertoriées était défavorable (ex. : présence d'un système de traitement d'eau, aucun robinet extérieur accessible, …), un échantillon était alors prélevé chez un voisin ou dans tout autre puits d'alimentation au roc présent dans cette cellule. Le choix d'un puits alternatif impliquait cependant l'obtention de certaines informations de base par le propriétaire, telles que le type de puits, sa profondeur et la date de forage (soient des informations normalement fournies par le SIH). L'échantillonnage a été réalisé à un rythme moyen de 3 à 4 puits par jour par équipe. Lors de la rencontre avec le propriétaire, le protocole d'échantillonnage était brièvement présenté au propriétaire et une entrevue était réalisée afin de permettre à l'équipe de remplir le cahier des observations. Des informations telles que les coordonnées du propriétaire, la perception de la qualité de l'eau, le type d'utilisation de l'eau, le débit approximatif du puits, la profondeur et l'année de construction étaient notées dans le cahier. La transmission des résultats aux différents propriétaires a été réalisée à l'hiver 2011 pour les propriétaires ayant manifesté de l'intérêt pour les résultats ou lorsqu'un dépassement de normes était observé.

L'eau des puits d'alimentation privés était prélevée directement au robinet extérieur des résidences, tout en s'assurant qu'aucun système de traitement n'était présent. Les puits d'observation aménagés lors de forages conventionnels et ayant un diamètre de 150 mm ont quant à eux été purgés et échantillonnés avec une pompe électrique de type Redi-flo 2 de Grundfos. Les puits d'observation construits ayant un diamètre de 25 ou 50 mm ont été purgés et échantillonnés à l'aide d'une pompe manuelle, soit une tubulure avec un embout avec une valve à bille, de type Waterra. La purge des puits visait à obtenir une eau représentative de la formation géologique interceptée par le puits. L'évolution des propriétés physico-chimiques de l'eau purgée a été mesurée *in situ* à l'aide d'une sonde multi-paramètres de marque YSI ou Hanna. Les paramètres mesurés incluaient : pH, température (°C), oxygène dissous (OD) (% et mg/L), matières dissoutes totales (MDT) (mg/L) et conductivité spécifique (mS/cm). L'échantillon d'eau souterraine était prélevé uniquement lorsque la sonde confirmait une stabilité pour chacun des paramètres pendant au moins 5 minutes. La calibration de l'appareil était effectuée chaque matin.

Les analyses pour les anions (i.e. bromures (Br), chlorures (Cl), fluorures (F), nitrites ($N\text{-}NO_2$), nitrates ($N\text{-}NO_3$), sulfates (SO_4)), les nutriments (i.e. azote ammoniacal ($N\text{-}NH_3$), phosphore total inorganique (P)), les métaux (Al, Li, Sb, Mg, Ag, Mn, As, Mo, Ba, Ni, Be, K, Bi, Pb, B, Se, Ca, Si, Cd, Na, Cr, Sr, Co, Ti, Cu, U, Sn, V, Fe, Zn) et les sulfures (S) ont été effectuées pour chaque échantillon. Lors du prélèvement, les échantillons étaient placés dans des glacières et étaient par la suite acheminés vers un laboratoire externe, soit Maxxam Analytique. Le carbone inorganique dissous (CID), carbone organique dissous COD) et l'azote total ont également été analysés au laboratoire de l'INRS. Les échantillons étaient généralement acheminés aux laboratoires une fois par semaine. Les bouteilles dédiées à l'analyse des isotopes stables de l'eau (δ^2H - $\delta^{18}O$) et à l'isotope nitrate ($\delta^{15}N$) ont été conservées respectivement au réfrigérateur et au congélateur en attendant leur analyse, qui a été faite en 2012 au Delta Lab de la CGC. Les deux bouteilles requises pour l'analyse des isotopes stables de l'eau (δ^2H - $\delta^{18}O$) ont été

prélevées systématiquement à chacun des puits, tandis que les trois bouteilles pour l'isotope nitrate ($\delta^{15}N$) ont été prélevées de façon sélective, principalement à l'intérieur ou à proximité des zones agricoles. Finalement, les bouteilles associées aux analyses relatives à la datation de l'eau (^{3}H, ^{14}C et $\delta\,^{13}C$) ont aussi été prélevées de façon sélective, principalement dans les zones de recharge présumées pour le tritium et dans les secteurs susceptibles de contenir des eaux plus anciennes pour les isotopes du carbone. Ces analyses ont été effectuées dans les laboratoires EIL Waterloo (Ontario) pour le tritium (^{3}H) et Beta Analytic (Miami, USA) pour les isotopes du carbone (^{14}C et $\delta\,^{13}C$). La nomenclature des échantillons a été réalisée de façon séquentielle. Les échantillons provenant de puits d'alimentation privés portent les identifiants « INRS101 » à « INRS301 », ainsi que la date de prélèvement, tandis que les échantillons provenant des puits d'observation portent simplement le nom du puits foré, suivi de la date de prélèvement.

Il est à noter que les précipitations ont également été échantillonnées mensuellement durant 15 mois consécutifs (août 2010 à octobre 2011) pour analyser les isotopes stables ($\delta^{2}H$ - $\delta^{18}O$). Deux stations (collecteurs) ont été installées, l'une à Bromont et l'autre à Granby. Une couche de paraffine d'environ 2 à 3 cm d'épaisseur était laissée en permanence dans le collecteur pour empêcher l'évaporation. L'eau des précipitations était prélevée dans les derniers jours de chaque mois. L'appareil a été modifié à l'hiver pour pouvoir récolter la neige et le contenant était emmené à l'intérieur après chaque chute de neige pour que la neige fonde. Les détails des appareils et de l'échantillonnage sont fournis dans Thériault (2013). Ces échantillons ont servis à établir une droite météorique de façon à pouvoir mieux interpréter l'origine relative de l'eau souterraine et celle de l'eau de surface.

Une campagne visant l'échantillonnage d'eau pour analyser les gaz dissous a également eu lieu à l'automne 2012, en collaboration avec l'UQAM, l'Université Concordia et l'Université de Rennes, dans le cadre d'un projet financé par le FQRNT et le comité d'évaluation environnementale stratégique (ÉES) du MDDEFP. Les analyses de gaz rares (He, Ne, Ar, Rn), de certains hydrocarbures (méthane, éthane, propane) et de chlorofluorocarbures (CFC) et d'hexafluorure de soufre (SF_6) ont été réalisées. Ces travaux ne sont toutefois pas documentés dans ce rapport, parce que les résultats ne seront disponibles qu'à la fin de 2013.

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Comme mentionné plus tôt, les travaux d'échantillonnage de l'eau souterraine ont principalement été réalisés à l'été et l'automne 2010 sur tout le territoire de la Montérégie Est. Les puits conventionnels aménagés en 2011 ont toutefois été échantillonnés à l'automne 2011. Un total de 237 échantillons a été prélevé. Leur localisation est présentée sur les cartes 24 et 25 à l'annexe 2 ainsi que sur la figure 4.11 à la section 4.6. Les certificats d'analyse sont présentés à l'annexe 4. En résumé, les puits qui ont été échantillonnés sont répartis comme suit :

- 188 puits privés (aux fins de consommation ou non), dont 178 aménagés au roc
- 48 puits d'observation installés pour les besoins de ce projet
    1) 17 puits dans les sédiments aménagés à l'aide de la foreuse de l'INRS
    2) 25 puits au roc installés par une foreuse conventionnelle
    3) 4 puits dans les sédiments installés par une foreuse de type rotosonic
    4) 2 puits complétés dans le roc installés par une foreuse de type rotosonic
- 1 source

Ainsi, plus de 85 % des puits échantillonnés sont des puits ouverts au roc, le reste correspondant à des puits munis d'une crépine ou de puits-citernes aménagés dans des aquifères granulaires. Tel que mentionné plus haut, l'interprétation de l'ensemble des résultats géochimiques a fait l'objet d'un projet de maîtrise (Beaudry, 2013). Les résultats géochimiques

ont notamment fait l'objet d'analyses statistiques multivariée et graphique dont les résultats sont résumés à la section 4.6.

2.2.5 Essais et travaux dans les puits

2.2.5.1 *Installation de capteurs de pression*

Objectif

L'installation de capteur de pression a pour objectif d'enregistrer les fluctuations de la nappe de façon régulière et continue afin de suivre l'évolution à long terme de l'élévation de la nappe. A long terme (> 10 ans), ces données pourront servir à estimer l'impact des changements climatiques ou d'activités anthropiques sur les taux de recharge et sur l'exploitation des ressources en eau souterraine.

Méthodologie

Un capteur de pression non ventilé, dont la pression maximale est adaptée à la plage de fluctuation des niveaux d'eau de chaque puits, a été installé dans chaque puits à une profondeur assez grande pour qu'il ne soit pas dénoyé en période de bas niveau d'eau. La fréquence d'enregistrement a été fixée à 6 h afin de capter les fluctuations quotidiennes de la nappe dues aux changements de pression (dans le cas d'une nappe captive) ou à l'infiltration des précipitations (pour une nappe libre). Puisque les capteurs de pression installés sont non ventilés, des capteurs de pression barométrique ont également été installés dans la majorité des puits aménagés au cours du projet. Une attention particulière a été portée afin de s'assurer que les puits qui n'étaient pas munis d'un capteur de pression barométrique soient situés à proximité et à une altitude raisonnablement similaire d'un puits où la pression atmosphérique était mesurée. Les données recueillies permettent de calculer la profondeur de la nappe par rapport à la surface (Z_{nappe}) via l'équation suivante :

$$\mathrm{Z_{nappe}} = Z_{capteur} + (h_{tot} - h_{atm}) \qquad 2.1$$

où Z_{nappe} (m) et $Z_{capteur}$ (m) correspondent respectivement à la position de la nappe et la profondeur d'installation du capteur de pression par rapport à la surface du sol, h_{tot} (m) est la charge totale mesurée par le capteur de pression et h_{atm} (m) est la charge équivalente mesurée par le capteur de pression barométrique.

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Des capteurs de pression de 22 mm (0.875 po) de diamètre de la compagnie Solinst (modèles Levelogger Edge et Gold) ont été installés dans tous les puits conventionnels et rotosonic. Des capteurs de pression de plus petit diamètre (18 mm ou 0.75 po) de la marque Schlumberger (modèle Micro-Diver) ont été installés dans les puits de plus petit diamètre aménagés dans les dépôts meubles. En tout, 34 capteurs ont été installés, 28 dans le roc et 6 dans les dépôts meubles.

Une visite des puits a été effectuée deux fois par année en 2011 et 2012 pour télécharger les données des capteurs de pression et s'assurer que ceux-ci étaient fonctionnels. Tous les hydrogrammes obtenus (minimum de 1.5 ans) sont présentés à l'annexe 4. Tel que mentionné à la section 2.2.3.2, les puits d'observation aménagés dans le cadre du projet, ainsi que les capteurs de pression dont ils sont équipés, ont été légués au MDDEFP qui en assurera le suivi à partir d'avril 2013. La figure 2.11 présente un exemple d'hydrogramme de puits (puits P24 situé à Eastman), ainsi que les précipitations totales à la station météo la plus proche (Bonsecours). L'hydrogramme occupe le graphique du bas sur la figure et les précipitations

totales (pluie en bleu et neige en gris) hebdomadaires sont illustrées juste au-dessus. Les températures hebdomadaires moyennes sont illustrées dans la partie supérieure. Le nom de la station météo est fourni en haut à gauche, avec la distance au puits entre parenthèses. Les ronds rouges sur l'hydrogramme correspondent aux mesures avec une sonde à niveau d'eau (tiré des travaux de J-S Gosselin).

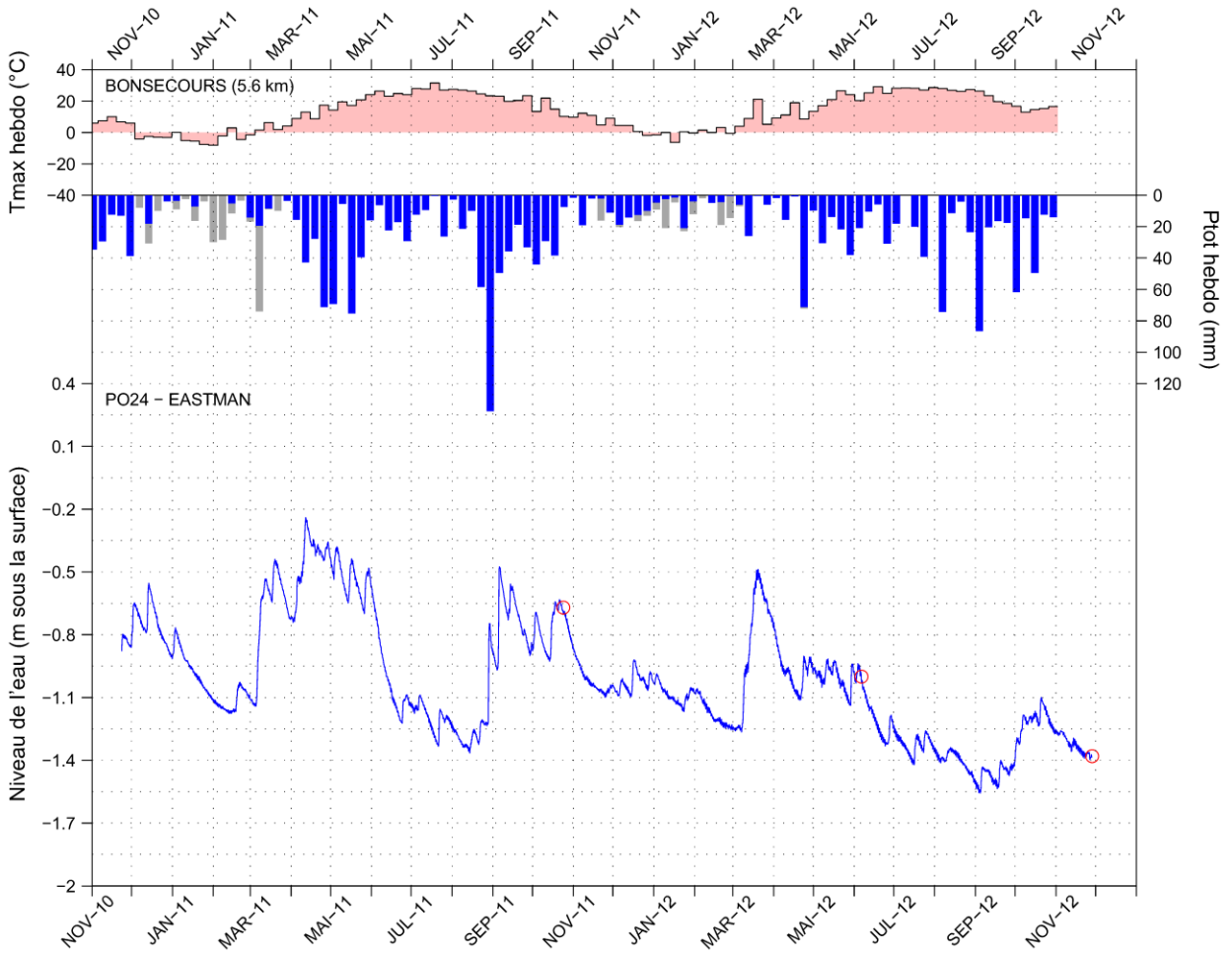


Figure 2.11 : Exemple de fluctuations du niveau d'eau au puits P24

2.2.5.2 Essais de perméabilité

Objectif

La connaissance des propriétés hydrauliques des formations géologiques est essentielle dans le cadre d'une étude de caractérisation hydrogéologique. Les essais de perméabilité (communément appelés « *slug tests* » en anglais), sont nettement moins longs et moins fastidieux que les essais de pompage conventionnels de 72 h et permettent tout de même d'obtenir une bonne estimation de la conductivité hydraulique selon le contexte investigué. Ces valeurs sont toutefois beaucoup plus locales que celles obtenues avec les essais de pompage du fait de l'impact limité de la zone affectée par le volume d'eau déplacé. Les valeurs de conductivité hydraulique (K) ainsi obtenues sont donc dites « ponctuelles ».

Méthodologie

Ces essais hydrauliques de courte durée ont été effectués dans presque tous les puits d'observation aménagés pour le projet. Quelques puits municipaux ou privés ont également été testés afin d'obtenir des valeurs de *K* plus représentatives pour certaines unités géologiques puisque ces puits sont généralement plus profonds, bien développés et ont une conductivité hydraulique locale élevée. Toutefois, comme les critères pour tester ces puits sont assez contraignants (puits ayant au moins 15 m dans le roc et un débit de plus de 2 gallons par minutes, dans lequel il n'y a pas de pompe et qui ne soit pas situé à proximité d'un autre puits en pompage), seulement quatre puits municipaux ou privés ont pu être ainsi testés.

Deux types d'essais de perméabilité ont été effectués pour obtenir des estimations de la conductivité hydraulique locale du roc. La première méthode, dite pneumatique, consiste à augmenter la pression d'air au-dessus de la colonne d'eau du puits (scellé pendant l'essai) pour la relâcher ensuite subitement, de manière à mesurer le rétablissement du niveau d'eau dans le puits. La seconde, dite d'« immersion de sonde », consiste à immerger ou à retirer rapidement de l'eau une sonde pour étudier le retour du niveau d'eau à l'équilibre (niveau statique).

Lors de ces essais, l'utilisation d'un capteur de pression a permis d'enregistrer les variations de niveau d'eau de façon précise, généralement à toutes les demi-secondes ou secondes. Les résultats de ces essais peuvent être interprétés avec différentes méthodes, dont la plus connue est celle de Bouwer et Rice (Bouwer, 1989). Les essais ont duré de 1 à 34 minutes, en fonction du type de formation géologique interceptée par le puits investigué.

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Le tableau 2.4 fait la synthèse des essais réalisés. Au total, 26 puits, incluant 3 puits municipaux ou privés et 23 puits d'observation aménagés au cours du projet, ont été testés avec l'une ou l'autre des méthodes, ou les deux. Les puits d'observation P08 et P25 n'ont pas été testés, soit parce qu'ils se trouvaient dans un endroit difficile d'accès pour l'équipement utilisé (P08), soit parce que le diamètre du puits était trop faible (P25). Sur les 26 puits investigués, seuls les résultats de 19 puits ont pu être utilisés pour évaluer la K de façon quantitative. Les sept autres puits ont montré un rétablissement piézométrique quasi-nul, suggérant une conductivité hydraulique très faible, de l'ordre de 1×10^{-8} m/s ou moins.

Les résultats de ces essais ont été comparés à ceux disponibles dans les rapports et bases de données provenant d'essais de pompage courts (fournissant la capacité spécifique) ou longs (ex. : essais 72 h). Cette comparaison est présentée à la section 4.1 de ce rapport.

Tableau 2.4 : Essais de perméabilité réalisés

Méthode utilisée [(1)]	**Nombre de puits** [(2)]	**Plage de conductivité hydraulique K (m/s)**
Immersion de sonde (*logging probe*)	12 / 26	$2.6\text{x}10^{-8}$ – $3.3\text{x}10^{-4}$
	7 / 26	< $1\text{x}10^{-8}$ (difficilement quantifiable)
Pneumatique (*air injection*)	7 / 26	$5.9\text{x}10^{-8}$ – $1.0\text{x}10^{-4}$

Notes :
(1) : Certains puits ont été testés avec les deux méthodes mais seule celle jugée la meilleure a été retenue pour l'estimation de K. De plus, il a été décidé de ne pas réaliser d'essai de perméabilité dans les puits où K a été estimé faible par interprétation du suivi piézométrique réalisé après certaines diagraphies.
(2) : Nombre de puits dans lesquels les mesures ont été effectuées.

La figure 2.12 présente un exemple d'interprétation et de résultat obtenus pour le puits P03 à Saint-Marcel-sur-Richelieu. L'ajustement de la droite semi-log de Bouwer et Rice (Bouwer, 1989) sur les données traitées de cet essai fournit une conductivité hydraulique de 4.0×10^{-6} m/s. La localisation des puits dont les résultats d'essais de perméabilité ont été conservés sont présentés à la figure 2.13.

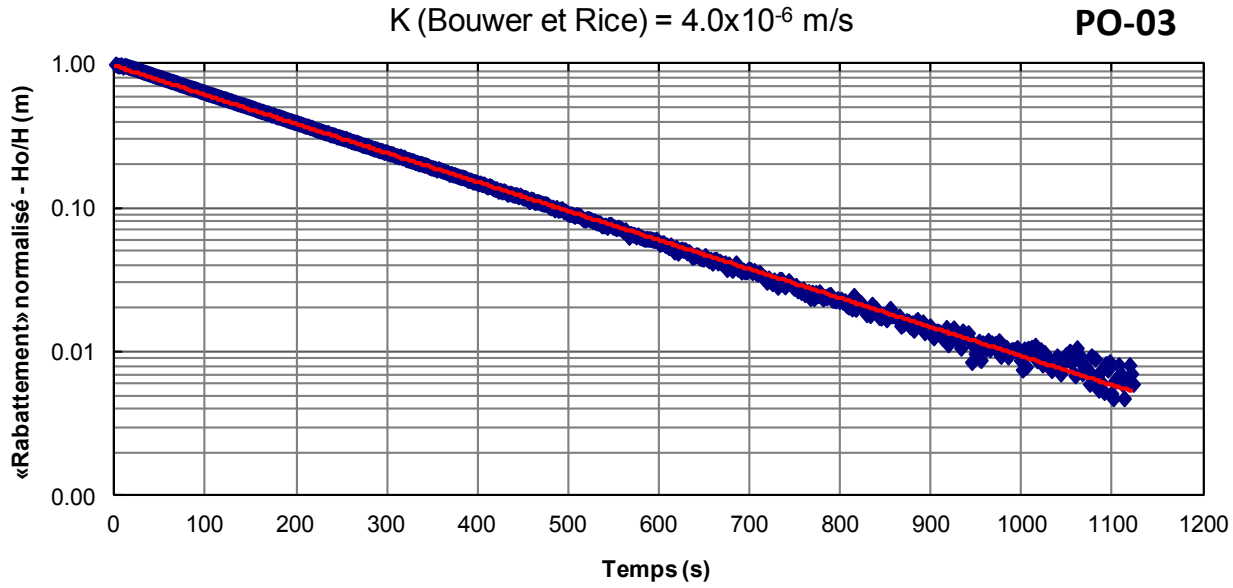


Figure 2.12 : Exemple d'interprétation au puits P03 avec la méthode de Bouwer et Rice

2.2.5.3 Diagraphies

Objectif

Les diagraphies servent à acquérir des informations sur les caractéristiques des puits, des unités géologiques et leurs fractures (ex. : ouverture, orientation, pendage, fréquence), ainsi que sur l'écoulement de l'eau souterraine (ex. : débit et transmissivité d'un intervalle fracturé).

Méthodologie

Ces travaux ont été réalisés en deux phases, une avec un collaborateur du USGS (Roger Morin) à l'automne 2010 et à l'été 2011 (26 puits visités) et une avec une équipe de la CGC d'Ottawa à l'automne 2011 (12 puits visités). La dernière campagne a permis de ré-investiguer huit puits qui avaient été visités lors de la campagne d'été 2011 alors que la caméra (*televiewer*) avait fait défaut. Les appareils utilisés pour cette dernière campagne étaient également plus récents et plus précis. La localisation des puits investigués est présentée à la figure 2.13.

Les sondes utilisées ont permis de mesurer le diamètre du puits (*caliper*), la radioactivité naturelle (*natural gamma*), la résistivité normale et la propagation acoustique du milieu (*full waveform sonic*), la température et la résistivité du fluide dans le puits, la fracturation observable aux parois (*acoustic televiewer*) et les débits des fractures perméables (par débitmètre).

Les profils verticaux obtenus permettent ainsi de distinguer les lithologies locales tout en estimant certaines de leurs propriétés (ex. : porosité, paramètres élastiques, densité et patrons de fracturation). Ces résultats servent également à mieux comprendre l'écoulement de l'eau souterraine dans le roc fracturé de la région (section 6.2).

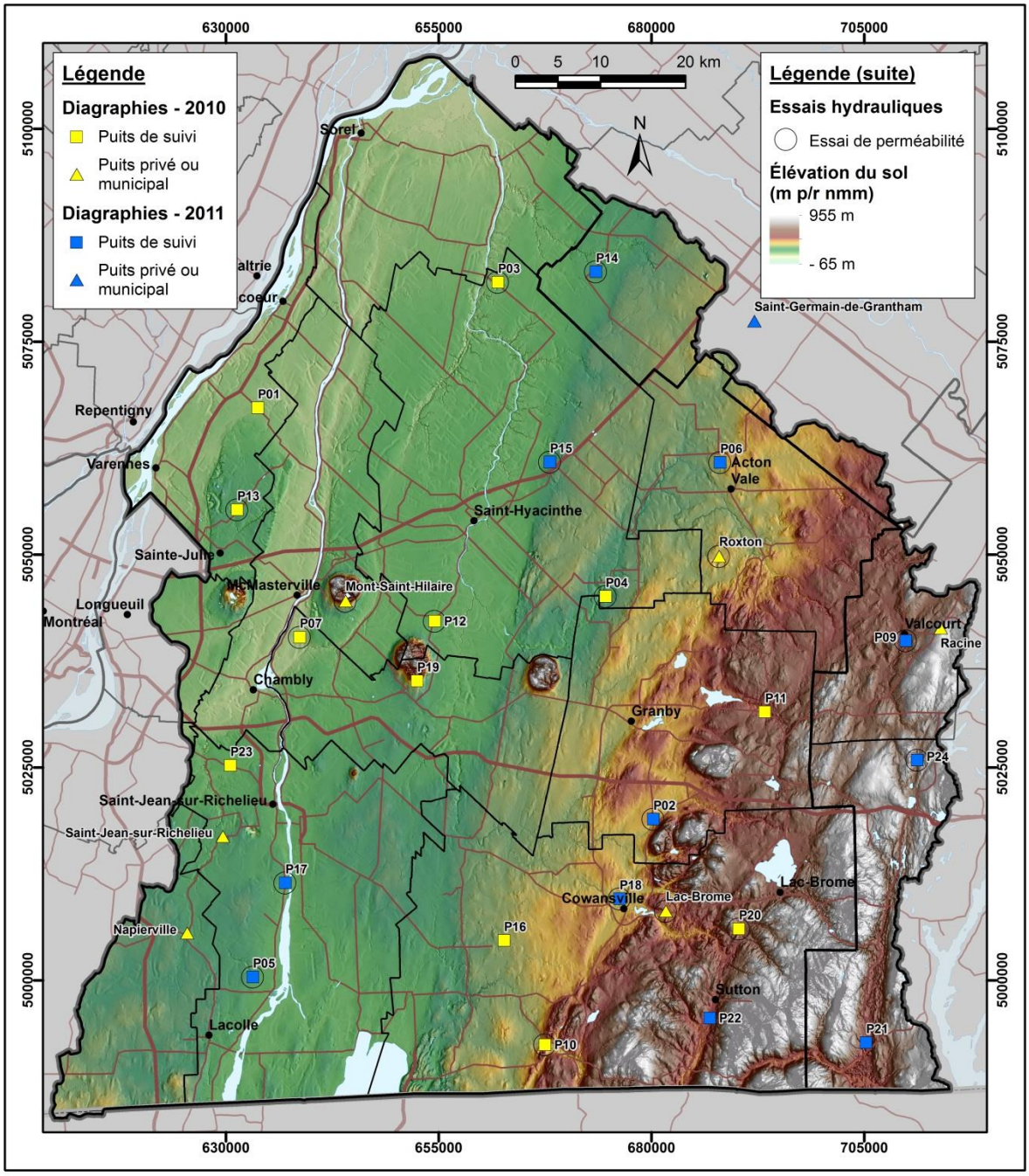


Figure 2.13 : Localisation des travaux de diagraphies et des essais hydrauliques

Le tableau 2.5 détaille les sondes qui ont été utilisées et présente aussi des exemples des propriétés recherchées par ces mesures. Les données acquises ont été interprétées avec le logiciel WellCAD. Les fractures ont été classifiées en trois types de structures avant d'être analysées avec des méthodes statistiques : ouvertes, fermées et zone altérée (ou « broken zone »). Pour éviter une sous-estimation de la quantité de fractures sub-verticales, la correction de Terzaghi a été apportée, tel que discuté dans Priest (1993), et un masque (« blind zone ») de 20˚ (Roy et al., 2011).

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Lors des 2 phases de travaux de terrain, il y a eu mesure de diagraphies dans 23 des 25 puits aménagés lors des forages conventionnels aux fins du projet, ainsi que dans 7 puits municipaux ou privés. Les résultats sont fournis à l'annexe 4 où des fichiers séparés montrent les diagraphies acquises par l'USGS et celles faites par la CGC. Plusieurs sondes géophysiques ont été utilisées. Généralement, les diagraphies obtenues comprennent des mesures en continu des paramètres suivants :

- diamètre du forage (*caliper*)
- résistivité de la roche autour du puits (*multifunction*)
- radioactivité naturelle des minéraux (*multifunction*)
- température et résistivité du fluide dans le puits (*multifunction*)
- relief des parois, par imagerie acoustique (voir figure 2.14) (*acoustic televiewer*)
- vitessse de propagation d'une onde acoustique dans le milieu (*full waveform sonic*)
- déviation du forage par rapport à la verticale

Tableau 2.5 : Sondes utilisées pour réaliser les diagraphies dans les puits

Sonde (nom *anglais*)	**Nombre de puits avec mesure**	**Exemple de caractéristiques déduites**
Caliper	26 / 30	localisation de fractures
Multifunction	26 / 30	lithologie/minéralogie
Acoustic televiewer	29 / 30	localisation et géométrie des fractures
Full waveform sonic	24 / 30	lithologie/minéralogie, porosité
Flowmeter	16 / 30	transmissivité des fractures

Les essais au débitmètre n'ont pas fourni de résultats très intéressants puisque les puits forés dans le cadre de ce projet étaient généralement peu transmissifs (peu de fractures avec écoulement significatif). La majorité du débit mesuré provenait généralement de la base du tubage, à l'interface des sédiments de surface et du roc.

La figure 2.14 présente un exemple d'images obtenues à l'aide de la sonde acoustique dans le puits P03, près de la municipalité de Saint-Marcel-sur-Richelieu. Dans la partie gauche, la figure illustre les temps de parcours des ondes acoustiques émises par la sonde, de la sonde jusqu'à la surface de réflexion. Dans la partie droite de la figure, ce sont les amplitudes des ondes réfléchies mesurées qui sont représentées, également en tons de gris. La sinusoïde bleue indique la présence d'une fracture de faible pendage et dirigée vers l'ouest, à une profondeur d'environ 33 m.

La paroi du puits est ici projetée en plan 2D. Puisque l'objet à représenter est cylindrique, l'abscisse est en degrés, 0° étant le Nord. Ainsi, on repère facilement les fractures car ces cavités augmentent le temps d'aller-retour des ondes qui y pénètrent et diminuent leur amplitude retournée. De plus, la projection 2D de ces plans inclinés coupant le puits cylindrique correspond à des sinusoïdes dont l'amplitude et le minimum donnent respectivement le pendage et la direction de chacune des fractures.

Les travaux de la dernière campagne ont fait l'objet d'un rapport de la CGC (Crow et al., 2013). Les résultats d'une partie des travaux de diagraphie étaient encore en traitement lors de la

rédaction de ce rapport. Ces travaux font notamment partie des travaux de maîtrise de Pierre Ladeveze et de doctorat de Marc Laurencelle. Certains résultats sont présentés à la section 6.2.

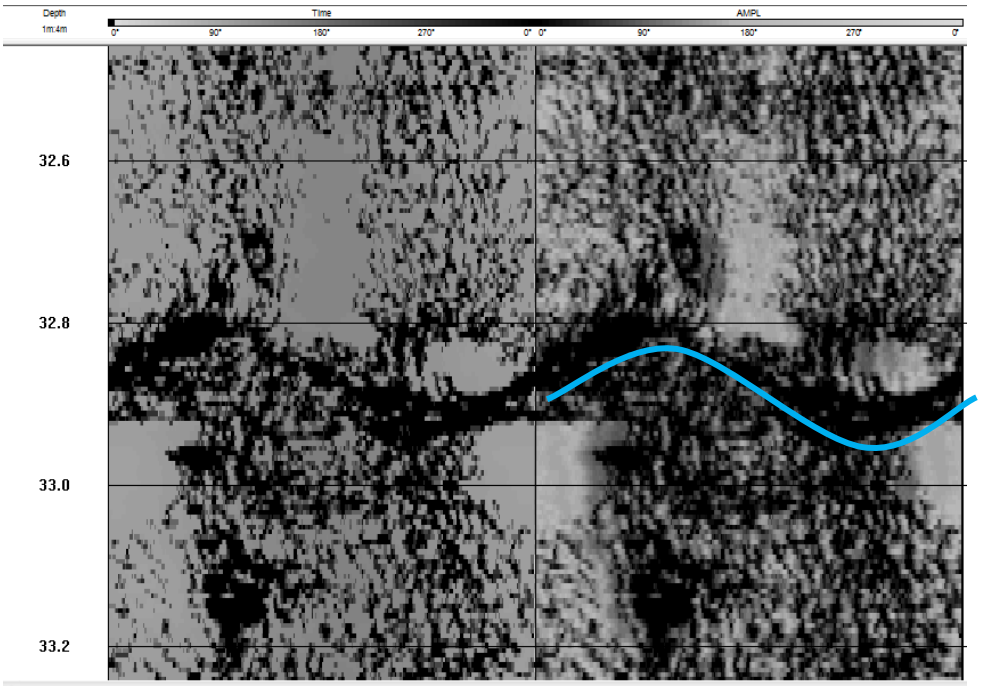


Figure 2.14 : Exemple de diagraphie acquise par la sonde « acoustic televiewer » au puits P03

2.2.6 Lysimètres et perméamètres de Guelph

2.2.6.1 Essais au perméamètre de Guelph

Objectif

Plusieurs mesures de conductivité hydraulique (*K*) ont été réalisées à l'aide d'un perméamètre de Guelph pour caractériser les dépôts en surface (dans le premier mètre de sol). La conductivité hydraulique permet de quantifier la perméabilité des sols. Elle est indispensable à la caractérisation des aquifères puisque le taux de recharge et la vulnérabilité de ces derniers dépendent en partie des propriétés de cette couverture géologique superficielle. Toutefois, très peu de valeurs étaient disponibles dans la zone d'étude.

Méthodologie

Les sites pour ces essais ont été sélectionnés en fonction de la carte préliminaire de la géologie du Quaternaire afin d'obtenir des valeurs représentatives des différentes unités géologiques retrouvées en Montérégie Est.

Le perméamètre de Guelph utilisé est celui fabriqué par Soilmoisture Equipment Corp (Guelph Permeameter Operating Instructions, 2010). Cet instrument fournit une mesure ponctuelle de la conductivité hydraulique *in situ* des sols à des profondeurs allant de 15 à 75 cm sous la surface. La méthode consiste à mesurer un débit d'infiltration de l'eau dans un sol non saturé à partir d'un trou vertical cylindrique au fond duquel un niveau d'eau constant (charge constante) est maintenu par le principe du vase de Mariotte (figure 2.15).

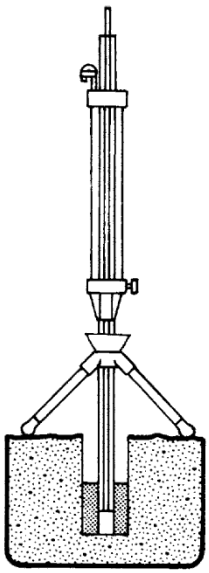


Figure 2.15 : Principe du perméamètre de Guelph (tiré de Soilmoisture Equipment Corp., 2010)

L'infiltration de l'eau dans le sol forme graduellement un volume de sol saturé autour du trou dont la dimension atteint après un certain temps un état quasi-statique qui est associé à un débit d'infiltration constant (figure 2.16). La valeur de ce débit permet de calculer, pour un diamètre de trou et une charge donnés, la conductivité hydraulique saturée du sol environnant.

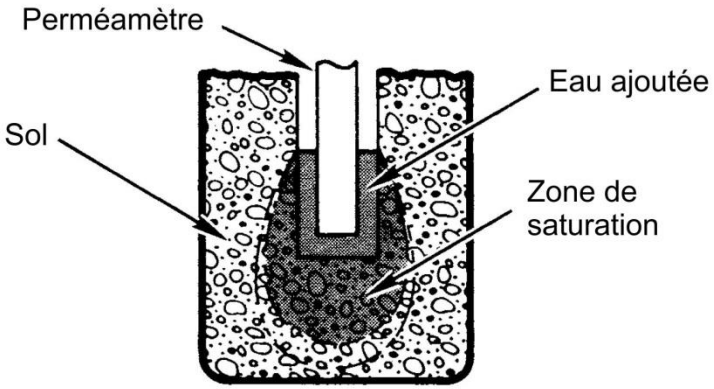


Figure 2.16 : Bulbe de sol saturé durant l'essai au perméamètre de Guelph (dessin tiré de Soilmoisture Equipment Corp., 2010)

Une description de la stratigraphie (0 - 1 m environ) a été faite à chacun des sites à partir de critères visuels et des échantillons de sol ont été récoltés pour lesquels des analyses granulométriques ont été réalisées dans les laboratoires de l'INRS.

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Des essais au perméamètre de Guelph ont été effectués à une trentaine de sites dont les unités géologiques sont représentatives de la Montérégie Est. La figure 2.17 présente la localisation de ces sites. En moyenne, 3 essais ont été réalisés à chaque site afin d'assurer la représentativité

des mesures et d'éliminer les valeurs extrêmes pouvant découler de la présence ponctuelle d'hétérogénéités macroscopiques.

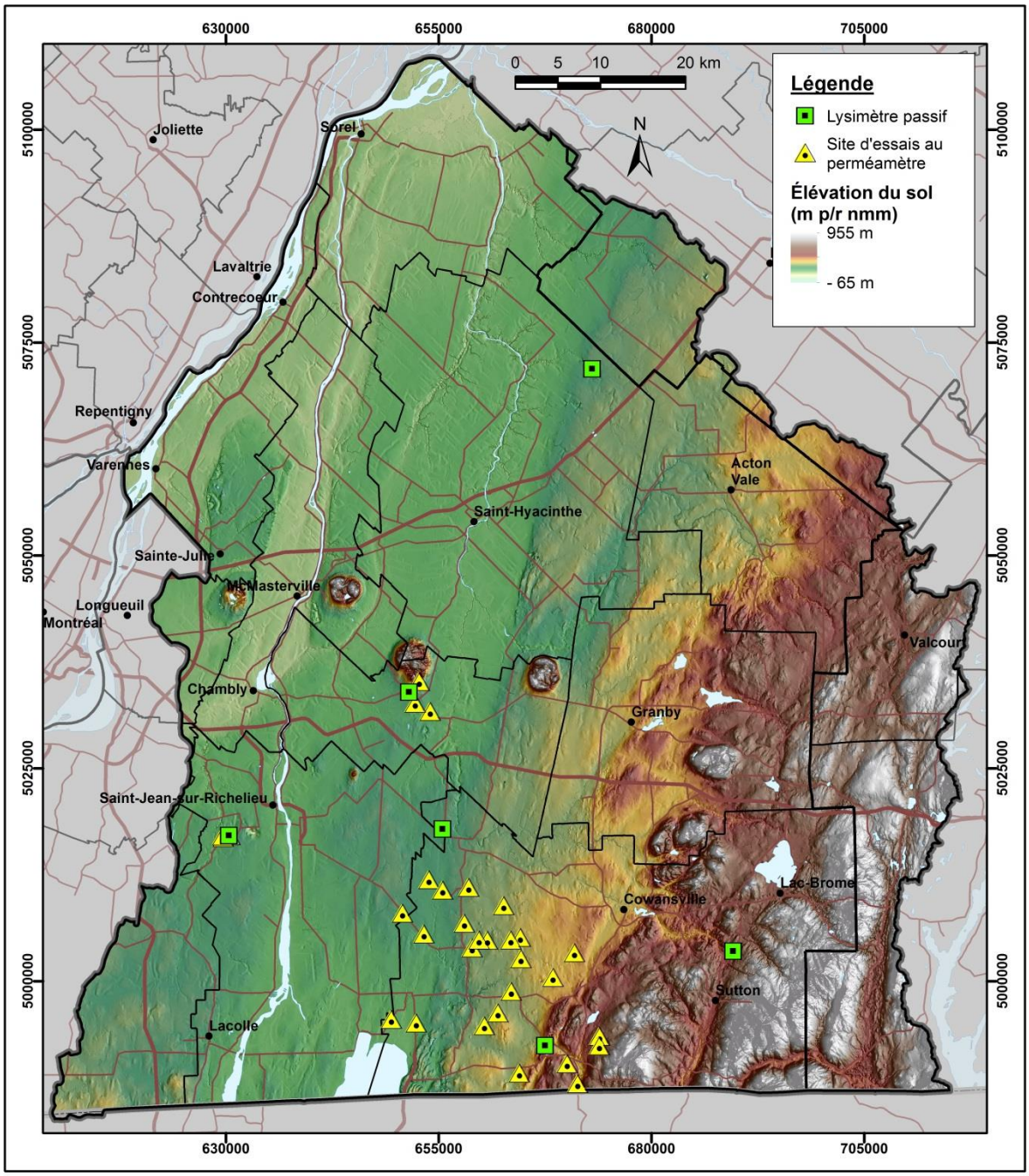


Figure 2.17 : Localisation des lysimètres et des essais au perméamètre

La figure 2.18 présente un exemple de mesures prises lors d'un essai dans une argile marine (Ma) réalisé dans le sud de la Montérégie Est. Le graphique présente le volume cumulé d'eau infiltrée dans le sol en fonction du temps. La pente de la partie linéaire du graphique donne directement le débit d'infiltration de l'eau dans le sol en régime permanent. Pour une forme de trou et une charge hydraulique données, la conductivité hydraulique saturée peut être calculée à partir de l'équation fournie dans le manuel d'utilisation du perméamètre de Guelph.

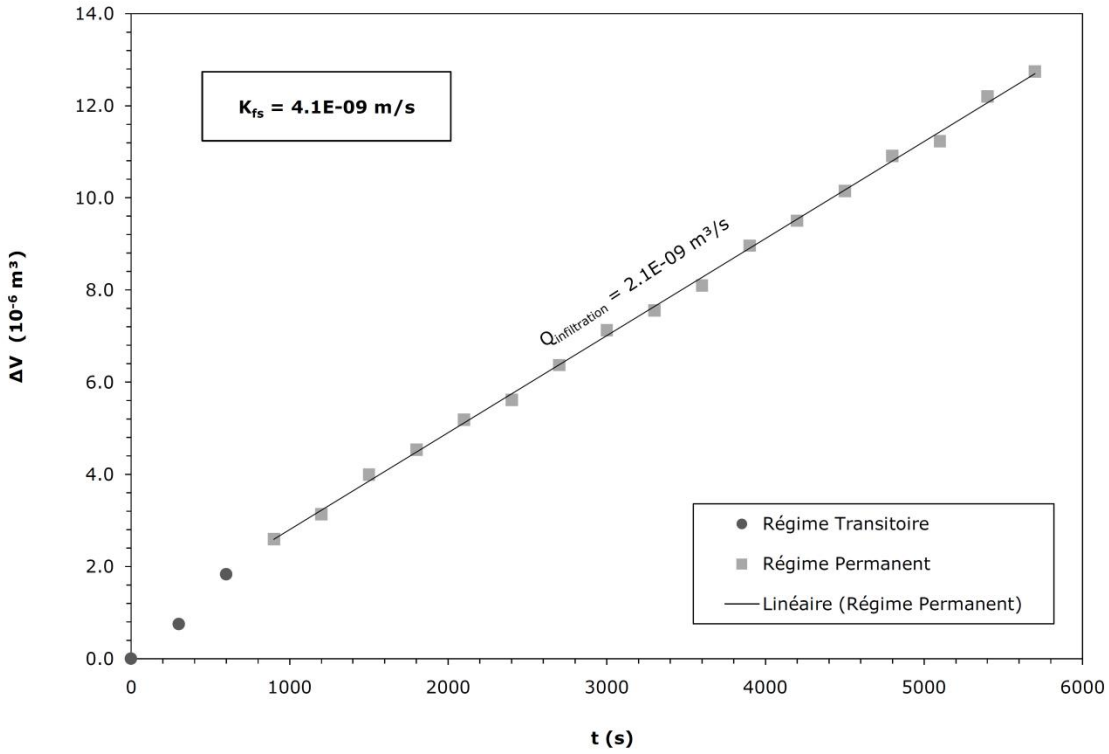


Figure 2.18 : Exemple de résultats pour un site situé à l'ouest de Saint-Jean-sur-Richelieu

2.2.6.2 Installation de lysimètres

Objectif

Les lysimètres (ou fluxmètres à contrôle passif) permettent d'obtenir une mesure *in situ* précise et continue dans le temps de la recharge, à l'échelle locale. Ce type d'appareil constitue une façon abordable et robuste de récolter et de mesurer l'eau drainée à travers les dépôts meubles de la zone non saturée.

Méthodologie

Des lysimètres passifs de la compagnie Decagon, combinés à un enregistreur de données (« datalogger ») de la même compagnie, ont été sélectionnés pour ce type de mesures étant donné leur fiabilité et leur coût raisonnable. L'instrument a été enfoui sous la surface à une profondeur d'environ 1 m et recouvert d'une colonne intacte de sédiments (i.e. non remaniés autant que possible) pour obtenir des valeurs d'infiltration les plus représentatives possibles du milieu naturel. L'eau drainée à travers les sédiments est captée et acheminée par capillarité à un réservoir, à l'intérieur duquel un capteur permet de mesurer le volume d'eau recueilli (voir figure 2.19). Ce type de fluxmètre est dit à contrôle passif car la pression (négative par rapport à la pression atmosphérique) qui est reproduite par cet appareil pour récolter l'eau de drainage a une valeur constante qui dépend de la conception même de celui-ci. Ainsi, la capacité de ce type d'instrument à recueillir des valeurs représentatives de flux de drainage dépend de la correspondance entre la pression reproduite par l'appareil et les conditions retrouvées dans le sol environnant lors des épisodes de recharge (Gee et al., 2009; Mertens, 2007).

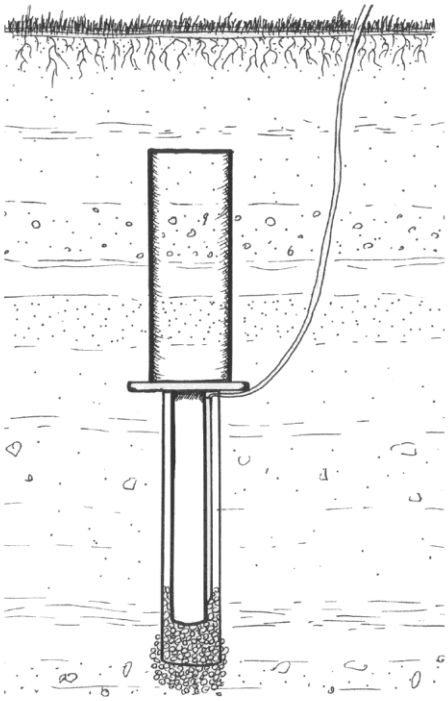


Figure 2.19 : Fluxmètre à contrôle passif (lysimètre) de la compagnie Decagon

Afin de limiter l'erreur induite sur la mesure par un écart entre la pression de l'appareil et celle du milieu environnant, une colonne de sol contenue dans un cylindre est déposée au-dessus de l'appareil (Gee et al., 2002). L'utilisation des fluxmètres pour l'estimation de la recharge n'est pas triviale et nécessite une planification rigoureuse afin de s'assurer que les conditions hydrogéologiques et climatiques des sites instrumentés soient appropriées pour les limites imposées par la conception de l'appareil.

Six lysimètres ont été installés dans le cadre du projet, dont un en 2009, quatre à l'été 2010 et un en 2011. La localisation des lysimètres est présentée à la figure 2.17 tandis que le tableau 2.6 fournit la description sommaire des sols aux six sites. Plusieurs techniques ont été testées pour l'installation de nos appareils, dont celle qui est proposée dans le manuel de l'utilisateur (Decagon Devices, 2011). Le site de la Ferme expérimentale l'Acadie (appartenant à Agriculture et Agroalimentaire Canada) a d'ailleurs servi à tester 4 d'entre elles : à la rétrocaveuse sans remblaiement graduel, à la tarière manuelle à gros diamètre, à la tarière à moteur et à la rétrocaveuse avec remblaiement graduel et compaction. Le site de Frelighsburg a servi à tester l'installation à la rétrocaveuse avec tarière. Les autres sites ont été installés avec la technique développée dans le cadre de cette étude, soit à la rétrocaveuse avec remblaiement graduel et compaction; celle-ci sera présentée en détail dans la thèse de Jean-Sébastien Gosselin (en préparation). Les lysimètres 2 et 6 n'ont jamais été en mesure d'acquérir des données car ils ont été systématiquement inondés durant les périodes où l'infiltration est importante. Les sols fins rendent l'installation de ce type d'appareil difficile. Ces deux fluxmètres avaient été installés dans un till fin compact, recouvert d'un till remanié, formant temporairement, durant ces périodes d'infiltration significative, une nappe perchée.

Tableau 2.6 : Description des sites d'installation de lysimètres

ID	Contextes hydrogéologiques	Localisation	Dépôts Quaternaires
1	Pourtour des collines Montérégiennes	Rougemont	Sédiments littoraux grossiers et till remanié
2	Zone externe des Appalaches (nord du Piedmont)	Ste-Hélène-de-Bagot	Sédiments littoraux
3	Zone externe des Appalaches (sud du Piedmont)	Farnham	Sédiments littoraux
4	Zone externe des Appalaches (sud du Piedmont)	Frelighsburg	Sédiments littoraux
5	Zone interne des Appalaches	Sutton	Sédiments fluvioglaciaires
6	Plate-forme du St-Laurent (partie sud)	Saint-Jean-sur-Richelieu	Till remanié

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

L'installation de six fluxmètres à contrôle passif (lysimètres) a été effectuée dans différentes unités géologiques représentatives de la zone d'étude. Deux de ceux-ci n'ont toutefois pas pu fournir de résultats et le fluxmètre installé à Farnham dans le cadre d'un autre projet n'a pas fourni de données représentatives utilisables car celui-ci a été installé dans un remblai sableux, qui n'est pas représentatif d'aucune unité dans la zone d'étude.

Il est à noter que l'installation de ces appareils est délicate, complexe et fastidieuse, particulièrement dans le cas des sols fins. L'installation de chaque lysimètre a pris environ une journée, mais la méthode avec laquelle ils l'ont été a évolué dans le temps et certains ont dû être déterrés et réinstallés plusieurs fois. La figure 2.20 présente le flux quotidien pour le lysimètre du site de Rougemont, localisé près du puits P19. La figure présente également les fluctuations du niveau d'eau souterraine au puits P19.

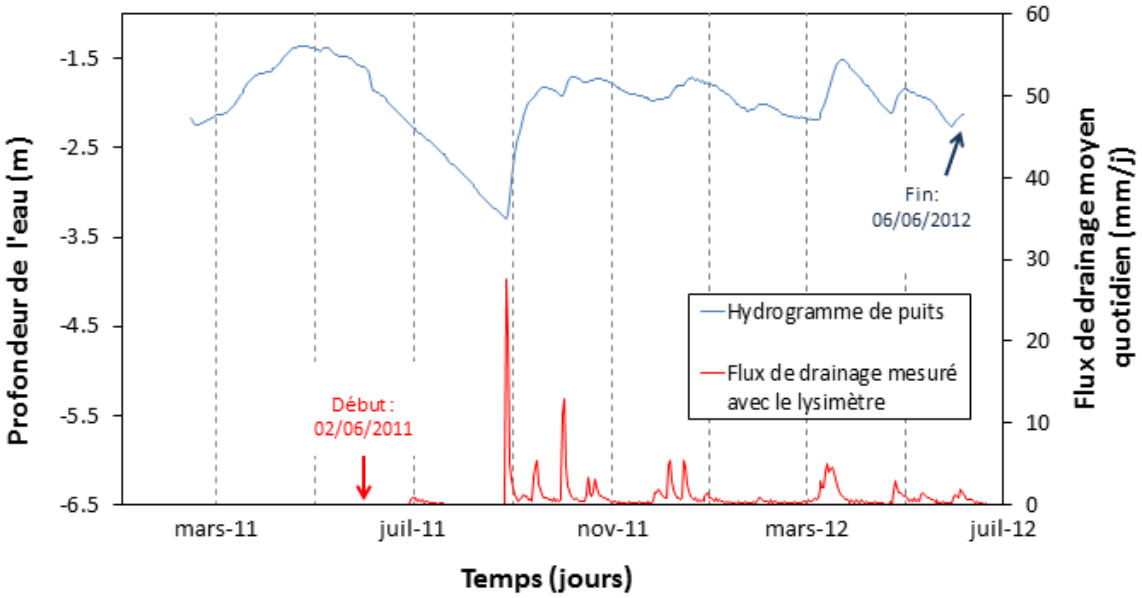


Figure 2.20 : Mesures prélevées au lysimètre et au puits d'observation P19

La recharge annuelle (mm/an) peut être estimée en faisant la somme des flux quotidiens sur 365 jours. Ces résultats serviront donc à estimer la recharge à 4 sites. De plus, ils peuvent servir à estimer le débit spécifique (S_y, *specific yield*) lorsque celui-ci n'est pas connu via l'équation de l'estimation de la recharge à l'aide des hydrogrammes de puits (Gosselin et al., 2012).

2.2.7 Installation de sondes d'humidité et de température

Objectif

L'installation de ce type de sondes a été réalisée dans le cadre d'un projet doctoral et avait pour but de calculer un flux de recharge et un bilan hydrique de surface.

Méthodologie

À partir des séries temporelles de température mesurées à différentes profondeur sous la surface, il est théoriquement possible de calculer un flux de recharge par résolution du problème inverse, en définissant une fonction objectif minimisant les écarts entre les températures mesurées et celles simulées par un modèle de transport advectif-conductif de la chaleur. Les sondes d'humidité, accompagnant les sondes de température, serviront à caler un modèle hydrologique de surface (NOAH-LSM) afin de calculer un bilan hydrique de surface tenant compte des flux d'énergie, d'eau et de carbone échangés entre le sol, la neige et la végétation et l'atmosphère.

Les sondes TDR mesurant la température et l'humidité du sol ont été installées à différentes profondeurs près de cinq des six lysimètres (seul le site de Farnham n'a pas fait l'objet de ces travaux). Les mesures ont été acquises aux 15 minutes à l'aide d'enregistreurs de données Em50 de la compagnie Decagon auxquels sont également connectés les lysimètres. À chacun des sites, trois sondes TDR ont été installées à des profondeurs allant de 50 à 100 cm, sauf pour le site du mont Rougemont où seulement deux sondes ont été installées à des profondeurs de 65 et 100 cm respectivement. A chaque site, les 3 sondes ont été installées à environ 30 cm de séparation l'une de l'autre et à trois profondeurs différentes afin d'enregistrer les différences d'humidité et de température dans le profil. Les sondes TDR qui ont été utilisées dans ce projet se terminent par un « peigne » à trois branches, qui sert à enfoncer la sonde dans le sol, dans les parois ou le fond de l'excavation. Ces travaux d'installation étaient relativement rapides par rapport à ceux des lysimètres (environ ½ journée de travail par site).

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Les sondes TDR ont été placées à côté de cinq des six lysimètres. Ces travaux ont été effectués à l'été 2011. La figure 2.21 illustre les mesures récolées sur le site de Rougemont à 65 cm de profondeur. Les mesures de température sont en rouge et celles d'humidité en bleu. Les températures ont varié de 17 à 2°C depuis juin 2011.

2.2.8 Scannographie et analyses XRF des échantillons de sol

Objectif

Des analyses par fluorescence à rayons X (XRF) ainsi que scannographies à rayons X ont été effectuées sur l'ensemble des échantillons prélevés lors des quatre forages rotosonic (voir section 2.2.3.3). Ces analyses sont utiles pour la description des lithologies et la distinction des unités stratigraphiques ainsi que pour la sélection de sous-échantillons pouvant être analysés pour de la datation (coquillages, bouts de bois et matière organique), l'identification des environnements de déposition des sédiments, la distinction de la provenance des sédiments, ainsi que la géochimie des sols (leur contenu en divers éléments, dont les métaux).

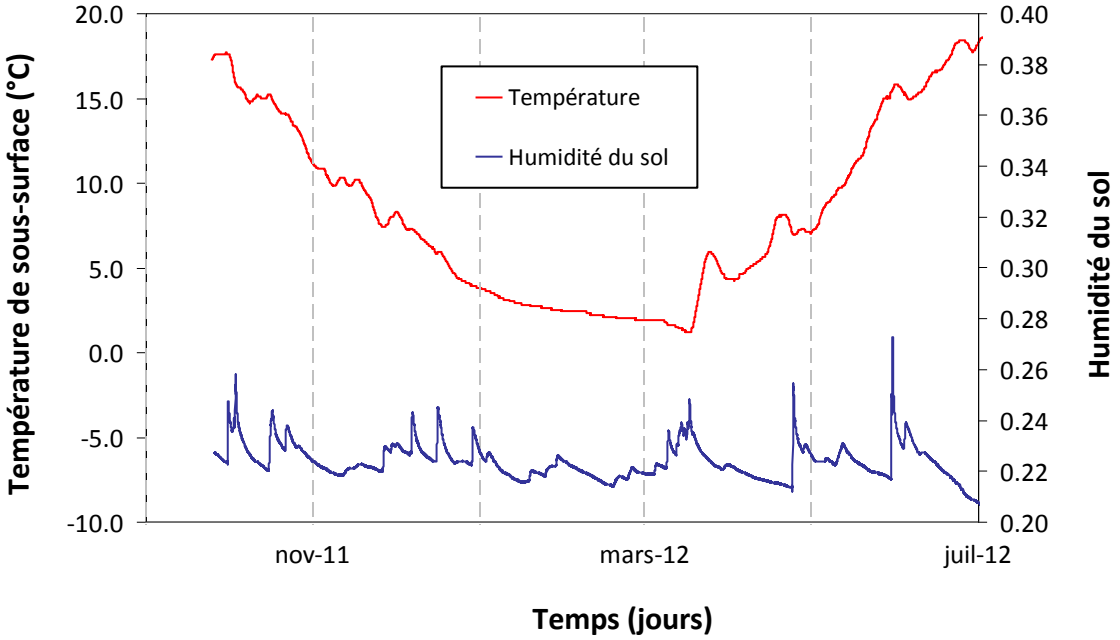


Figure 2.21 : Exemple de données collectées par les sondes TDR à un des sites (Rougemont, 65 cm de profondeur)

Méthodologie

Les scannographies à rayon X ont été réalisées à l'INRS au Laboratoire multidisciplinaire de scanographie pour les ressources naturelles et le génie civil. Tous les échantillons de sols (i.e. « carottes ») en bon état ont été analysés par tomodensitomètre (ou « scannées »). Pour ce faire, il a fallu d'abord classer, identifier et transporter délicatement les sacs de carottes à analyser sur l'appareil de façon à ce que le haut de la carotte soit balayé en premier. Il est important de minimiser la perturbation de l'échantillon lors de la manipulation. Pour ces analyses, les carottes peuvent rester dans les sacs de plastique dans lesquels ils ont été placés après extraction du tube d'échantillonnage de la foreuse rotosonic. Pendant l'analyse, les résultats peuvent être observés en direct afin d'identifier les éléments d'intérêt présents dans l'échantillon (ex. : cailloux, stratification, coquillages, traces fossiles, morceaux de bois ou matière organique, pièces de foreuse ou débris).

Les analyses XRF (ou analyses par fluorescence à rayon X) mesurent les éléments du tableau périodique compris entre le potassium (K) et le bismuth (Bi). Ces analyses ont été effectuées sur l'ensemble des échantillons de sols prélevés par la foreuse rotosonic. Les analyses ont été faites sur des échantillons d'un centimètre de diamètre et deux micromètres d'épaisseur au laboratoire de l'INRS, à l'aide d'un appareil prêté par l'Université Laval. Les analyses ont été réalisées à tous les 50 cm, en faisant une incision dans les sacs de 15 cm et en enlevant la partie superficielle remaniée de la carotte de sol (environ 3 cm).

Par la suite, la description stratigraphique des carottes a été effectuée et/ou révisée par un géologue, en consultant les journaux de forage ainsi que les résultats de la scannographie et analyse XRF afin de cibler les intervalles à échantillonner pour d'autres analyses (ex. : granulométriques, minéralogiques, géochimiques de sol, eau interstitielle des argiles, micro-restes et macrofaune).

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Environ 140 m de carottes ont été analysés par tomodensitomètre (i.e. « scannés »), analysés par XRF et décrits par un géologue. Étant donné que le « matériel » (les carottes de sol) est limité et que certaines analyses sont destructives, il était primordial de commencer par l'analyse la moins destructrice et de terminer par la plus destructrice. Les résultats des analyses XRF sont fournis à l'annexe 4, sur les journaux de forages. La figure 2.22 montre un exemple de scannographie d'un d'échantillon de sol prélevé par la foreuse rotosonic au forage RS01.



Figure 2.22 : Exemple de scannographie d'un échantillon de sol prélevé lors du forage RS01

2.2.9 Extraction d'eau interstitielle dans les argiles

Objectif

Le but de l'extraction d'eau interstitielle des échantillons de la couche silto-argileuse d'origine marine (possiblement associée à la mer de Champlain) était d'obtenir ses caractéristiques physico-chimiques, dont sa salinité, afin de pouvoir estimer le rapport du mélange eau-douce / eau saline de cette eau et de la comparer à des valeurs de la littérature.

Méthodologie

Des échantillons d'une longueur de 30 cm ont été prélevés des carottes de sol provenant des forages rotosonic à différentes profondeurs. Deux d'entre eux, soient les forages RS01 et RS02,

sont situés dans le secteur nord-ouest de la Montérégie Est où ils recoupent la couche silto-argileuse d'intérêt. Les résultats préliminaires obtenus de la scannographie et de l'analyse par fluorescence à rayons X ont permis d'identifier cinq sections silto-argileuses d'intérêt, qui montraient une minéralogie et une géochimie relativement uniformes. Trois échantillons provenaient du forage RS01, à des profondeurs d'environ 15 m, 18 m et 23 m, et deux échantillons provenaient du forage RS02, à des profondeurs d'environ 10 m et 17 m.

Une presse hydraulique appartenant au département de Géologie et de Génie géologique de l'Université Laval a été utilisée pour extraire l'eau interstitielle. Entre 10 et 25 ml d'eau seulement ont pu être extraits en moyenne par échantillon. Pour cette raison, une quantité limitée de paramètres chimiques a pu être analysée à partir des cinq échantillons. Ces échantillons ont été analysés pour les paramètres suivants au laboratoire de l'INRS-ETE ainsi qu'au Delta-Lab de la CGC (isotopes seulement) :

- Cations majeurs (Ca^{2+}, Na^{+}, Mg^{2+}, K^{+}, Sr^{2+})
- Anions majeurs (Cl^{-}, SO_4^{2-})
- Alcalinité, pH et conductivité électrique
- Isotopes $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$

Synthèse des travaux de terrain et exemple de résultats

Les cinq échantillons de sédiments silto-argileux qui ont été prélevés des carottes des forages RS01 et RS02 ont été pressés hydrauliquement pour y extraire l'eau interstitielle à l'été 2011. Cette eau a été analysée afin de connaître ses caractéristiques et le mélange ou la dilution de cette eau possiblement issue en partie de la mer de Champlain. Ces travaux font partie du projet de maîtrise de Châtelaine Beaudry et les résultats ainsi que le protocole d'extraction sont présentés dans son mémoire (Beaudry, 2013).

2.3 Saisie, validation et archivage des données

2.3.1 Développement de la base de données à référence spatiale

2.3.1.1 Contexte

La réalisation d'un projet de cartographie hydrogéologique implique le traitement et la gestion d'une grande quantité de données utilisées par une équipe de plusieurs professionnels. Par le passé, les différents intervenants d'un projet intégraient les données soit dans des chiffriers électroniques (ex. : Excel), soit dans une base de données relationnelle (ex. : Access), afin de les partager, les traiter et réaliser différentes analyses ou cartes thématiques. Le partage des données avec ce type de fichiers menaçait notamment l'intégrité des données puisque chacun avait généralement une version de cette base de données et la modifiait à sa guise. Par ailleurs, cette manière de faire ne permettait pas l'utilisation de règles de validation communes ou le respect des protocoles communs pour la saisie, le format et la sauvegarde périodique des données et des cartes.

Afin de pallier ce problème, une base de données relationnelle commune aux différents projets PACES a été développée à l'aide du système de gestion de bases de données PosgreSQL.

2.3.1.2 Historique

Le modèle qui a servi à développer cette base de données commune provient de travaux de cartographie géologique et hydrogéologique régionale réalisés par la Commission géologique du Canada (CGC) au cours des 20 dernières années.

Afin de mieux gérer les données provenant de travaux géologiques de terrain, la CGC avait développé, en 1991, un outil de gestion de données nommé Fieldlog (Brodaric, 1992). Ce dernier utilisait un système de gestion de bases de données (SGBD) qui permettait la connexion à plusieurs systèmes d'information géographique (SIG). En 1995, lors de l'un des premiers projets de cartographie hydrogéologique régionale au Canada, dans la MRC de Portneuf, la CGC décida de développer un modèle de SGBD basé sur celui que l'on retrouve dans Fieldlog, mais en l'adaptant pour la gestion des données hydrogéologiques. Ce modèle fut intégré dans une application nommée GIMS (Genome Information Management System), qui permettait de faire le lien entre le SGBD et les logiciels SIG (MDDEFP, 2008a). Par la suite, le modèle de SGBD de GIMS a évolué avec les différents projets de cartographie régionale réalisés par la CGC, incluant des ajouts aux différentes librairies afin d'uniformiser le lexique utilisé pour la saisie des différents types de données hydrogéologiques. Ce modèle s'appelait alors FieldCapture et était principalement utilisé pour recueillir les données nécessaires à la réalisation des projets provenant de bases de données, campagnes de terrain, rapports d'expertise, etc.

Pour le développement de la base de données proposée pour les projets PACES, les grandes lignes de FieldCapture ont été reprises en y ajoutant de nouvelles tables pour mieux représenter les divers objets (ex. : puits, source, forage, sondage) et les observations s'y rattachant (ex. : niveau d'eau, stratigraphie, échantillon d'eau). De plus, les différentes librairies ont été mises à jour afin d'y incorporer de nouveaux éléments, tels que les codes de facies stratigraphiques du SIGEOM et de nouvelles municipalités. L'appellation « base de données de terrain » (BD terrain ci-après) a été retenue pour distinguer cette base de données commune.

2.3.1.3 Structure générale

La base de données terrain est divisée en 26 tables dont 18 ont été retenues dans le cadre des projets PACES. La liste complète des tables avec la description de leurs champs respectifs est présentée à l'annexe 5. Tel que mentionnée ci-haut, il y a 3 tables centrales pour cette base de données : la table « tbl_loc » qui détaille les localisations des objets, la table « tbl_objet » qui détaille les objets reliés au champ d`étude et la table « tbl_observation » qui détaille le type d'observation fait sur l'objet, ainsi que l'environnement dans lequel s'est faite cette observation. Le terme « objet » désigne toute entité importante à la réalisation d'un projet de cartographie. Pour exister, l'objet doit être rattaché à une localisation géographique. De même, pour qu'une observation existe, elle doit être attachée à un objet. L'intégrité des tables et des données qu'elles contiennent est assurée par des relations définies à l'aide d'un identifiant unique (ou clé primaire) à chaque table. Cet identifiant est ajouté comme champ (ou clé secondaire) dans la table que l'on doit joindre. Il est donc possible de faire le lien entre les différentes tables par le biais de ces clés et ainsi avoir un portrait complet de l'information disponible pour un objet, soit sa localisation, le détail de l'objet et les différentes observations effectuées sur ce dernier. La base de données terrain contient également une centaine de librairies (ou « dictionnaires ») qui permettent l'utilisation d'une nomenclature prédéfinie pour plusieurs des champs de la base de données. Ceci permet donc de normaliser les données en encadrant les termes ou valeurs utilisées ou saisies par tous les utilisateurs. Ces librairies sont reliées aux tables par le biais de leur clé primaire, permettant ainsi la saisie de données en dehors du cadre de ces librairies. La description des principaux champs des 18 tables de la base de données terrain est résumée ci-dessous.

La table « tbl_loc » est composée de 31 champs dont les principaux sont :

- loc_id : Clé primaire servant d'identifiant unique pour chaque entrée de la table
- x : Coordonnée en x de l'objet
- y : Coordonnée en y de l'objet

- z : Élévation de l'objet par rapport au niveau moyen de la mer (lorsque disponible)
- loc_proj : Système de projection des coordonnées

Les autres champs de la table « tbl_loc » servent de métadonnées (i.e. informations complémentaires sur les données) et viennent préciser la donnée. Par exemple :

- notes : Commentaires sur la localisation
- loc_src_xy_type : Type de source de données pour les coordonnées provenant de la librairie « lib_litho_code_cgq_sigeom »

La table « tbl_objet » contient les informations de base sur l'objet. Ses principaux champs sont :

- obj_id : Clé primaire servant d'identifiant unique pour chaque entrée de la table
- loc_id : Clé secondaire servant à établir une relation avec la table « tbl_loc »
- obj_type : Type d'objet provenant de la librairie « lib_obj_type » qui inclut les différents objets définis dans le cadre des projets PACES (ex. : puits, trou (forage ou tranchée), sondage (CPT ou RPSS), station météorologique, etc.)
- src_donnees : Source générale des données provenant de la librairie « lib_src_donnees » qui détaille les différentes sources de données reliées à un projet. Les sources détaillées des données sont documentées par la table « tbl_ref », laquelle est liée à la table « tbl_observation » puisque les données sur les observations peuvent provenir de différentes sources.

La table « tbl_observation » réunit toutes les observations effectuées sur les objets. Le détail de ces observations est définit dans les différentes tables décrites plus loin. Les principaux champs sont :

- observation_id : Clé primaire servant d'identifiant unique pour chaque entrée de la table et se retrouvant dans les tables incluant les données liées aux différentes observations
- objet_id : Clé secondaire provenant de la table « tbl_objet » et qui permet de faire le lien avec les objets
- obs_interet_lib : Intérêt ou (type) de l'observation (ex. : niveau d'eau, essai de pompage, échantillonnage, etc.) provenant de la librairie « lib_obs_interet » décrivant le type d'observation
- obs_date : Date de l'observation permettant de distinguer les différentes « visites » à un objet et, par le fait même, les différentes observations (ex. : tous les niveaux d'eau pris à un puits correspondent à différentes observations)
- projet_id : Identifiant du projet dans le cadre duquel l'observation a été effectuée

Les autres champs de la table « tbl_observation » permettent de détailler un peu plus l'environnement et les conditions météorologiques lors de l'observation, ainsi que la personne ayant fait l'observation.

Les tables « tbl_puits_infra » et « tbl_puits_captage » sont reliées directement à l'objet et permettent de détailler certaines caractéristiques des objets correspondant à des puits. Ainsi, la table « tbl_puits_captage » renseigne sur l'utilisation et l'utilisateur du puits ainsi que sur le type d'aquifère exploité. La table « tbl_puits_infra » décrit quant à elle l'infrastructure du puits, soit, par exemple, la profondeur et le diamètre du puits ainsi que les informations sur la (ou les) crépine(s).

Les tables « tbl_log_strat », « tbl_pompage », « tbl_niv_eau », « tbl_samp_eau », « tbl_samp_eau_situ_qual » définissent quant à elles les observations effectuées sur les objets.

Elles sont reliées directement à la table « tbl_observation » par une clé secondaire. Une description sommaire de leur contenu est fournie ci-dessous.

- tbl_log_strat : Cette table définit la stratigraphie reliée à un objet par le biais de la table « tbl_observation ». Les codes utilisés pour décrire les intervalles stratigraphiques des objets proviennent de la librairie « lib_litho_code_cgq_sigeom » qui contient les codes abrégés CGQ (MDDEFP, 2008a) ainsi que les codes SIGEOM (MRN, 2009).
- tbl_pompage : Cette table définit les essais de pompage réalisés sur un objet puits. Les données reliées aux essais incluent la date et l'heure de départ et de fin de l'essai, le débit de pompage, le niveau d'eau dynamique maximal ainsi les paramètres estimés (ex. : conductivité hydraulique, emmagasinement, transmissivité et capacité spécifique.). L'ensemble des données brutes liées à l'essai peuvent être retrouvées à l'aide de la table « tbl_ref » où les documents d'où proviennent ces observations sont identifiés.
- tbl_niv_eau : Cette table regroupe les données de niveau d'eau statique liées aux objets correspondant à des puits ou des piézomètres. Ces données proviennent de différentes sources (ex : levés de terrain manuels ou provenant de données de capteurs de pression ou d'essais de pompage). Les essais de pompage dont les données de niveau d'eau sont incluses dans cette table sont liés aux données via une clé secondaire.
- tb_samp_eau_situ_qual : Cette table décrit les observations qualitatives faites sur le terrain relativement à un échantillon d'eau (ex. : couleur, goût, présence d'huile, turbidité, etc.) et permet également de faire le lien avec la table « tbl_samp_eau_situ_res » qui présente les résultats obtenus lors de mesures quantitatives aussi prises sur le terrain (ex. : conductivité spécifique, ph température, etc.).
- tbl_samp_eau : Cette table décrit les échantillons d'eau prélevés à un objet. Ici encore, la clé primaire « samp_id » permet de faire l'identification unique de chaque échantillon et le lien avec les autres tables qui décrivent la géochimie. Différentes informations sont collectées ou découlent de l'échantillonnage, dont les principales sont : le nom donné à l'échantillon, la provenance de l'échantillon (ex. : puits, robinet intérieur ou extérieur, etc.), le type d'eau (ex. : eau souterraine ou eau de surface) et l'information reliée à la purge. Les tables complémentaires « tbl_samp_eau_ana » et « tbl_samp_eau_res » sont liées à la table « tbl_samp_eau » et viennent quant à elles détailler le type d'analyse effectuées et les résultats sur chacune de ces analyses.

La figure 2.23 présente le schéma simplifié de la BD terrain, qui s'appuie sur les principales étapes de collecte des données de terrain avec des exemples d'objets, d'observations et de données. Ces étapes sont représentées par trois éléments conceptuels importants :

- La localisation géographique
- Les types d'objets observés
- L'observation effectuée sur ces objets

Afin de faciliter et de normaliser la saisie des données dans la structure de la BD de terrain, des formulaires de saisie accessibles via internet ont également été développés. La figure 2.24 présente un exemple du formulaire pour saisir la localisation et la description d'un objet (ex. : puits, forage, sondage, affleurement, point de départ d'un levé géophysique), tandis que la figure 2.25 illustre un exemple du formulaire permettant de saisir des observations (ex : échantillonnage d'eau ou de sol, niveau d'eau, stratigraphie, mesures *in situ* géochimiques, données d'essais de pompage) liées à cet objet.

Comme système de gestion de base de données (SGBD), il a été décidé d'utiliser le serveur PostgreSQL. Ce serveur est gratuit et possède plusieurs outils pour la manipulation des données, autant tabulaires qu'à référence spatiale (point, ligne et polygone).

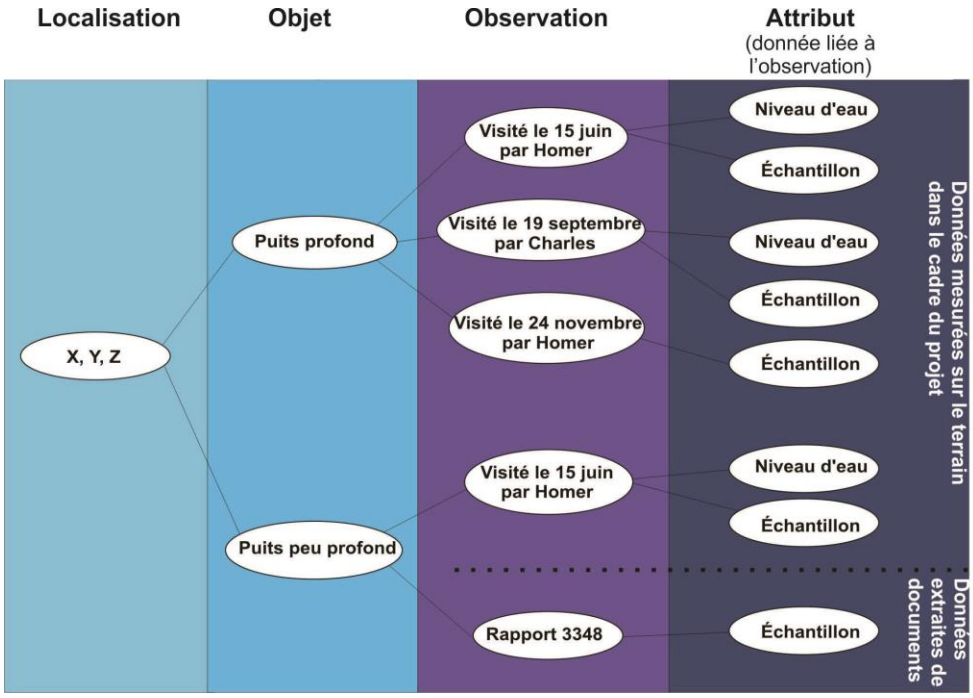


Figure 2.23 : Représentation schématique du modèle de collecte de données sur le terrain

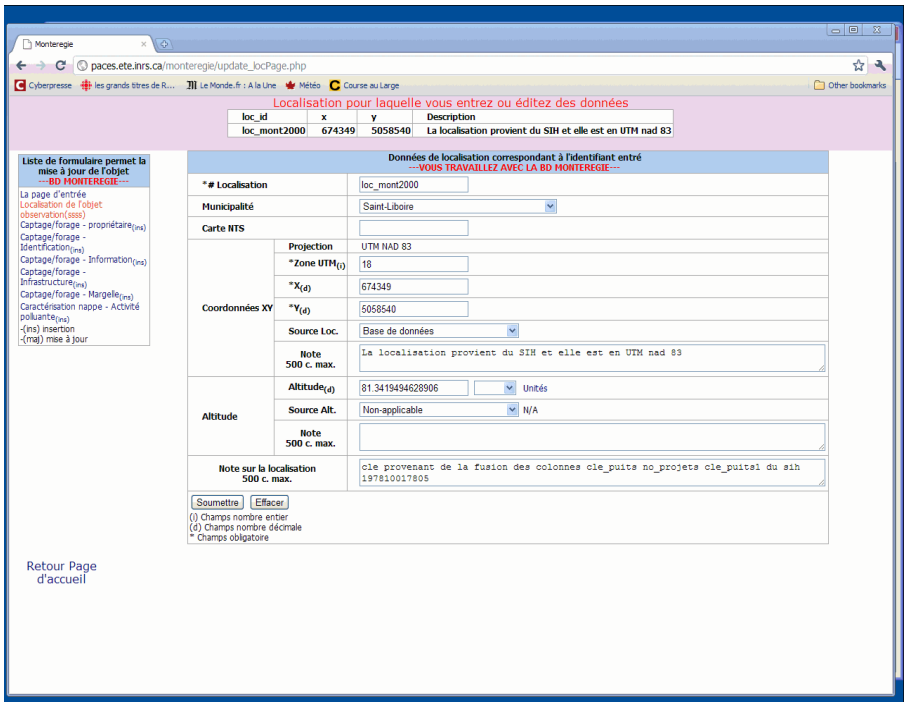


Figure 2.24 : Exemple de formulaire de saisie pour la localisation d'un objet

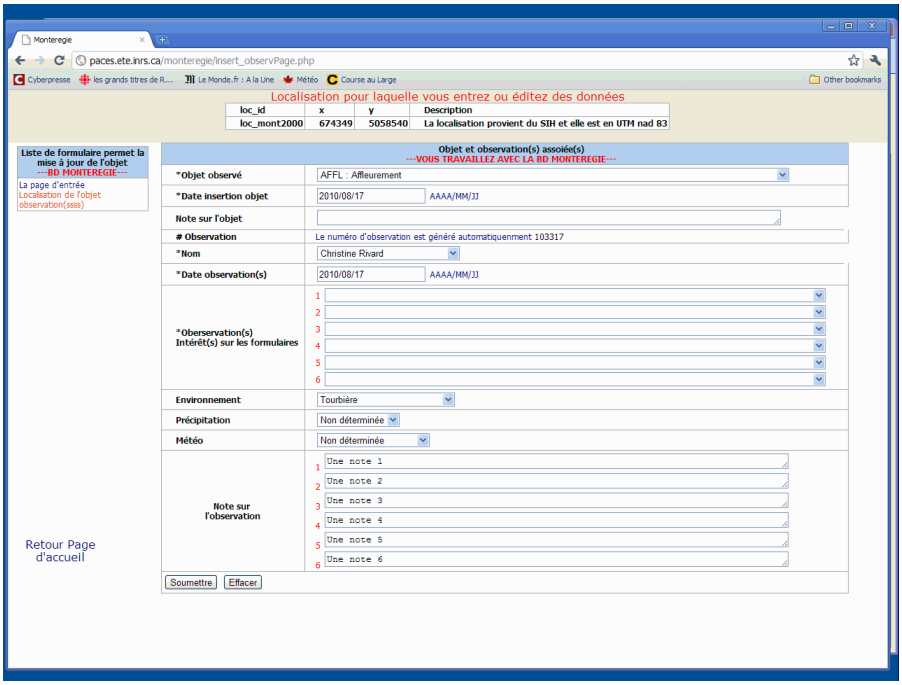


Figure 2.25 : Exemple de formulaire de saisie pour les observations effectuées pour un objet

Afin de permettre le développement des livrables cartographiques du projet directement à partir de la BD terrain, le moteur d'accès ArcSDE (Spatial Database Engine) a été utilisé comme interface afin de faire le lien entre la BD terrain et les produits cartographiques développés dans ArcGIS. La figure 2.26 est une représentation simplifiée des composantes nécessaires à l'utilisation d'un SGBD à l'aide des produits ESRI (ArcGIS).

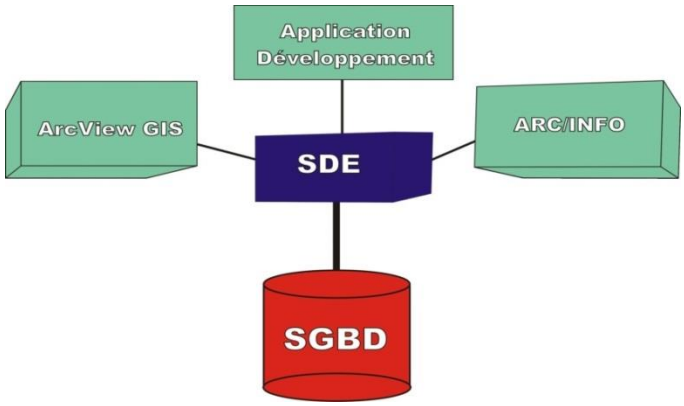


Figure 2.26 : Représentation schématique de la base de données commune

Les termes utilisés sur la figure 2.26 sont :

- SGBD : système de gestion de base de données (ex.: PostgresQL, Oracle, DB2)
- SDE : moteur d'accès au SGBD (ou « Spatial Database Engine »)

2.3.2 Vérification et validation des données

La validation des données compilées est un processus souvent négligé mais qui peut avoir un impact significatif sur la qualité et la représentativité des produits (ou livrables) cartographiques réalisés à partir de la base de données. Pour ce projet, l'exercice principal de validation des

données colligées a été réalisé au terme de la collecte et de l'intégration des données. Afin d'orienter et d'harmoniser l'exercice de vérification et de validation des données, le protocole de validation élaboré par le GRIES a été adapté pour le projet Montérégie Est (voir annexe 3) afin d'atteindre des objectifs de validation qui correspondaient le mieux aux données disponibles pour la région et aux traitements qui devaient être appliqués. Le processus de validation a été développé de façon itérative afin de détecter le plus de cas problématiques possibles au sein de la base de données.

La validation a permis d'éliminer, jusqu'à un certain niveau, les incohérences qui sont soit des données dupliquées (doublons), erronées (valeur inadéquate dû à une mauvaise saisie de la donnée) ou mal positionnées (erreur sur la localisation). Ainsi, les résultats des interpolations et des calculs statistiques qui servent à la réalisation directe ou indirecte des livrables ont été améliorés par l'élimination ou la correction de ces incohérences.

Le processus de validation qui a été suivi dans le cadre de cette étude peut être divisé en deux phases, en fonction des outils utilisés : 1) validation par analyse spatiale dans ArcGIS et 2) validation sur les données descriptives dans PostgreSQL.

2.3.2.1 Validation par analyse spatiale

La première phase de la validation a été réalisée à l'aide des divers outils d'analyse spatiale disponibles dans ArcGIS. Cette validation a permis d'identifier deux types de conflits potentiels entre les objets de la base de données (ex. : puits ou forages) et d'autres informations liées à la localisation des objets :

- Validation de la cohérence de la localisation d'un objet avec les limites municipales afin de s'assurer que l'objet se trouve dans la bonne municipalité (tel qu'indiqué dans les données descriptives associées à l'objet). Ce critère de validation est VL1 et les différentes valeurs possibles sont :
    1) Aucun conflit spatial identifié
    2) Conflit spatial identifié et corrigé
    3) Conflit spatial identifié mais localisation considérée adéquate
    4) Conflit spatial identifié mais non corrigé
    5) Non applicable (n/a)
- Validation de la cohérence de la localisation d'un objet avec le réseau hydrographique afin de vérifier si un objet est situé dans l'eau, ce qui est peu probable pour la majorité des objets considérés. Ce critère de validation est VL2 est les valeurs possibles sont :
    1) Aucun conflit spatial identifié
    2) Conflit spatial identifié et corrigé
    3) Conflit spatial identifié mais localisation considérée adéquate
    4) Conflit spatial identifié mais non corrigé
    5) Non applicable (n/a)

Cette première phase de la validation a permis de corriger, et à l'occasion d'éliminer, des objets qui présentaient un mauvais positionnement (pour différentes raisons). Dans ce projet, 110 puits ou forages présentaient initialement un conflit spatial avec le réseau hydrographique ou les limites municipales. Lorsque possible, les localisations erronées de ces objets ont été corrigées, permettant ainsi de réduire à 5 le nombre d'objets avec un conflit spatial. Ces 5 objets (puits ou forages) ont par la suite été exclus pour la réalisation des livrables du projet.

2.3.2.2 Validation sur les données descriptives dans PostgreSQL

Cette seconde phase de la validation a été effectuée directement dans la base de données terrain, en développant des fonctions dans PostgreSQL (avec le langage procédural PL/pgSQL).

Cette manière de faire a permis une grande flexibilité au niveau de la validation, tout en préservant l'intégrité des données et en évitant le transfert celles-ci dans un autre logiciel pour effectuer la validation. Tous les objets de la base de données terrain ont été validés pour tous les types de données, même si certains critères de validation ne s'appliquaient pas à certains objets (ex. : les objets représentant des sources ne pouvaient pas servir pour la validation de la profondeur au roc, obtenant ainsi la valeur n/a).

Les neuf étapes de validation de cette seconde phase sont décrites ci-dessous, dans l'ordre dans lequel elles ont été réalisées. Avec les étapes de validation décrites à la section 2.3.2.1, elles ont permis de déterminer quels objets pouvaient servir à la réalisation des différents livrables. De toutes les étapes de validation, celle concernant l'identification des doublons est sans doute la plus importante car elle peut avoir un impact sur tous les livrables du projet. Toutefois, puisque l'un des critères servant à l'identification des doublons est la profondeur du forage, la première étape consiste à valider cette information.

- Validation de la profondeur d'un objet (VT1) afin de vérifier si une profondeur est nulle, négative ou aberrante pour un contexte donné. Lorsque la profondeur était manquante, cette dernière était ajoutée en utilisant la profondeur de la dernière unité stratigraphique reliée à cet objet si cette observation était disponible dans la base de données. Les différentes cotes pour ce critère de validation sont :
    1) Aucune erreur identifiée
    2) Erreur identifiée mais corrigée
    3) Profondeur manquante mais extraite de la dernière unité stratigraphique
    4) Erreur identifiée et non corrigée ou aucune information disponible sur la profondeur et la stratigraphie
    5) Non applicable (n/a)

  Les objets ayant la cote 4 ou plus pour ce critère de validation n'ont pas été conservés. Ainsi, 333 objets ont été rejetés pour la réalisation de tous les livrables.

- Identification des doublons (VD1) afin de vérifier si un même objet existe plus d'une fois dans la base de données. Pour un objet donné, les informations suivantes ont été comparées à celles de tous les objets présents à l'intérieur d'un rayon de recherche de 200 m : coordonnées géographiques de l'objet, profondeur de l'objet et année de réalisation. Une tolérance de ± 1 m a été utilisée pour la comparaison des profondeurs. Les différentes cotes pour ce critère de validation sont :
    1) Objet unique dont les coordonnées peuvent ou non être uniques mais dont l'année de réalisation et la profondeur sont différentes
        a) Objet dont la profondeur est la plus importante (lorsque les coordonnées ne sont pas uniques)
        b) Objet dont la profondeur n'est pas la plus importante (lorsque les coordonnées ne sont pas uniques)
    2) Objet dont les coordonnées sont identiques à celles d'un (ou plusieurs) autre(s) objet(s) et dont la différence de profondeur est supérieure à 1 m et l'année de réalisation n'est pas disponible
        a) Objet dont la profondeur est la plus importante lorsque la dernière unité stratigraphique correspond à des dépôts meubles
        b) Objet dont la profondeur est la plus importante lorsque la dernière unité stratigraphique correspond à du roc
        c) Objet dont la profondeur n'est pas la plus importante pour a) ou b)
    3) Objet avec doublon(s) identifié(s) selon la cote 6 mais qui a été conservé comme référence unique

4) Objet avec doublon(s) probable(s), dont la date de réalisation n'est pas disponible mais dont les coordonnées et la profondeur (±1 m) sont identiques à celles d'un (ou plusieurs) autre(s) objet(s)
5) Objet avec doublon(s) probable(s), dont la profondeur et la date de réalisation ne sont pas disponibles mais dont les coordonnées sont identiques à celles d'un (ou plusieurs) autre(s) objet(s)
6) Objet avec doublon(s) dont les coordonnées, l'année de réalisation et la profondeur (±1 m) sont identiques à celles d'un (ou plusieurs) autre(s) objet(s)
7) Non applicable (n/a)

Pour la cote 3, la provenance des objets a été utilisée afin vérifier lequel des doublons était conservé. Le poids de la provenance a été établi en fonction de la source des données, de la plus fiable à la moins fiable.

1) Projet PACES
2) Rapport de consultants
3) MTQ
4) MRN
5) CCEG
6) SIH

A noter que les objets ayant les cotes 1a, 1b, 2a ou 2b ont été légèrement déplacés (±1 m) afin d'éviter les situations où deux objets valides se retrouvaient à la même localisation. Cette opération était nécessaire afin de réaliser les différentes interpolations servant à la création directe et indirecte des livrables. Au total, 4 513 objets ont reçu la cote 4 ou plus pour ce critère de validation et ont donc été rejetés pour la réalisation de tous les livrables.

- Validation de la cohérence entre la profondeur totale d'un objet et l'épaisseur des couches stratigraphiques (VT2). Les différentes cotes pour ce critère de validation sont :
  1) Aucune erreur identifiée
  2) Différence observée (> 1 m) et corrigée
  3) Différence <= 1 m (aucune correction nécessaire)
  4) Différence <= 1 m après correction du dernier intervalle stratigraphique
  5) Différence > 1 m après correction du dernier intervalle stratigraphique
  6) Différence > 1 m non corrigée car aucune information disponible sur la stratigraphie
  7) Non applicable (n/a)

  Au total, 1 331 objets ont obtenus la cote 5 ou plus et ont par conséquent été rejetés pour la réalisation de certains livrables.

- Validation de la cohérence entre la profondeur totale d'un objet et le niveau d'eau statique (VT3). Une tolérance de ± 1 m a été utilisée pour la comparaison de la profondeur et du niveau d'eau. Les différentes cotes pour ce critère de validation sont :
  1) Niveau statique < Profondeur totale
  2) Niveau statique < Profondeur totale (après correction)
  3) Niveau statique disponible mais profondeur totale non disponible
  4) Niveau statique > Profondeur totale
  5) Non applicable (n/a) (aucune données sur le niveau d'eau statique)

  Au total, 8 816 objets ont obtenu une cote de 4 ou plus pour ce critère de validation et n'ont donc pas été utilisés pour la réalisation de certains livrables. A noter que plusieurs objets, soit 8 794, n'avaient aucune information sur le niveau d'eau statique.

- Validation de la cohérence entre les niveaux d'eau statique et dynamique mesurés lors d'un essai de pompage (VT4). Une tolérance de ± 1 m a été utilisée pour la comparaison des niveaux d'eau. Les différentes cotes pour ce critère de validation sont :
    1) Niveau statique <= Niveau dynamique
    2) Niveau statique <= Niveau dynamique (après correction)
    3) Niveau statique disponible mais niveau dynamique non disponible
    4) Niveau statique > Niveau dynamique
    5) Non applicable (n/a)

  Au total, 16 729 objets ont obtenu la cote 4 ou plus pour ce critère de validation et ont été rejetés pour la réalisation de certains livrables. De ce nombre, 16 692 objets ne possédaient aucune information sur les niveaux statiques ou dynamique.

Pour les étapes de validation VT5, VT6, VT7 et VT8, un calcul de la moyenne et de l'écart-type a été effectué afin de vérifier les profondeurs totales, les profondeurs au roc et les niveaux d'eau statiques ainsi que les épaisseurs d'argile pour chacun des objets (i.e. forages ou puits). Le calcul a été effectué lorsque cinq objets ou plus se trouvaient dans un rayon de 200 m autour de l'objet à valider. Ces étapes de la validation servaient d'indicateurs afin de repérer les zones à vérifier lors des différentes interpolations effectuées sur les données retenues. Aucun objet n'a été rejeté à l'aide de ces critères de validation.

- Comparaison de la profondeur totale d'un objet avec les valeurs des objets adjacents (VT5). Pour ce critère, la profondeur à valider a été comparée avec la moyenne (± l'écart-type) des valeurs de profondeur totale des objets situés dans un rayon de 200 m. Ce critère de validation a permis d'identifier les objets dont la profondeur était significativement différente de celles des objets les entourant. Bien qu'une différence importante entre deux profondeurs totales adjacentes ne signifie pas nécessairement une erreur, ce critère a tout de même permis de détecter, et de corriger au besoin, certaines valeurs aberrantes (*outliers*). Les différentes cotes pour ce critère de validation sont :
    1) Différence (valeur vs moyenne) inférieure à l'écart-type calculé pour les objets adjacents
    2) Nombre d'objets inférieur à 5 dans le rayon de recherche
    3) Différence (valeur vs moyenne) supérieure à l'écart-type calculé pour les objets adjacents
    4) Non applicable (n/a)

  Comme mentionné plus haut, ce critère de validation sert d'indicateur et donc aucun objet n'a été rejeté. Au total, 28 225 objets ont obtenu la cote 2, 2 187 objets ont obtenus la cote 3 et 5 154 ont obtenu la cote 4.

- Comparaison de la profondeur au roc d'un objet avec les valeurs des objets adjacents (VT6). Pour ce critère, la profondeur à valider a été comparée avec la moyenne (± l'écart-type) des valeurs de profondeur au roc des objets situés dans un rayon de 200 m. Les différentes cotes pour ce critère de validation sont :
    1) Différence (valeur vs moyenne) inférieure à l'écart-type calculé pour les objets adjacents
    2) Nombre d'objets inférieur à 5 dans le rayon de recherche
    3) Différence (valeur vs moyenne) supérieure à l'écart-type calculé pour les objets adjacents
    4) Non applicable (n/a)

  Ce critère de validation a permis d'identifier les objets à vérifier (principalement ceux avec les cotes 3 et 4) lors des interpolations nécessaires à la réalisation directe ou

indirecte de plusieurs livrables. Au total, 25 820 ont obtenu la cote 2, 1 988 objets ont reçus la cote 3 et 8 209 ont obtenu la cote 4.

- Comparaison du niveau d'eau statique d'un objet avec les valeurs des objets adjacents (VT7). Pour ce critère, le niveau d'eau à valider a été comparé avec la moyenne (± l'écart-type) des valeurs de niveau d'eau des objets situés dans un rayon de 200 m. Les différentes cotes pour ce critère de validation sont :
    1) Différence (valeur vs moyenne) inférieure à l'écart-type calculé pour les objets adjacents
    2) Nombre d'objets inférieur à 5 dans le rayon de recherche
    3) Différence (valeur vs moyenne) supérieure à l'écart-type calculé pour les objets adjacents
    4) Non applicable (n/a)

  Au total, 19 215 ont obtenu la cote 2, 1 235 objets (puits) ont obtenu la cote 3 et 16 924 se sont vus attribués la cote 4.

- Comparaison de l'épaisseur d'argile d'un objet avec les valeurs des objets adjacents (VT8). Pour ce critère, l'épaisseur d'argile à valider a été comparée avec la moyenne (± l'écart-type) des valeurs d'épaisseur d'argile des objets situés dans un rayon de 200 m. Les différentes cotes pour ce critère de validation sont :
    1) Différence (valeur vs moyenne) inférieure à l'écart-type calculé pour les objets adjacents
    2) Nombre d'objets inférieur à 5 dans le rayon de recherche
    3) Différence (valeur vs moyenne) supérieure à l'écart-type calculé pour les objets adjacents
    4) Non applicable (n/a)

  Ce dernier critère de validation a aidé à cibler les objets pouvant engendrer des épaisseurs d'argile erronées lors de l'interpolation et, après quelques itérations, a permis de faire une meilleure sélection des valeurs d'épaisseur d'argile à utiliser pour la préparation de certains livrables. Au total, 13 160 objets ont obtenu la cote 2, 364 objets ont obtenu la cote 3 et 25 462 ont obtenu la cote 4.

Ces critères de validation ont donc permis de réduire le nombre d'objets avec des informations erronées et de sélectionner les objets jugés valides pour la préparation d'un livrable spécifique. Ainsi, un objet peut avoir une profondeur au roc valide mais un niveau d'eau non valide et donc servir à la réalisation du livrable sur la topographie du roc mais pas à celui sur la piézométrie de l'aquifère régional de roc fracturé. A noter que le rayon de recherche utilisé pour la comparaison des objets entre eux a été fixé à l'aide de tests comparatifs et du jugement professionnel de l'équipe de travail. Bien que ce rayon soit arbitraire, il a été sélectionné de façon à avoir suffisamment d'objets représentatifs pour les calculs statistiques effectués.

2.3.2.3 Résumé de la validation

Le tableau 2.7 présente le nombre d'objets utilisés pour la réalisation de chacun des livrables du projet ainsi que la proportion des différentes données ayant servies à la réalisation de ces livrables selon leur provenance.

Tableau 2.7 : Proportion des données ayant servies à la réalisation des différents livrables selon leur provenance

ID	Livrable	Nb d'objets utilisés	SIH (%)	MTQ (%)	Études antérieures (%)	Projet PACES (%)	CCEG (%)	MRN [1] (%)
14	Coupes stratigraphiques	1 268	88.8	2.1	5.4	3.5	0.1	-
15	Épaisseur totale des dépôts	29 865	93.7	1.8	2.8	0.5	0.2	1
15a	Épaisseur des dépôts sus-jacents à l'argile	6 596	91.1	4.8	3.2	0.3	-	0.6
15b	Épaisseur d'argile	19 984	91.5	3.2	3.6	0.2	0.2	1.2
16	Topographie du roc	29 865	94	1.8	2.8	0.2	0.2	1
17	Conditions de confinement	30 919	93.2	2.4	3	0.2	0.2	1
18	Contextes hydrogéologiques	30 919	93.2	2.4	3	0.2	0.2	1
20	Piézométrie de l'aquifère régional de roc fracturé	18 337	99.2	-	0.5	0.1	0.2	-
21	Paramètres hydrauliques (K)	14 068	99.2	-	0.8	-	-	-
24	Qualité d'eau souterraine - Critères de potabilité	236	-	-	-	100 [2]	-	-
25	Qualité d'eau souterraine - Critères esthétiques	236	-	-	-	100 [2]	-	-

Notes:

[1] : Cette source comprend les bases de données SIGPEG et SIGEOM

[2] : Les données de qualité d'eau souterraine utilisées pour ces livrables ont été collectées dans le cadre du projet PACES en Montérégie Est mais la plupart des puits dans lesquels les échantillons ont été collectés étaient des puits existants documentés dans le SIH

3 CONTEXTES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

3.1 Géologie du socle rocheux

La carte géologique du socle rocheux[2] (livrable 13) a été fournie par la Direction générale des hydrocarbures et des biocarburants du MRN mais sa légende a été révisée dans le cadre de la préparation d'une carte géologique transfrontalière couvrant les portions canadienne et américaine des bassins des rivières Richelieu et Yamaska (Benoit et al., 2011). La version fournie par le MRN est une compilation réalisée à partir des sources suivantes :

- Géologie des Basses-terres du Saint-Laurent (Globensky, 1987)
- Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce (Slivitzky et St-Julien, 1987)

Dans la région à l'étude, on distingue trois principaux contextes géologiques : la Plate-forme du Saint-Laurent, les Appalaches et les intrusions montérégiennes Ces contextes occupent respectivement 53 %, 45 % et 2 % de la zone d'étude. La Plate-forme du Saint-Laurent est bordée au nord-ouest par la province géologique du Grenville, au sud-ouest par le massif des Adirondacks et au sud-est par les Appalaches. La ligne (ou faille) de Logan, s'étendant du lac Champlain à la Ville de Québec et traversant le bassin de la rivière Yamaska dans la région à l'étude, sépare la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. Les roches de la Plate-forme du Saint-Laurent sont d'origine sédimentaire et d'âge Cambrien et Ordovicien. Elles reposent en discordance sur les roches ignées et métamorphiques de la Province du Grenville (socle Précambrien) et sont généralement disposées en strates horizontales, légèrement déformées par lors de la formation des Appalaches. Les roches des Appalaches sont également des roches d'origine sédimentaire d'âge Cambrien et Ordovicien mais ayant subies un métamorphisme régional et plusieurs épisodes de déformations d'intensité variable, notamment lors des orogenèses taconienne et acadienne. Ces roches chevauchent en séquence progressives les roches de la Plate-forme du Saint-Laurent. On retrouve également dans la zone d'étude sept collines Montérégiennes, orientées selon un axe plus ou moins est-ouest et transperçant la Plate-forme du Saint-Laurent (monts Saint-Bruno, Saint-Hilaire, Saint-Grégoire et Rougemont) et les Appalaches (monts Yamaska, Shefford et Brome). Ces collines sont constituées de roches ignées intrusives et ont été mises en place à la période du Crétacé. Au pourtour de ces intrusions, on retrouve d'abord des roches cornéennes, c'est-à-dire des roches sédimentaires ayant subi un métamorphisme de contact, mais également par endroits des dykes ou filons-couches leur étant associés. Bien que ces intrusions ne constituent pas un contexte géologique au même titre que la Plate-forme du Saint-Laurent ou les Appalaches, elles sont tout de même traitées comme un contexte distinct dans ce rapport étant donné qu'elles présentent des caractéristiques différentes des autres contextes géologiques et qu'elles jouent un rôle distinct dans l'hydrogéologie régionale de la zone d'étude.

3.1.1 Histoire géologique

Les principales étapes de l'histoire géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches dans le sud du Québec sont présentées au tableau 3.1 et résumées ci-dessous.

Vers la fin du Précambrien, le supercontinent Rodinia subit une phase d'effondrement (« rifting ») menant à la formation de l'océan Iapetus et des continents Laurentia et Gondwana.

[2] Dans le cadre de ce rapport, à moins d'indication contraire, le terme "socle rocheux" correspond au sommet des formations géologiques consolidées (et non au sommet des roches précambriennes).

Au Cambrien, l'ouverture de cet l'océan se poursuit et permet 1) l'accumulation des sédiments à l'origine de la Plate-forme du Saint-Laurent sur le plateau de la marge continentale de Laurentia et 2) l'accumulation de sédiments d'eau profonde à l'origine des Appalaches au pied du talus continental et sur le glacis de la marge continentale.

Tableau 3.1 : Principales étapes de l'histoire géologique dans la région d'étude (modifié de Globensky, 1987)

Ère	Période	Évènements
Cénozoïque	Quaternaire	Glaciation continentale et formation de la mer de Champlain
	Tertiaire	Érosion
Mésozoïque	Crétacé	Activité ignée associée au rift Atlantique
		Formation des collines montérégiennes, dykes et filons-couches associés
		Failles est-ouest
	Jurassique	Érosion
	Triassique	Érosion
Paléozoïque	Permien	Érosion
	Carbonifère	Érosion
	Dévonien	Courte invasion de la mer et déposition de calcaire
	Silurien	Émergence et érosion
	Ordovicien	Dépôt des shales rouges et des grès du Queenston
		Fermeture de la mer à Québec par soulèvement des Appalaches
		Dépôt des strates du Lorraine et de l'Utica
		Orogenèse taconienne
		Dépôt des calcaires de Trenton (transgression maximale)
		Poursuite de la transgression
		Dépôt des roches des Groupes de Black River et de Chazy
		Transgression graduelle de la mer
		Discordance majeure
		Dépôt des dolomies du Gr. de Beekmantown dans une mer peu profonde
	Cambrien	Régression marine
		Déposition des grès du Potsdam
		Invasion marine
Précambrien	Tardif	Plateau laurentien (Précambrien)
		Érosion longue et continue des terrains montagneux
	Précoce	Socle igné et volcanique (roches cristallines)

A la fin du Cambrien, l'océan Iapetus commence à se refermer et une zone de subduction se forme au large de Laurentia suite à l'effondrement de la croûte océanique, menant à la création d'un arc insulaire volcanique. L'accumulation de sédiments sur la marge continentale de Laurentia se poursuit jusqu'au milieu de l'Ordovicien, qui marque le début de l'orogenèse taconienne et de la formation des Appalaches. L'activité tectonique associée à cette dernière provoque notamment l'émergence et l'érosion d'une partie de la marge continentale, marquant une discordance dans la séquence stratigraphique de la Plate-forme du Saint-Laurent et amenant également la création d'un bassin d'avant-pays (« foreland basin ») (Saint-Julien et Hubert, 1975).

Par la suite, l'océan Iapetus continue de se refermer et l'accumulation de sédiments se poursuit dans le bassin d'avant-pays et sur la marge continentale active jusqu'à la fin de l'Ordovicien. A

cette période, l'arc insulaire volcanique au large de la marge continentale entre en collision avec le continent Laurentia et entraîne le développement de failles inverses de chevauchement. Ainsi, des roches provenant du talus et du glacis continental (nappes allochtones), viennent chevaucher les roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent (roches autochtones). Cet épisode, survenu vers la fin de l'orogenèse taconienne, entraîne également le charriage local d'écailles de roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent (nappes parautochtones). Vers la fin du Silurien, la chaîne taconienne alors émergée subit un épisode d'érosion. Une courte transgression marine survient au Dévonien (Globensky, 1987), entraînant la déposition de sédiments en discordance sur les roches plissées, faillées et érodées de la chaîne taconienne. A cette période, l'océan Iapetus disparaît progressivement. Au milieu du Dévonien, les roches sédimentaires formées lors de la dernière transgression marine sont soulevées lors de l'orogenèse acadienne et subséquemment érodées. Dans la zone d'étude, l'érosion se serait poursuivie jusqu'au Quaternaire.

3.1.2 Tectonique et structure

L'histoire géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches est étroitement liée à la tectonique. Cette dernière, lorsque mise en relation avec les contrastes structuraux et la stratigraphie des assises précambriennes et cambriennes précoces, permet de faire des regroupements d'unités ayant des caractéristiques similaires. Dans la région d'étude, on peut ainsi distinguer quatre zones tectonostratigraphiques : 1) la Plate-forme du Saint-Laurent, 2) la zone de Humber externe, 3) la zone de Humber interne et 4) la zone de Dunnage. La Ligne de Logan correspond à la frontière entre les roches sédimentaires peu déformées des domaines autochtone et parautochtone (Plate-forme du Saint-Laurent) et les roches sédimentaires du domaine allochtone (zones de Humber et Dunnage) ayant subies un charriage significatif et étant caractérisées par un degré métamorphisme et de déformation plus important. La carte géologique (livrable 13, annexe 2) regroupe les unités géologiques en fonction de ces 4 zones.

La zone de la Plate-forme du Saint-Laurent est caractérisée par le développement de failles normales affectant la marge continentale à partir de la fin du Précambrien. Ces failles, qui peuvent avoir été actives jusqu'à la fin de l'Ordovicien, sont principalement associées à un régime tectonique en extension engendré par la séparation du supercontinent Rodinia et l'ouverture de l'océan Iapetus. Les failles présentent deux orientations préférentielles, soient est/ouest et nord-est/sud-ouest, avec des pendages respectifs vers le sud ou le sud-est et un patron en échelons s'enfonçant aussi vers le sud-est (St-Julien et Hubert, 1975). Lors de l'orogenèse taconienne, l'avancée de nappes allochtones entraîne le déplacement local de roches de la Plate-forme du Saint-Laurent via un système de failles inverses imbriquées de pendage sud-est (domaine parautochtone). Cette zone de failles affecte surtout la partie est de la Plate-forme du Saint-Laurent, entre la faille de Saint-Barnabé (nord-ouest) et la Ligne de Logan (sud-est). La seule déformation significative affectant le domaine autochtone de la Plate-forme du Saint-Laurent est associée au synclinal Chambly-Fortierville. Ce dernier, résultant des phases de compression de l'orogenèse taconienne, est d'orientation sud-ouest/nord-est et affecte particulièrement les roches des groupes de Lorraine et Queenston.

La zone de Humber est délimitée au nord-ouest par la Ligne de Logan qui la sépare de la Plate-forme du Saint-Laurent, et au sud-est par la ligne (ou faille) Baie Verte-Brompton. Cette zone, qui comprend des roches d'origine sédimentaire mises en place sur la marge continentale de Laurentia, peut être subdivisée en deux sous-zones, soient les zones de Humber externe (nord-ouest) et interne (sud-est), présentant des caractéristiques métamorphiques et structurales contrastées. La limite entre ces sous-zones n'est toutefois pas bien définie puisque l'isograde métamorphique qui les sépare ne correspond pas à un contact stratigraphique précis (Slivitzky et St-Julien, 1987). La limite actuelle, présentée au livrable 13, est fixée comme étant la faille de Brome (Castonguay, 2000). Des études antérieures associent toutefois cette limite à la faille du

Foulon (Globensky, 1987) ou à la faille de Oak Hill (Tremblay et Pinet, 1994). Les roches de la zone de Humber externe sont caractérisées par un métamorphisme régional de faible intensité et sont généralement peu déformées ; elles n'ont été affectées que par l'orogenèse taconienne et sont principalement caractérisées par des failles de chevauchement. Quant aux roches de la zone de Humber interne, elles sont fortement déformées et ont subi un métamorphisme régional d'intensité moyenne à forte ; les orogenèses taconienne et acadienne les ont affectées, provoquant notamment des rétrochevauchements et des failles normales (Castonguay, 2000).

Comme mentionnée ci-haut, la zone de Dunnage est délimitée au nord-ouest par la zone de Humber. Au sud-est, à l'extérieur de la région d'étude, elle est bordée par la zone de Gander et la faille de la Guadeloupe. La zone de Dunnage comprend des roches sédimentaires et volcaniques mises en place sur la croûte océanique (plutôt que sur la marge continentale) et dont la déformation est associée à l'orogenèse acadienne (Castonguay, 2000).

3.1.3 Stratigraphie et lithologies

La stratigraphie de la Plate-forme du Saint-Laurent, des Appalaches et des intrusions montérégiennes est résumée ci-dessous sur la base des travaux de Globensky (1987) et de Slivitzsky et St-Julien (1987). La figure 3.1 présente une colonne stratigraphique schématique des principales unités rencontrées pour les contextes de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches. Séjourné et al. (2013) ont réalisé deux coupes géologiques conceptuelles localisées dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent et de la zone externe des Appalaches qui sont également présentées dans l'atlas hydrogéologique du projet à l'annexe 1.

3.1.3.1 Plate-forme du Saint-Laurent

Au bas de la séquence stratigraphique de la Plate-forme du Saint-Laurent, on retrouve les grès du Groupe de Potsdam, mis en place au début du Cambrien avec les premières phases de transgression marine et reposant en discordance sur les roches ignées et métamorphiques de la Province du Grenville (socle précambrien). Ce groupe comprend deux formations, Covey Hill à la base et Cairnside au sommet, mais seulement la dernière est comprise dans la zone d'étude. La Formation de Cairnside est composée de grès quartzitique, intercalée de lits de grès dolomitique dans sa partie supérieure. Son épaisseur ne dépasse généralement pas 250 m.

La séquence se poursuit ensuite avec les dolomies et grès du Groupe de Beekmantown, mis en place dans un environnement marin peu profond à l'Ordovicien inférieur. Ce groupe compte trois formations, soient les formations de Theresa, Beauharnois et Carillon, mais seules les deux premières sont présentes dans la zone d'étude. La formation de Theresa, plus âgée, consiste en un grès dolomitique intercalé de grès quartzitique et de dolomie tandis que celle de Beauharnois consiste principalement en un assemblage de dolomie et de calcaire. L'épaisseur de ce groupe est de l'ordre de 450 m, avec environ 300 m pour la Formation de Beauharnois et 150 m pour celle de Theresa.

Tel que mentionné précédemment, une discordance majeure marque le contact supérieur du Groupe de Beekmantown et le début de la sédimentation associée au bassin d'avant-pays (plutôt qu'à un environnement de marge continentale). Les grès et calcaires du Groupe de Chazy sont alors déposés sur les carbonates du Beekmantown. Ce groupe, incluant une seule formation, celle de Laval, est caractérisé par des facies variables, autant latéralement et verticalement. A la base, on retrouve un grès, suivi de calcarénite dans les parties moyennes et supérieures. La partie supérieure est toutefois transitionnelle avec les dolomies du Groupe de Black River. L'épaisseur de la Formation de Laval est estimée à environ 100 m.

Le groupe suivant, parfois associé au Groupe du Chazy, est le Groupe de Black River qui comportent trois formations relativement minces, soient les formations de Pamelia, Lowville et

Leray. Son épaisseur totale est inférieure à 30 m et il comporte des roches d'âge Ordovicien moyen qui consistent principalement de dolomie (Pamelia) et de calcaire (Lowville et Leray).

Suite à la mise en place des roches du Groupe de Black River, le bassin d'avant-pays subit de la subsidence et amène la déposition des roches du Groupe de Trenton (Ordovicien moyen à supérieur). Ce groupe comprend les formations de Deschambault, Montréal et Tétreauville, mais seulement la formation de Montréal est présente dans la zone d'étude. Ce groupe comprend principalement des calcaires, qui deviennent de plus en plus argileux vers le sommet. L'épaisseur maximale de ce groupe est 250 m.

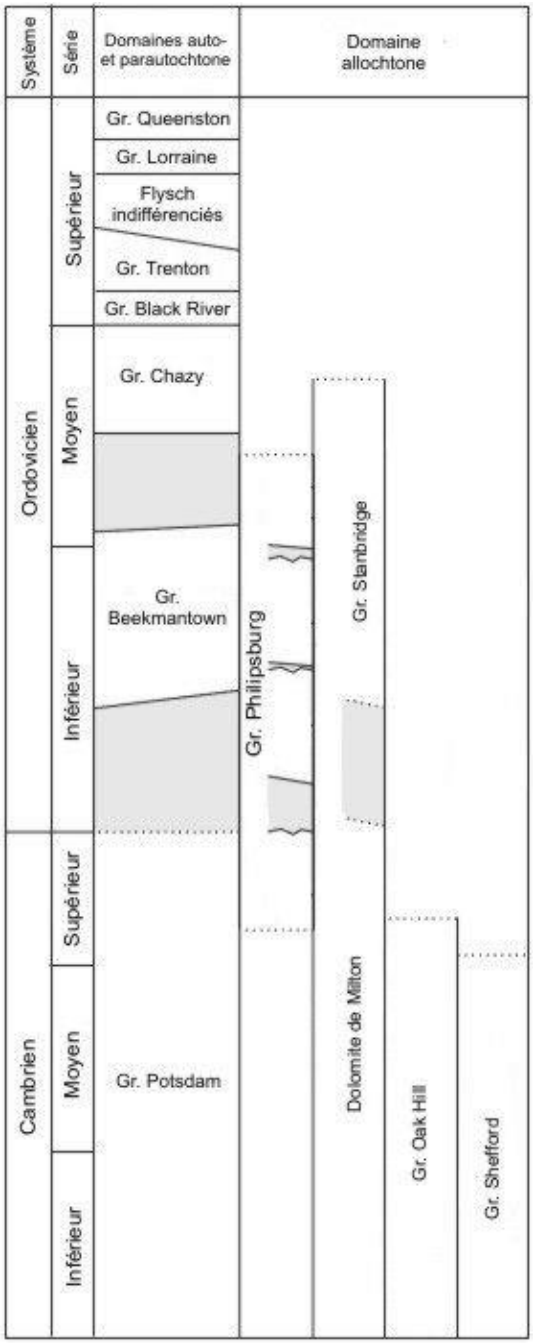


Figure 3.1 : Colonne stratigraphique schématique pour la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches (modifiée de Séjourné et Malo, 2007)

Les shales calcareux de l'Utica ont par la suite été mis en place à l'Ordovicien supérieur dans un environnement d'eau profonde, au maximum de la transgression marine. La transition entre les calcaires argileux du Groupe de Trenton est graduelle. L'épaisseur moyenne du Shale d'Utica est d'environ 120 m mais peut atteindre jusqu'à 610 m dans le secteur du Lac Champlain.

La séquence se poursuit avec le Groupe de Sainte-Rosalie qui contient les formations d'Iberville, Sainte-Sabine/Les Fonds et Lotbinière (cette dernière n'est toutefois pas présente dans la zone d'étude). Les roches de ce groupe ont été mises en place à l'Ordovicien moyen et supérieur et représentent une séquence de flysch provenant de l'érosion des Appalaches en émergence. La formation d'Iberville, à la base, consiste en un mudstone calcareux, interstratifié de siltstone dolomitique, tandis que la formation sus-jacente de Sainte-Sabine/Les fonds est composée d'ardoise interlitée de sédiments dolomitiques.

Le Groupe de Lorraine, auquel les roches sous-jacentes du Groupe de Sainte-Rosalie sont parfois associées, est le plus épais de la Plate-forme du Saint-Laurent et comprend deux formations, celles de Nicolet et de Pontgravé. Ces roches d'âge Ordovicien supérieur se sont déposées dans un environnement marin dont la profondeur diminuait graduellement et consiste en interstratification de shale, grès, siltstone et calcaire. La formation de Nicolet, dont l'épaisseur peut atteindre 760 m près de la rivière Nicolet, est composée principalement d'un shale silteux interstratifié de minces lits de grès, siltstone argileux et calcaire gréseux. Le contact entre cette formation et la formation sus-jacente de Pontgravé est graduel ; les mêmes lithologies composent d'ailleurs ces formations mais la formation de Pontgravé est caractérisée par une grande proportion de lits de calcaire et de grès calcareux, interstratifiés de shale gréseux.

Finalement, le dernier groupe de la Plate-forme du Saint-Laurent dans la zone d'étude est le Groupe de Queenston dont les roches ont été mises en place à fin de l'Ordovicien supérieur. Il ne comprend qu'une formation, celle de Bécancour, consistant principalement en un shale rouge interlité de grès vert, dont la proportion augmente vers le sommet. Ces roches correspondent à des dépôts continentaux d'origine deltaïque dont l'épaisseur peut atteindre 610 m.

3.1.3.2 Appalaches

Comme mentionné à la section 3.1.2, la portion des Appalaches située dans la zone d'étude peut être subdivisée en trois zones tectonostratigraphiques sur la base des contrastes stratigraphiques et structuraux : les zones de Dunnage et de Humber externe et interne. Les unités stratigraphiques des Appalaches sont décrites selon ces zones, en débutant par les plus anciennes.

Dans la zone d'étude la zone de Humber externe comprend principalement les unités suivantes (en ordre chronostratigraphique) : Groupe de Shefford, Groupe de Philipsburg, Groupe de Stanbridge, Groupe de Laurier et l'Olistostrome de Drummondville. Une partie du Groupe de Oak Hill (formations de Gilman, Dunham et partie de Sweetburg) est également inclut dans cette zone, près de limite sud-est. Les roches de ces formations, d'âge Cambrien moyen à inférieur, comprennent : phyllade et schiste (et quartzite) (Formation de Gilman), marbre dolomitique (Formation de Dunham) et assemblage d'ardoise, conglomérat et quartzite (Formation de Sweetburg). Dans la partie nord-ouest de la zone de Humber externe, on retrouve le Groupe de Shefford, d'âge Cambrien inférieur, comprenant, à partir de la base, les formations de Mawcook et de Granby. La première, consiste en un assemblage d'ardoises rouges et vertes interlitées de grès tandis que la Formation de Granby se compose principalement de grès feldspathique interlité d'ardoise. Le Groupe de Philipsburg affleure dans le sud-ouest de la zone de Humber externe (près du Champlain) où il est désigné comme « Écaille de Philipsburg ». Dans la région d'étude, les unités de ce groupe sont indifférenciées et se composent principalement d'un

assemblage de carbonates (calcaire et dolomie) d'âge variant du Cambrien à l'Ordovicien inférieur. Le Groupe de Stanbridge, d'âge Ordovicien moyen, occupe la partie est et sud-est de la zone de Humber externe. Il peut être subdivisé en trois parties : une partie inférieure comprenant un assemblage de roches carbonatées, une partie intermédiaire comprenant une succession de siltstone, argilite et mudstone et une partie supérieure consistant en une ardoise pyriteuse, intercalée de conglomérat calcaire et de calcaire. Le Groupe de Laurier comprend une seule formation dans la zone d'étude, la Formation de Bourret, comprenant des schistes argileux et d'ardoise, interlités de calcaire, grès et dolomie. Cette formation est d'âge Ordovicien moyen est affleure dans la partie nord-ouest, entre la Ligne de Logan et les roches du Groupe de Shefford. Également situé dans la partie nord-ouest de la zone de Humber externe, on retrouve l'Olistostrome de Drummondville qui se compose de blocs de calcaire, d'agglomérats volcaniques et de laves dans une matrice de shale. L'âge des blocs varierait de Cambrien à Ordovicien moyen tandis que la matrice serait d'âge Ordovicien moyen.

La zone de Humber interne ne comprend quant à elle que des unités du Groupe de Oak Hill et de Caldwell, ce dernier n'affleurant toutefois que sur une faible superficie dans la zone d'étude. Le Groupe de Oak Hill occupe la majorité de la zone de Humber interne et comprend les formations suivantes (en ordre chronostratigraphique) : Tibbit Hill, Pinnacle, White Brook, West Sutton, Gilman, Dunham et Sweetburg. Tel que mentionné précédemment, les trois dernières formations, Gilman, Dunham et une partie de Sweetburg, font toutefois partie de la zone externe. Les roches de ce groupe sont d'âge Cambrien moyen à inférieur et leur composition est résumée ci-après, de la base au sommet : schiste et phyllade vert à chlorite-épidote-albite (Formation de Tibbit Hill), quartzite alternant avec un schiste à quartz-muscovite-feldspath-chlorite (Formation de Pinnacle), marbre dolomitique et dolomie (Formation de White Brook), phyllade rouge ou gris (à hématite), localement associé à des schistes à chlorite (Formation de West Sutton) et assemblage d'ardoise, conglomérat et quartzite (Formation de Sweetburg). Quant au groupe de Caldwell, il se compose principalement d'une alternance de grès feldspathique et d'ardoise. Il peut être subdivisé en deux parties : une partie inférieure comprenant surtout des grès feldspathiques verts, avec des interlits d'ardoise verte, et des roches volcaniques intermédiaires à basiques ainsi qu'une partie supérieure comprenant un assemblage d'ardoise avec des interlits d'orthoquartzite. Les roches de ce groupe sont d'âge Cambrien et affleurent dans une petite partie du nord-est de la zone.

La zone de Dunnage, située dans la partie extrême sud-est de la région d'étude, comprend les vestiges de la croûte océanique formée au Cambrien et mis en place à l'Ordovicien inferieur. Ces vestiges sont représentés par une zone de complexe ophiolitique et par la Formation de Saint-Daniel. La séquence ophiolitique typique, qui peut être divisée en trois faciès, est représentée dans la zone d'étude ; de la base au sommet, elle comprend une péridotite, un assemblage de cumulats (dunite, pyroxénite et gabbro) et une unité de volcanites (laves basaltiques coussinées). La formation de Saint-Daniel consiste en un mélange dont la matrice se compose d'une ardoise à blocs et à l'intérieur de laquelle on retrouve des blocs ou copeaux de grès, de volcanites acides et basiques, de trachyte, de granitoïde, de gabbro et de serpentine.

3.1.3.3 Intrusions montérégiennes

Des intrusions d'âge Crétacé viennent recouper les roches de Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches. Dans la zone d'étude, ces intrusions sont principalement associées aux monts Saint-Bruno, Saint-Hilaire, Rougemont, Yamaska, Saint-Grégoire, Shefford et Brome, mis à jour suite par l'érosion. Ces intrusions comprennent plusieurs types de roches, principalement alcalines, dont les plus communes sont des gabbros et des syénites. Un réseau de dykes et de filons-couches est généralement associé à ces intrusions (Séjourné et al., 2013). La mise en place de ces intrusions a entraîné un métamorphisme de contact dans les roches encaissantes.

Les roches cornéennes résultant de ce métamorphisme sont de composition variable, selon les roches encaissantes. Dans la Plate-forme du Saint-Laurent, l'auréole de métamorphisme autour des intrusions est d'environ 500-800 m mais peut atteindre 1 600 m.

Mentionnons finalement que les perméabilités les plus élevées sont observées dans les roches des groupes du Potsdam, Beekmantown et Trenton, alors que les plus faibles sont associées aux roches des groupes de Lorraine et Sainte-Rosalie ainsi qu'au Shale d'Utica (Bédard, 2011).

3.2 Géologie du Quaternaire

La carte présentant la géologie du Quaternaire et la géomorphologie (livrable 12) provient des travaux du MRN qui sont détaillés dans Dubé-Loubert et al. (2013). Une version simplifiée est présentée dans l'atlas hydrogéologique (annexe 1). Ces travaux de cartographie, effectués dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du MDDEFP en collaboration avec la Commission géologique du Canada (CGC), ont été réalisés à l'échelle de 1/50 000 et incluent (en partie ou en totalité) les feuillets SNRC suivants : 31H01, 31H02, 31H03, 31H04, 31H06, 31H07, 31H08, 31H09, 31H10, 31H11, 31H14, 31H15, 31I02, 31I03. Par ailleurs, les affleurements rocheux présents dans la région d'étude ont été obtenus en partie des affleurements de compilation disponibles dans le Système d'information géominière (SIGEOM) (MRN, 2005) et de la numérisation d'affleurements à partir de cartes géologiques existantes. Les affleurements rocheux obtenus du SIGEOM couvrent les feuillets SNRC 31H03, 31H04, 31H05, 31H06, 31H09, 31H14, 31H16, 31I01 et 31I02. Les affleurements présents dans les autres feuillets SNRC de la zone d'étude ont été numérisés des cartes suivantes : Charbonneau (1980), Clark (1964a), Clark (1964b), Clark (1977), Colpron (1992), Colpron et al. (1994), Cooke et al. (1962), Cooke (1950) et Lesperance (1963).

Dans la région d'étude, les contextes géologiques définis à la section 3 pour le socle rocheux sont en lien étroit avec la géomorphologie et la mise en place des sédiments quaternaires. Ainsi, les limites de la Plate-forme du Saint-Laurent et des zones de Humber externe et interne des Appalaches correspondent approximativement aux limites des principaux contextes associés à la géologie du Quaternaire (N.B. : d'un point de vue géomorphologique, la zone de Dunnage peut être associée à la zone de Humber interne). Les régions physiographiques associées à la géologie du Quaternaire ont toutefois des appellations différentes de celles des contextes géologiques du roc, soient les Basses-Terres du Saint-Laurent pour la Plate-forme du Saint-Laurent, le piedmont appalachien pour la zone externe de Humber des Appalaches et les Hautes-terres des Appalaches qui comprend la zone de Humber interne et la zone de Dunnage des les Appalaches.

Dans le contexte de Plate-forme (ou Basses-Terres) du Saint-Laurent, on retrouve en surface les sédiments silto-argileux de la mer de Champlain, recouverts par endroits de sédiments sableux ou silto-sableux fluviaux d'épaisseur variable. L'épaisseur des sédiments fins est particulièrement importante dans la partie nord de ce contexte, où elle peut atteindre plus de 60 m. Dans la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent, ces sédiments fins sont plus minces, recouvrant de façon discontinue des tills. Dans la zone externe des Appalaches (ou piedmont appalachien), on retrouve des sédiments sablo-graveleux littoraux et des tills remaniés, associés au pourtour du paléo-bassin marin ; la couverture de sédiments s'amincit également, laissant apparaître des affleurements rocheux par endroits. Quant au contexte de la zone interne des Appalaches (ou Hautes-terres des Appalaches), il comprend des principalement des tills, parfois minces, sur les hauts topographiques et des sédiments fluvioglaciaires et glaciolacustres dans les vallées. Le socle rocheux y affleure à de nombreux endroits sur les hauts topographiques.

3.2.1 Histoire du Quaternaire

La lithostratigraphie et le cadre chronologique des sédiments quaternaires s'appliquant à la région d'étude sont documentés plus en détail par Dubé-Loubert et al. (2013). Pour les fins de ce rapport, une synthèse du cadre lithostratigraphique est présentée ci-dessous, en mettant l'emphase sur les évènements et sédiments associés à la période de déglaciation suivant le dernier maximum glaciaire.

Dans la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres), la période glaciaire du Quaternaire est marquée par trois avancées glaciaires majeures de l'Inlandsis laurentidien, la dernière et plus récente phase ayant eu lieu au Wisconsinien. Le dernier maximum glaciaire de cette phase survient au Wisconsinien supérieur (~ 18 500 ans) et atteint la côte est américaine. Dans la région d'étude, cette dernière avancée laisse le Till de Gentilly. Le retrait glaciaire subséquent s'effectue graduellement, selon une orientation nord-ouest et nord-nord-ouest (Parent et Occhietti, 1988 ; McDonald et Shilts, 1971); des crêtes morainiques, de même que différents types de dépôts fluvioglaciaires sont laissés en place lors du retrait. Au fur et à mesure que les basses terres et les vallées de la zone d'étude sont libérées de glace, elles sont inondées par des lacs proglaciaires amenant le dépôt de sédiments glaciolacustres. Les principaux lacs proglaciaires sont les lacs Vermont et Iroquois, respectivement situés dans les vallées du Lac Champlain et du haut Saint-Laurent. Suite au retrait de la glace des hautes-terres de Covey Hill, les eaux de ces deux lacs glaciaires se joignent pour former un vaste plan d'eau coalescent, le Lac à *Candona*. A l'est, dans les hautes-terres appalachiennes, on note également la présence du Lac glaciaire Memphrémagog en bordure de la zone d'étude. Le retrait du front glaciaire se poursuit et entraîne éventuellement le drainage du Lac à *Candona* et l'invasion de la mer de Champlain (~ 11 200 ans) dans la région d'étude. Cette invasion marine entraîne notamment le dépôt de sédiments marins silto-argileux sur le piedmont appalachien (zone externe) où leur épaisseur ne dépasse guère 5 m, ainsi que dans la zone de la Plate-forme du Saint-Laurent, où leur épaisseur atteint 20 m en moyenne et plus de 60 m dans la partie nord de la zone d'étude. Au maximum de l'invasion marine, le niveau de la mer atteignait approximativement la limite nord-ouest de la zone interne dans les Appalaches (Parent et Occhietti, 1988). Cette limite marine, présentée à la figure 3.2, a subi un relèvement glacio-isostatique différentiel, de sorte que ses paléorivages se trouvent aujourd'hui à une altitude d'environ 185 m au Mont Saint-Hilaire et de 175 m en bordure de la zone interne des Appalaches, où elle s'abaisse jusqu'à environ 150 m à la hauteur de la frontière canado-américaine. Le retrait de l'Inlandsis laurentidien provoque également le relèvement isostatique de la croûte terrestre, favorisant la régression relativement rapide de la mer de Champlain qui est déjà avancée vers 10 000 ans. Vers 9 800 ans, l'eau douce avait déjà remplacé l'eau salée en amont de Québec, créant un vaste plan d'eau appelé Lac à *Lampsilis*, ancêtre du Lac Saint-Pierre. Le réseau hydrographique actuel s'installe ensuite graduellement, amenant de l'érosion et le dépôt de sédiments alluviaux.

3.2.2 Stratigraphie et distribution des sédiments du Quaternaire

La séquence stratigraphique des sédiments déposés durant la période du Quaternaire et présents en surface dans la zone d'étude est résumée dans la légende du livrable 12, qui les présente en ordre stratigraphique, avec les plus jeunes au sommet et les plus vieux en bas. Les séquences stratigraphiques simplifiées typiques de chacun des contextes décrits plus haut, de même que la distribution des sédiments dans ces contextes, sont brièvement décrites ci-dessous. En complément, le tableau 3.2 présente les types de sédiments et la superficie relative qu'ils couvrent dans la zone d'étude. Une description plus détaillée des sédiments rencontrés dans la zone d'étude est documentée par Dubé-Loubert et al. (2013).

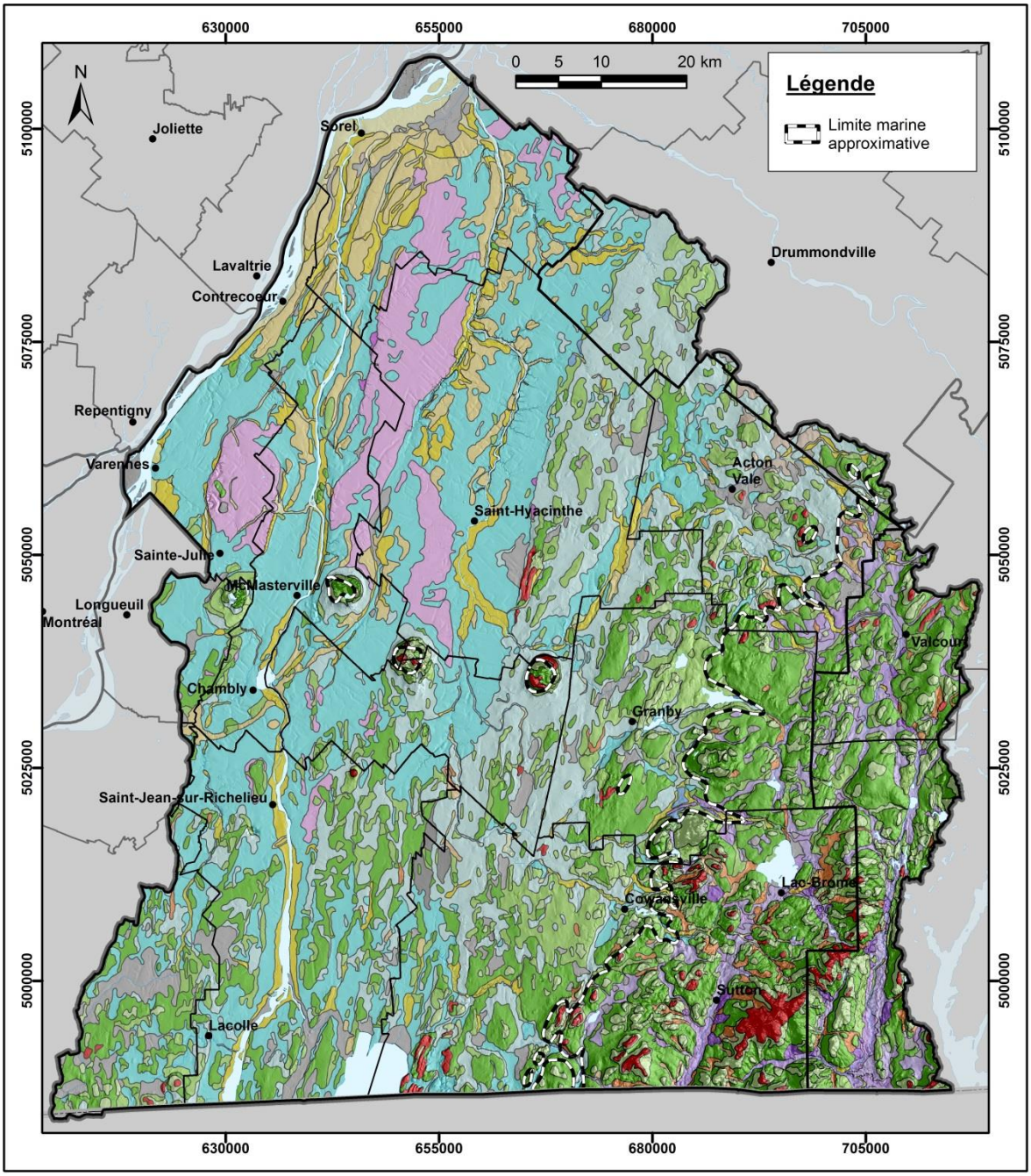


Figure 3.2 : Limite approximative de l'invasion de la mer de Champlain

Dans la zone de la Plate-forme du St-Laurent, on peut typiquement retrouver, du socle rocheux jusqu'à la surface : 1) des sédiments glaciaires (till) en couverture relativement continue pouvant être remaniés dans les secteurs plus élevés, 2) des sédiments fluvioglaciaires (présence locale sous forme d'esker, parfois accompagnés d'épandages proglaciaires subaquatiques) ayant érodés en partie ou en totalité le till sous-jacent, 3) des sédiments glaciolacustres argilo-silteux en couverture discontinue, 4) des sédiments silto-argileux marins d'eau profonde d'une épaisseur significative ainsi que des faciès sablo-graveleux littoraux,5) des sédiments lacustres littoraux généralement de faible épaisseur et en couverture discontinue et finalement 6) des sédiments alluviaux et 7) des sédiments organiques, généralement de faible épaisseur aussi.

Tableau 3.2 : Types et proportions de sédiments quaternaires observés en surface dans la zone d'étude

Sédiments			Contextes					Total
Type	**Description**	**Code**	**PF nord**	**PF sud**	**App. externe**	**App. interne**	**Collines mont.**	
Dépôts de versant	Dépôts d'éboulis	Ce	0 %	0 %	0 %	0.05 %	0.5 %	0.02 %
	Dépôts de glissement de terrain	Cg	0.1 %	0.01 %	0 %	0 %	0 %	0.04 %
Sédiments organiques	Séd. de tourbières	Ot	0 %	0.9 %	0.02 %	0 %	0 %	0.2 %
	Séd. de marécages et de marais	Om	2.7 %	6.5 %	5.8 %	3.5 %	0.7 %	4.5 %
Séd. éoliens	Séd. éoliens	Ed	0.04 %	0 %	1.0 %	0 %	0 %	0.3 %
Sédiments alluviaux	Alluvions actuelles	Ap	6.5 %	2.7 %	2.2 %	0.9 %	0.05 %	3.3 %
	Séd. estuariens anciens	Ae	0.2 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0.05 %
	Alluvions des terrasses fluviales	At	8.8 %	4.1 %	3.1 %	0.8 %	0.3 %	4.5 %
	Alluvions des terrasses fluviales	Ax	12.2 %	1.3 %	0.5 %	0 %	0 %	4.0 %
Sédiments lacustres	Séd. deltaïques et prodeltaïques	Ld	0.1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0.04 %
	Séd. littoraux et prélittoraux	Lb	16.2 %	1.3 %	0.01 %	0.1 %	0.3 %	5.0 %
Sédiments marins	Séd. deltaïques et prodeltaïques	Md	0.1 %	0 %	0.3 %	0 %	0.8 %	0.1 %
	Séd. littoraux et prélittoraux	Mb	4.8 %	17.6 %	33.5 %	0.5 %	10.8 %	14.4 %
	Séd. fins d'eau profonde	Ma	44.8 %	33.1 %	7.3 %	0.5 %	0.5 %	22.8 %
Sédiments glaciolacustres	Séd. deltaïques et prodeltaïques	LGd	0 %	0 %	0 %	1.7 %	0.2 %	0.3 %
	Séd. littoraux et prélittoraux	LGb	0 %	0 %	1.0 %	11.5 %	1.5 %	2.6 %
	Séd. fins d'eau profonde	LGa	0 %	0 %	0.2 %	4.8 %	0.5 %	1.0 %
Sédiments fluvioglaciaires	Séd. d'épandage proglaciaire	Go	0 %	0 %	0 %	0.3 %	0 %	0.06 %
	Séd. d'épandage proglaciaire	Gs	0 %	0.3 %	0.3 %	0.5 %	1.7 %	0.3 %
	Séd. juxtaglaciaires	Gx	0.02 %	0.3 %	0.6 %	5.1 %	2.5 %	1.3 %
Sédiments glaciaires	Till remanié en couverture	Trm	0.1 %	1.2 %	4.9 %	1.0 %	4.1 %	1.8 %
	Till remanié en couverture continue	Tr	1.9 %	9.8 %	13.5 %	7.3 %	8.4 %	7.9 %
	Till en couverture continue	Tc	1.1 %	18.9 %	18.8 %	37.6 %	27.1 %	17.6 %
	Till en couverture mince et discontinue	Tm	0.1 %	1.5 %	5.1 %	18.1 %	27.9 %	5.8 %
Substrat rocheux	Roche en place non différenciée	R	0.2 %	0.5 %	1.9 %	5.9 %	12.2 %	2.1 %

Par endroits, les sédiments quaternaires anciens, antérieurs au dernier maximum glaciaire et constitués de faciès silto-argileux et de faciès sableux, ont été observés par forage en sous-surface. Un exemple local de séquence stratigraphique pour ce secteur est documenté dans un rapport préparé par le Ministère des Transports du Québec (MTQ, 2011) suite au glissement de terrain de Saint-Jude. Le tableau 3.2 montre que dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent, les sédiments marins fins constituent la principale unité affleurante (~ 45 %). Les sédiments alluviaux et lacustres littoraux couvrent également une grande partie du territoire (respectivement ~ 28 % et 16 %) bien que leur épaisseur soit beaucoup plus faible que celle des sédiments marins, à l'exception du secteur de Sorel où une épaisseur significative (> 10 m) de sédiments alluviaux anciens associés au proto-Saint-Laurent est observée.

Les sédiments fluvioglaciaires et glaciolacustres n'affleurent pas dans cette partie de la Plate-forme du Saint-Laurent mais des affleurements de till sont observés à quelques endroits, notamment dans le secteur au sud de Contrecoeur où il y a remontée du socle rocheux. Au sud-est de Saint-Charles-sur-Richelieu et au sud de Saint-David, d'importantes épaisseurs de sédiments quaternaires anciens semblent également avoir échappé à l'érosion glaciaire associée au Till de Gentilly. Dans la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent, la couverture des sédiments marins fins est plus limitée (~ 33 %), laissant place à des sédiments marins littoraux (~ 18 %) et à de grandes zones de till et de till remanié (~ 31 %). On retrouve également de grandes zones de sédiments organiques dans le secteur de Napierville, de Sainte-Sabine et au pourtour de la baie Missisquoi ainsi que des affleurements importants de sédiments fluvioglaciaires, notamment dans le secteur de Saint-Cyprien-de-Napierville/Saint-Jacques-le-Mineur et de Saint-Césaire/Sainte-Brigide-d'Iberville. Finalement, peu d'affleurements sont présents dans la Plate-forme du Saint-Laurent, particulièrement dans la partie nord ; dans la partie sud, la densité d'affleurements rocheux augmente de façon significative dans la portion extrême sud, à l'approche des Appalaches (sud-est) et du massif des Adirondacks (sud-ouest).

Dans la zone externe des Appalaches (ou piedmont), le relief devient plus ondulé et la séquence stratigraphique typique consiste en un assemblage de sédiments glaciaires (till) (~ 42 %) communément surmontés de sédiments littoraux (~ 34 %) et parfois érodés en totalité ou en partie par des sédiments fluvioglaciaires (< 1 %). Ces derniers sont notamment observés dans les secteurs d'Acton Vale, Béthanie, Sainte-Christine, Warden/Waterloo, et Frelighsburg. Les sédiments glaciaires de cette zone ont subi un important remaniement par l'action des vagues et des courants dans la mer de Champlain, résultant en de grandes zones de till remanié. Dans les vallées et les dépressions, la stratigraphie diffère et ressemble davantage à celle de la zone de la Plate-forme du Saint-Laurent, sauf que les faciès argileux marins sont moins présents à l'approche de la limite marine, exposant davantage les faciès glaciolacustres. Les affleurements dans la zone externe des Appalaches sont principalement concentrés dans les parties sud et est de ce contexte, bien que certains secteurs à la limite ouest (ex. écaille ou crête de Saint-Dominique) soient également caractérisés par des affleurements plus nombreux.

Dans la zone interne des Appalaches (ou Hautes-terres appalachiennes), le relief devient accidenté et on retrouve des vallées plus profondes, orientées préférentiellement sud-ouest/nord-est. A l'extérieur des vallées, la séquence stratigraphique typique consiste en un till ou un till remanié reposant directement sur le socle rocheux. De grandes unités de till en couverture continue occupent la majorité de la zone (~ 38 %), et sont parsemées d'unités de till remanié (~ 8%) et d'affleurements rocheux (~ 6 %). Dans les vallées, on retrouve typiquement des sédiments glaciaires (till) ou des sédiments anciens à la base, des sédiments fluvioglaciaires (affleurant parfois sur les flancs de la vallée) (~ 6 %), des sédiments glaciolacustres (d'eau profonde, littoraux et deltaïques) (~ 18 %) et des sédiments alluviaux (< 1 %).

Quant aux collines montérégiennes, leur séquence stratigraphique est relativement simple, s'apparentant à celle de la zone interne des Appalaches à l'extérieur des vallées ; elle comprend un till ou un till remanié reposant directement sur le socle rocheux, à l'exception du mont Brome, sur lequel des sédiments fluvioglaciaires sont également présents. Toutefois, le pourtour des collines situées dans la Plate-forme du Saint-Laurent (monts Saint-Bruno, Saint-Hilaire et Rougemont), ainsi que celui du mont Yamaska dans la zone externe, présente une séquence stratigraphique distincte puisque ces collines représentaient des obstacles à l'écoulement glaciaire. On retrouve généralement des sédiments glaciaires à la base mais, du côté de l'aval glaciaire (sud-sud-est), ces sédiments sont plus épais et parfois plus grossiers et intercalés de sédiments fluvioglaciaires grossiers. Surmontant ces sédiments, on retrouve des sédiments marins littoraux déposés lors de l'invasion marine alors que ces collines représentaient des Îles dans la mer de Champlain. Finalement, du côté aval fluvial (au nord-nord-est), des sédiments alluviaux anciens associés au proto-Saint-Laurent ont été déposés sur les sédiments argileux marins.

Par ailleurs, afin de préciser le cadre stratigraphique quaternaire régional, quatre forages rotosonic, avec récupération de carottes en continu, ont été réalisés dans les zones de couverture quaternaire importante (voir section 2.2.3). Les forages RS01, RS02 et RS04 ont été effectués dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent alors que le forage RS05 a été réalisé au sud du Mont Rougemont, dans la partie sud de la Plate-forme, Afin de simplifier la lecture des journaux de forages et aussi afin de bien refléter le caractère préliminaire de nos observations, les descriptions lithologiques de ces forages, présentées à la figure 3.3, sont résumées à l'aide du code abrégé CGQ (MDDEFP, 2008a), lequel rend compte sommairement de la texture des sédiments. Les sites des forages ont été déterminés sur la base travaux de caractérisation préliminaire effectués en 2009, incluant des sondages au piézocône et des interprétations préliminaires de profils sismiques (Pugin et Pullan, 2013).

Mis à part le forage RS01, où les 5,8 m supérieurs sont constitués de sédiments alluviaux, les sédiments fins de la mer de Champlain constituent l'unité supérieure observée dans les quatre forages rotosonic. Ces sédiments marins sont principalement constitués de silts argileux (code F1) dont l'épaisseur varie de 6,7 m (RS05) à 17,3 m (RS01). Il faut toutefois se rappeler que si ces épaisseurs d'argiles marines peuvent paraître assez faibles, c'est que les forages ont été positionnés principalement dans le but d'intersecter les unités sous-jacentes aux sédiments de la Mer de Champlain. Ces quatre forages (localisation à la figure 2.9) fournissent donc un premier aperçu de l'importante variabilité des unités quaternaires de sous-surface, une variabilité que laissait déjà entrevoir la compilation des données de forage du SIH (Système d'information hydrogéologique; MDDEFP, 2009). Par contre, les données du SIH sont difficiles à interpréter dès que l'on s'écarte des lithofaciès très francs, tels les sables et les argiles.

Dans tous les forages rotosonics, les sédiments marins surmontent directement des diamictons compacts à matrice silto-sableuse dominante, présumément des tills. Par ailleurs, plusieurs des sondages au piézocône réalisés dans le cadre de ce projet montrent une unité sableuse de quelques mètres d'épaisseur interposée entre les sédiments glaciaires et marins. Bien qu'il n'ait pas été possible d'échantillonner cette unité, cette dernière pourrait correspondre à des épandages proglaciaires sous-aquatiques, notamment en raison de la présence de lits silto-sableux et de l'absence de lits graveleux. Cette unité est identifiée avec le code Gs sur les coupes géologiques régionales (section 3.2.4). D'autre part, des faciès de type Gs ont aussi été intersectés sur plus de 20 m sous un diamicton silto-sableux au forage RS02. Ce forage a été effectué au droit d'une crête assez étroite d'environ 20 m de hauteur qui est complètement enfouie sous les argiles marines (section 3.2.4, coupe XS06). Le contexte stratigraphique de cette crête enfouie est très semblable à celui observé dans plusieurs coupes de la partie sud de la plate-forme où une couche de till de quelques mètres d'épaisseur surmonte des sédiments sableux d'épandage proglaciaire sous-aquatique, tel qu'indiqué plus haut.

Dans les forages RS04 et RS05, le till surmonte des sédiments plutôt fins, allant de silts argileux laminés à des sables silteux ou très fins laminés. Cette unité avait été provisoirement interprétée comme étant d'origine glaciolacustre. Toutefois l'examen des analyses de microfaunes (foraminifères et ostracodes) dans le forage RS04 indique qu'il s'agit d'une unité marine. L'interprétation détaillée des autres faciès silteux ou silto-argileux des forages RS04 et RS05 nécessiterait donc des investigations supplémentaires. Étant donné la mauvaise récupération des carottes dans l'intervalle sus-jacent aux sédiments marins du forage RS04, de nouveaux carottages entre 14 et 18 m sont requis afin d'établir une colonne stratigraphique plus définitive.

Par ailleurs, les sédiments marins du forage RS04 surmontent des sables alluviaux contenant des débris végétaux datés à 31 270 ± 200 ans BP (Beta - 343397). Cet âge a été obtenu sur des macro-restes végétaux sélectionnés suite à une datation ^{14}C apparemment fiable. Ces sables alluviaux semblent donc plus jeunes que les sédiments de St-Pierre et auraient donc été déposés vers la fin de l'Interstade des Becquets (Wisconsinien moyen ; Lamothe, 1989).

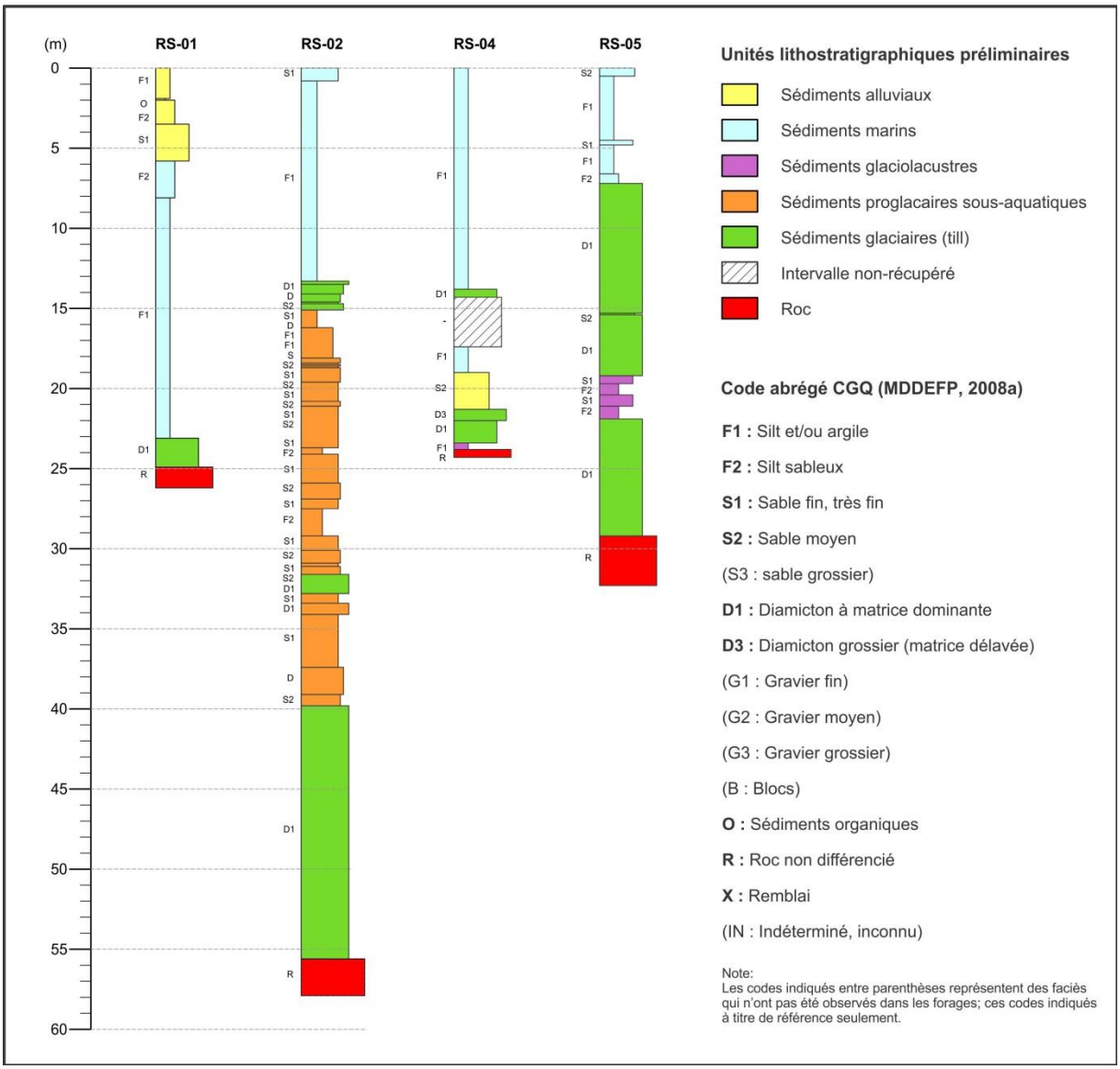


Figure 3.3 : Descriptions lithologiques des formations quaternaires interceptées lors des forages rotosonic effectués dans la zone d'étude

Sauf à la base du forage RS04 où l'on observe une mince unité de silts laminés et partiellement déformés, l'unité inférieure dans les forages RS02, RS04 et RS05 est constituée de diamicton à matrice dominante et très compacte que l'on interprète comme étant des tills. Alors que la matrice de ces tills est généralement silto-sableuse (RS02 et RS04) comme le sont la plupart des tills de la région, le till inférieur du forage RS05 comporte des niveaux nettement silto-argileux, ce qui indique que l'inlandsis avait incorporé des sédiments silto-argileux à sa base. Dans ce contexte, cette caractéristique compositionnelle permet, au-delà de leur position stratigraphique semblable, de mettre en corrélation les tills inférieurs des forages RS04 et RS05.

3.2.3 Couverture de dépôts meubles

Les livrables 15 et 16 présentent respectivement l'épaisseur totale des dépôts meubles et la topographie du socle rocheux. La méthodologie utilisée pour préparer ces livrables est décrite en détail à l'annexe 3 de ce rapport et résumée ci-dessous.

Les estimés d'épaisseur totale des dépôts meubles ont été obtenus en interpolant une sélection de données colligées et validées dans le cadre du projet ; ces données comprennent des données de forage provenant de différentes sources, des affleurements rocheux, des données géophysiques interprétées (sismique réflexion) et, de manière indirecte, des informations sur la distribution des sédiments quaternaires. Différentes méthodes d'interpolation ont été utilisées pour estimer les épaisseurs dans chacun des contextes géologiques définis plus haut. Le choix de la méthode dépendait notamment de la distribution spatiale, de la quantité et de la qualité des données mais également du type de contexte considéré (ex. : basses-terres versus vallées et interfluves appalachiens). Subséquemment, une vérification des résultats a été réalisée 1) par validation croisée et 2) par analyse visuelle des résultats en coupe afin d'identifier la présence d'erreurs potentielles et d''optimiser au besoin les paramètres d'interpolation. La topographie du roc est quant à elle obtenue en soustrayant l'épaisseur totale des dépôts meubles du modèle altimétrique numérique. Afin d'éviter la création de faux reliefs rocheux aux endroits caractérisés par une faible densité de données (ex. : dans le voisinage immédiat des principales rivières), le modèle altimétrique numérique a été préalablement modifié pour combler les dépressions mineures dans la zone de la Plate-forme du Saint-Laurent.

L'épaisseur totale de dépôts meubles ainsi estimée s'avère être plus importante dans la partie nord (moyenne de 29.4 m) de la Plate-forme du Saint-Laurent que sa partie sud (moyenne de 8.2 m). Les épaisseurs les plus importantes se situent dans le secteur de Sorel où des valeurs de plus de 80 m sont estimées. Malgré tout, on distingue également des zones de faible épaisseur dans la partie nord, notamment le long de la rivière Yamaska (au nord-est de Saint-Hyacinthe) ainsi qu'entre la rivière Richelieu et le fleuve Saint-Laurent, au sud de Contrecoeur. Toujours dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent, on remarque la présence d'épaisseurs significatives entre les collines montérégiennes, mais aussi en aval glaciaire (sud-sud-est) de certaines de celles-ci (monts Saint-Hilaire, Rougemont et Yamaska). Dans la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent, les épaisseurs significatives se retrouvent surtout le long des vallées des rivières l'Acadie et Richelieu ainsi qu'à proximité du bassin de Chambly. Dans les Appalaches, les épaisseurs totales de dépôts meubles sont de l'ordre de 7 m. On remarque, par contre, que les épaisseurs sont légèrement plus importantes dans la partie ouest des Appalaches (correspondant à la zone de Humber externe ou au piedmont appalachien) que sa partie est. On peut également observer que les principales vallées (ex. : vallées des rivières Noire, Missisquoi Nord, Sutton) sont caractérisées par des épaisseurs de dépôts meubles plus importantes que celles estimées sur les interfluves et les hautes-terres. Finalement, on retrouve les plus faibles épaisseurs sur les collines montérégiennes avec une valeur moyenne de 5.9 m.

La topographie du roc reflète généralement la topographie de la surface, à l'exception de quelques vallées appalachiennes remplies de sédiments et de la partie nord de la Plate-forme

du Saint-Laurent où on observe des différences marquées entre le relief de surface et celui du roc. On peut également identifier des zones de surcreusement du roc entre les collines montérégiennes et au nord de celles-ci. À l'extrême nord, on remarque également que la surface du roc plonge vers le lac Saint-Pierre (orientation nord-nord-ouest).

En complément à l'estimation de l'épaisseur totale de dépôts meubles, l'épaisseur de groupes de sédiments a également été estimée selon la méthode décrite précédemment. Les sédiments considérés ont été regroupés en fonction de leur rôle potentiel au niveau de l'hydrogéologie régionale, mais aussi en fonction de la quantité et de la fiabilité des données disponibles. Ces groupes de sédiments comprennent : 1) les sédiments argileux, 2) les sédiments indifférenciés, essentiellement sableux, sus-jacents aux sédiments argileux et 3) les sédiments indifférenciés sous-jacents aux sédiments argileux (ou l'épaisseur totale en l'absence de sédiments argileux). L'épaisseur de sédiments argileux a d'abord été estimée à partir des données de forages valides disponibles interceptant des sédiments de ce type. Par la suite, la profondeur du toit du groupe de sédiments argileux a été estimée afin d'obtenir l'épaisseur de sédiments indifférenciés sus-jacents aux sédiments argileux. La somme de ces épaisseurs estimées (i.e. sédiments argileux et sédiments indifférenciés sus-jacents) a ensuite été soustraite de l'épaisseur totale pour obtenir l'épaisseur des sédiments indifférenciés sous-jacents aux sédiments argileux ; il en résulte notamment des épaisseurs nulles pour les sédiments indifférenciés sous-jacents aux sédiments argileux lorsque ces derniers reposent directement sur le roc. Bien qu'il aurait été intéressant de distinguer les sédiments sablo-graveleux des sédiments silto-sableux ou silto-argileux pour la portion sous-jacente aux sédiments argileux, la qualité de données disponibles ne permettait pas d'effectuer une telle catégorisation de façon fiable. Comme étape finale, les valeurs estimées pour les sédiments argileux et pour les sédiments indifférenciés sus-jacents ont été masquées aux endroits où leur présence était considérée peu probable en raison des sédiments cartographiés en surface (i.e. dans les zones de till mince ou d'affleurements rocheux). Ces cartes d'épaisseur sont présentées dans l'atlas hydrogéologique (annexe 1) et dans les figures suivantes du rapport.

La figure 3.4 montre la distribution des épaisseurs estimées de sédiments argileux, avec un maximum d'environ 65 m situé dans l'extrême nord de la zone d'étude et une épaisseur moyenne de 7.6 m pour l'ensemble de la zone d'étude. L'origine de ces sédiments semble être principalement marine, puisque les sédiments argileux d'origine glaciolacustre sont moins répandus dans la partie nord de la zone d'étude, étant surtout présents dans les vallées appalachiennes et localement sous les sédiments argileux d'origine marine dans le sud-est de la région étudiée. Selon leur contexte et leur épaisseur, ces sédiments argileux peuvent réduire considérablement l'infiltration et la circulation d'eau souterraine, diminuant ainsi la recharge potentielle aux aquifères sous-jacents mais jouant également un rôle de protection pour ceux-ci.

L'épaisseur estimée des sédiments indifférenciés sus-jacents aux sédiments argileux est présentée à la figure 3.5. Ces sédiments comprennent principalement des sédiments sableux alluviaux et littoraux (lacustres et/ou marins). Leur étendue est plus limitée que celle des sédiments argileux, principalement en raison de la dynamique sédimentaire requise pour leur mise en place. Leur épaisseur est de moins de 1 m en moyenne dans la zone d'étude mais peut atteindre plus de 10 m à certains endroits, notamment dans le secteur de Sorel où d'épais dépôts de sables alluviaux sous-tendent des terrasses fluviales associées au proto-Saint-Laurent. Ces zones de plus forte épaisseur pourraient constituer des aquifères granulaires potentiels.

Finalement, la figure 3.6 illustre l'épaisseur estimée des sédiments indifférenciés sous-jacents aux sédiments argileux. Ceux-ci peuvent être de nature variée, incluant principalement des sédiments glaciaires (till) ainsi que des sables et graviers d'origine fluvioglaciaire ou encore des sédiments lacustres, marins ou alluviaux préservés sous le Till de Gentilly.

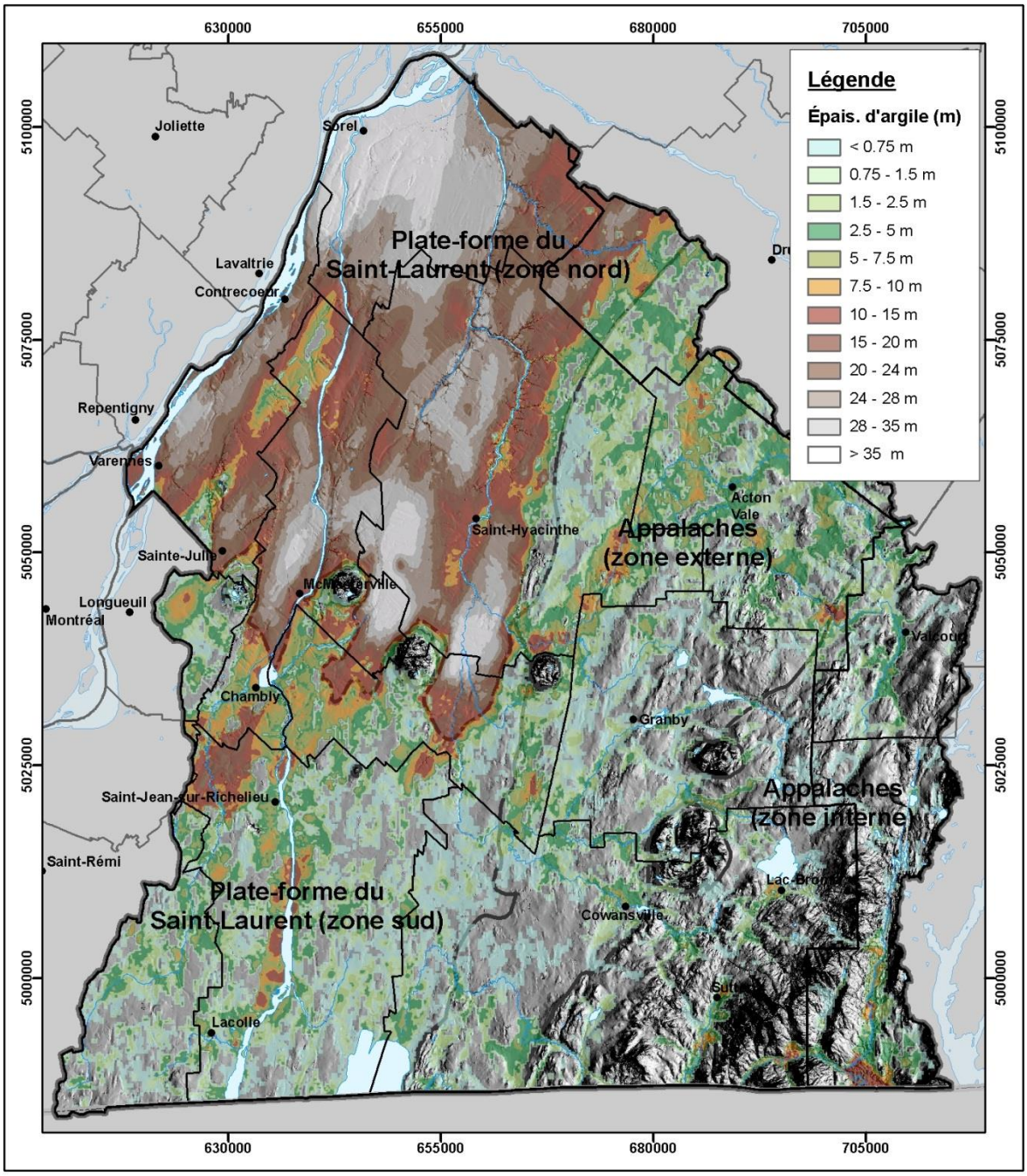


Figure 3.4 : Épaisseur de sédiments argileux

Bien que ce groupe de sédiments puissent jouer différents rôles hydrogéologiques (ex. : aquifère, aquitard, aquitard fuyant) selon leur nature, les zones de fortes épaisseurs identifiées sur cette carte peuvent tout de même constituer des cibles potentielles pour la recherche en eau lorsqu'elles sont préalablement mises en contexte avec d'autres informations telles la cartographie des dépôts meubles.

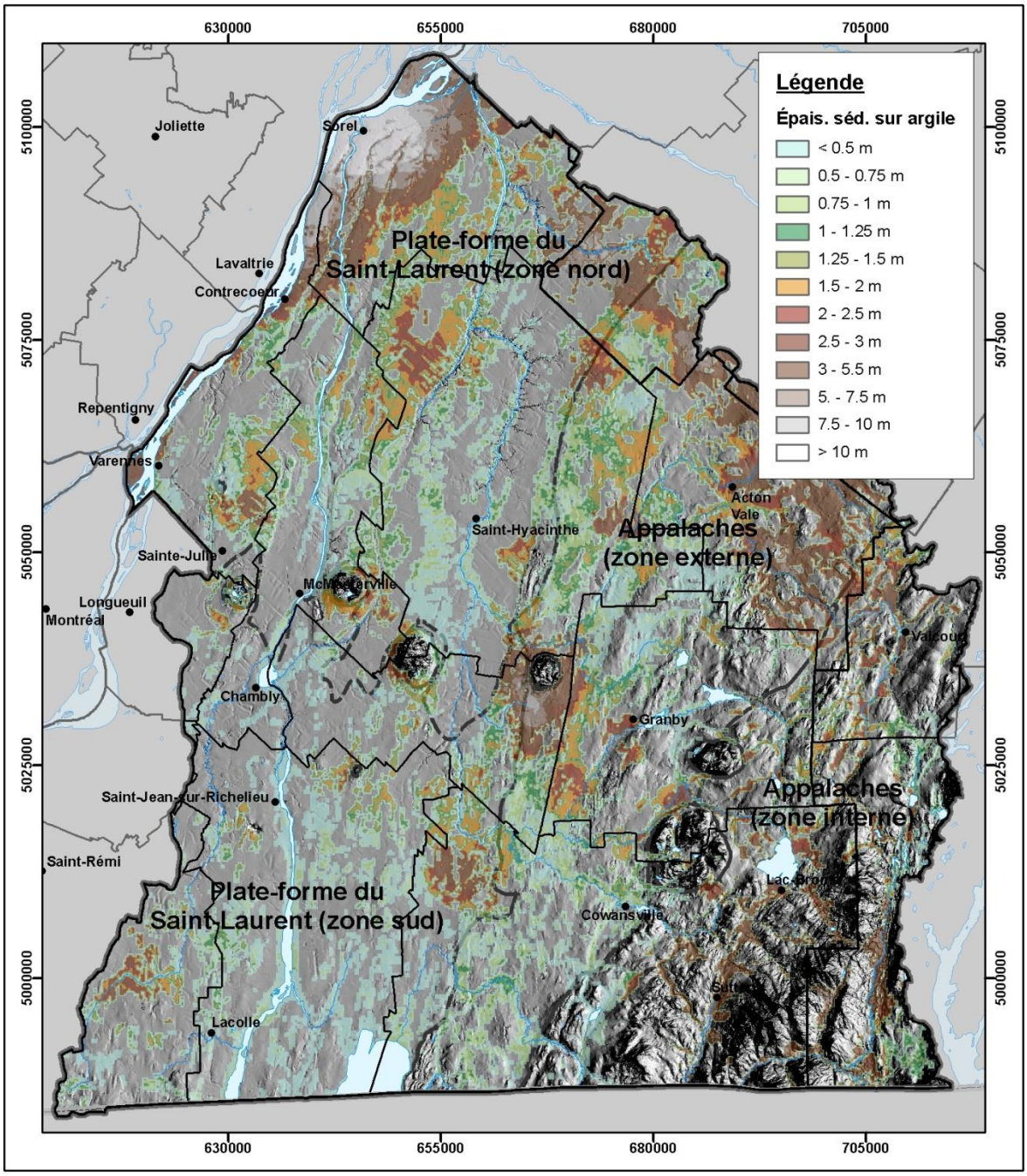


Figure 3.5 : Épaisseur de sédiments indifférenciés sus-jacents aux sédiments argileux

L'épaisseur de ces sédiments indifférenciés est d'environ 5.5 m en moyenne dans la zone d'étude ; on retrouve des épaisseurs significatives de ces sédiments dans certaines vallées appalachiennes, où la présence de sédiments grossiers sous-jacents aux sédiments argileux est possible. D'importantes épaisseurs sont également présentes au nord et au sud des collines montérégiennes situées dans la Plate-forme du Saint-Laurent.

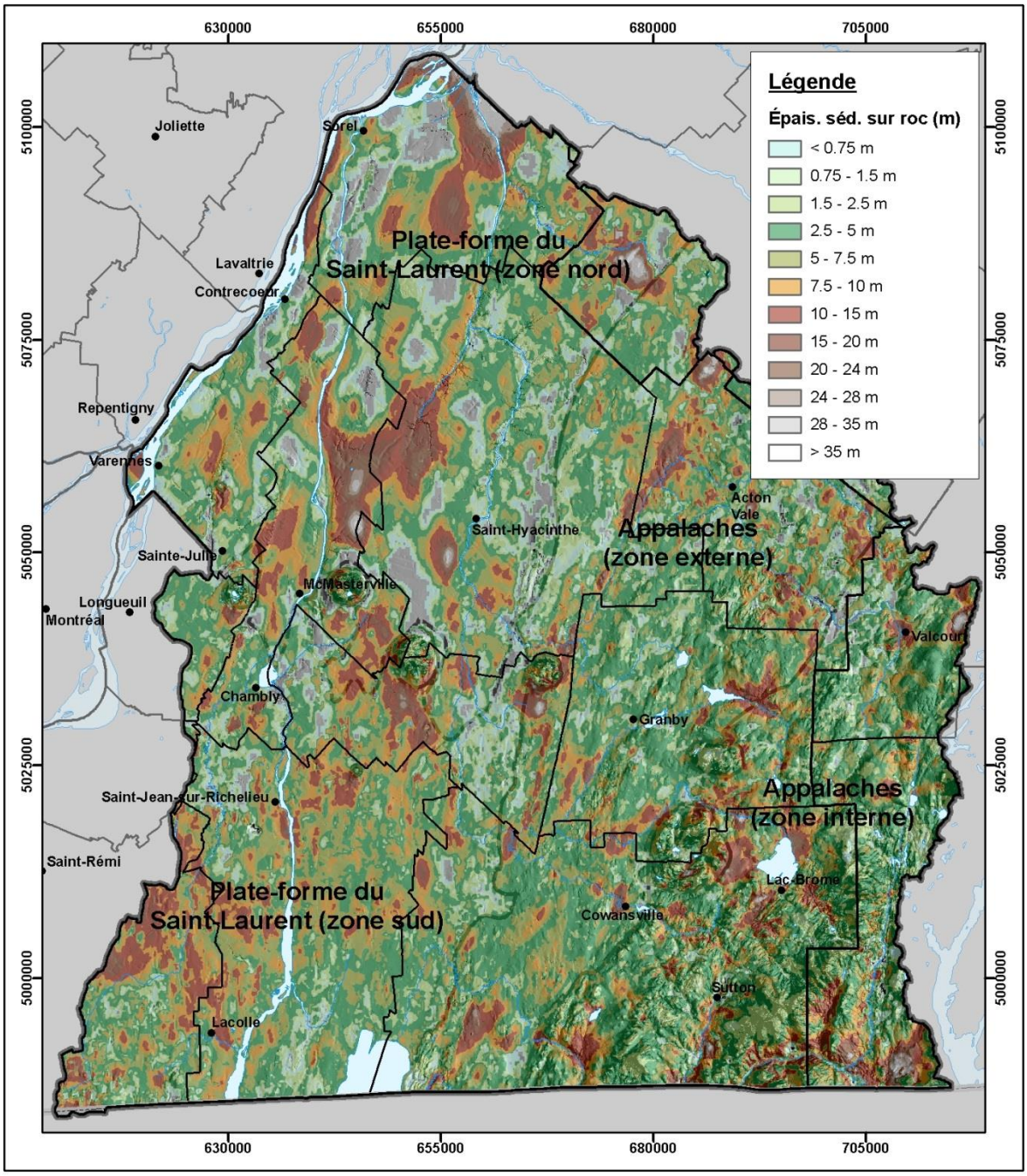


Figure 3.6 : Épaisseur de sédiments indifférenciés sous-jacents aux sédiments argileux

Les zones situées au sud pourraient être associées à des zones d'accumulation ou de préservation préférentielle de sédiments selon la direction de l'écoulement glaciaire tandis que des épandages proglaciaires mis en place lors du retrait glaciaire pourraient être à l'origine des zones situées au nord. La densité des données de forage au nord des collines montérégiennes est toutefois faible et amène une incertitude plus importante qu'au sud quant à l'étendue et à l'origine de ces sédiments.

3.2.4 Architecture des sédiments

Onze (11) coupes stratigraphiques simplifiées ont été préparées afin de documenter et d'illustrer l'architecture des dépôts dans des contextes typiques et aussi afin d'illustrer la profondeur au roc et la continuité latérale des unités. Ces coupes ont été élaborées à partir des données de forages colligées et validées dans le cadre du projet (à moins de 500 m du tracé de la coupe) mais également à partir de la géologie du Quaternaire, des données sur les affleurements et des données géophysiques interprétées (principalement des données de sismique réflexion). Elles sont présentées au livrable 14 et alors que leur tracé est présenté sur la figure 3.7. L'emplacement du tracé des coupes a été sélectionné en fonction des données disponibles mais également en fonction des contextes hydrogéologiques et de leurs limites, de la piézométrie de l'aquifère régional au roc fracturé et des données géochimiques recueillies. Ces coupes ont ultimement permis de synthétiser l'architecture des sédiments par des modèles conceptuels présentés à la section 4.7.

La séquence de sédiments rencontrée dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent est représentée par les coupes XS01 et XS05 ainsi que par les coupes XS02 et XS06, ces dernières illustrant également la transition avec la zone externe des Appalaches. On peut observer sur ces coupes une importante épaisseur de sédiments marins fins (silto-argileux), de l'ordre de 20 m en moyenne, reposant généralement sur des diamictons (généralement interprétés comme du till sur les coupes) ou directement sur le roc. Le till, parfois absent ou mince, est d'épaisseur variable mais pourrait atteindre plus de 10 m par endroits. Les sédiments marins fins sont surmontés de sédiments alluviaux, organiques ou lacustres qui sont généralement discontinus et de faible épaisseur, à l'exception de la partie ouest de la coupe XS01 (secteur de Sorel) où les sédiments alluviaux peuvent atteindre plus de 10 m. Des sédiments marins littoraux surmontent également les sédiments marins fins aux limites de ce contexte. Les données paléoécologiques recueillies pour le forage RS01 situé le long de la coupe XS01 ont également permis de différencier les sédiments fins d'origine lacustre de ceux d'origine marine (cette distinction n'a toutefois pas été possible ailleurs, faute d'information adéquate). A la base des sédiments marins fins, des sédiments proglaciaires sableux, discontinus et minces (généralement < 3 m), sont également observés, reposant sur du till ou sur le roc. Sur les coupes XS05 et XS06, des accumulations plus importantes (> 20 m) de sédiments de ce type sont observées localement et, dans le cas de la coupe XS06, ces sédiments sont également surmontés par un diamicton (possiblement un till également). Finalement, des sédiments quaternaires anciens, incluant des sédiments alluviaux qui auraient été déposés au Wisconsinien moyen), ont aussi été identifiés dans le forage RS04 situé le long de la coupe XS02 sous le till.

Les coupes XS07, XS16 et XS18 illustrent, quant à elles, des exemples de séquences quaternaires à la transition entre les parties nord et sud de la Plate-forme du Saint-Laurent et les collines montérégiennes. Sur les coupes XS16 et XS18, on peut notamment observer une épaisseur importante de sédiments glaciaires (> 10 m) au sud des collines montérégiennes (partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent) et, comme mentionné plus haut, une épaisseur importante de sédiments marins fins au nord de ces collines. Sur le pourtour des collines montérégiennes, surmontant les sédiments glaciaires (parfois remaniés), on retrouve des sédiments littoraux (à prédominance sableuse) pouvant atteindre plus de 20 m d'épaisseur. Sur les collines montérégiennes, les sédiments sont minces, principalement des tills, et le roc affleure par endroits. Sur les coupes XS07 et XS16, on peut aussi observer la présence de sédiments fluvioglaciaires. Dans le cas de la coupe XS07, ces sédiments, observés entre les monts Rougemont et Saint-Hilaire, sont sous-jacents aux sédiments marins fins et semblent reposer directement sur le roc, le till ayant possiblement été érodés au moment de leur mise en place. Sur la coupe XS16, au sud du mont Rougemont, ces sédiments sablo-graveleux sont

présents entre deux unités diamictiques (possiblement des tills) et constituent un aquifère granulaire exploité pour l'approvisionnement en eau municipal.

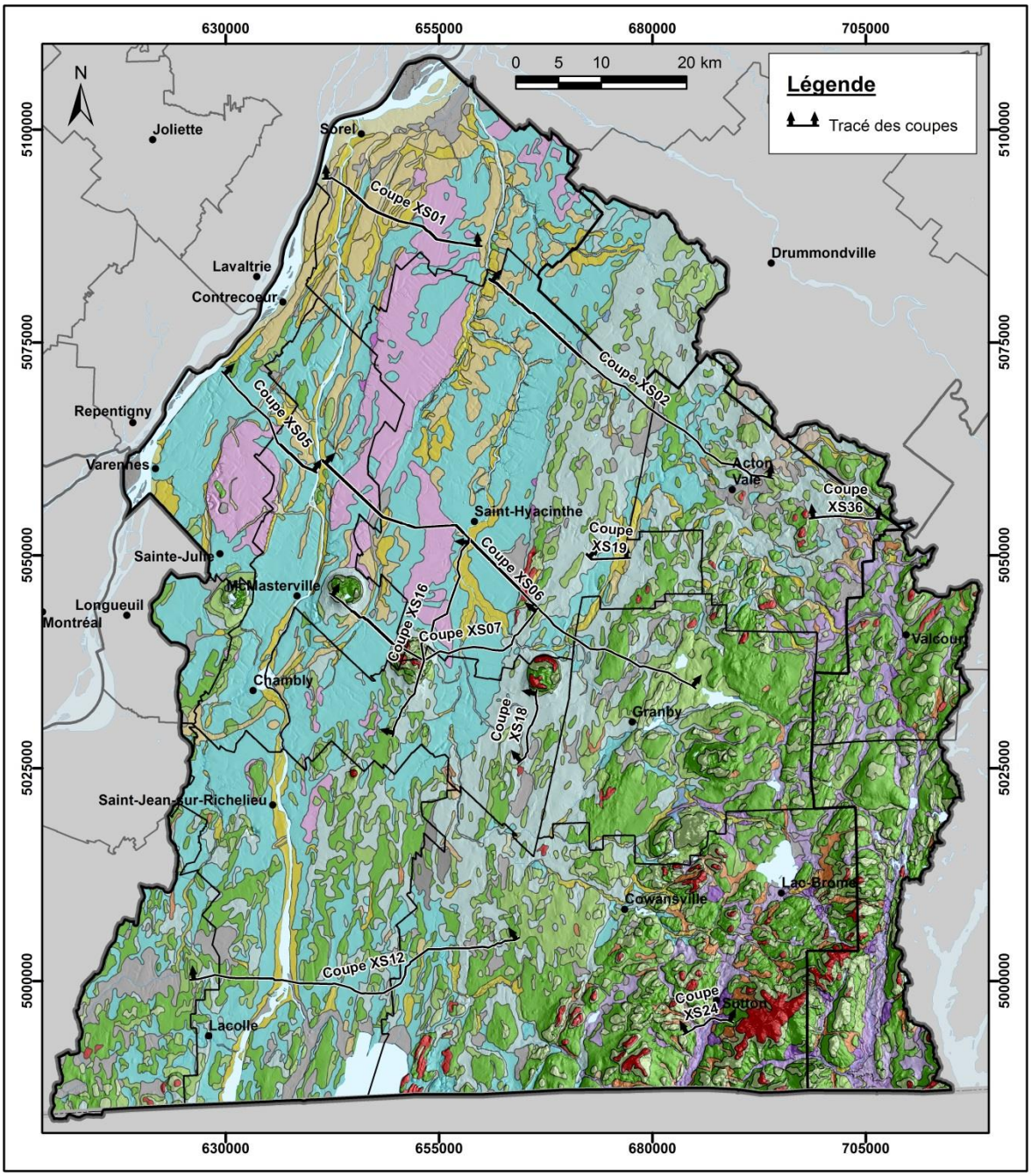


Figure 3.7 : Emplacement des coupes stratigraphiques simplifiées

La partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent est quant à elle représentée par la coupe XS12, laquelle traverse notamment la vallée de la rivière Richelieu. Dans cette vallée, la séquence stratigraphique est similaire à celle observée dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent et est caractérisée par une importante épaisseur (> 20 m) de sédiments argileux d'origine marine. Toutefois, ailleurs sur la coupe, la couverture des sédiments marins fins est discontinue et beaucoup plus mince (< 5 m). Les sédiments marins littoraux sont plus répandus, de même que les tills (continu et/ou remanié. Des sédiments fluvioglaciaires enfouis sous les

argiles marines et surmontant le till ou le roc sont également observés localement, par exemple juste à l'ouest de la rivière Richelieu où ils atteignent près de 10 m.

Comme mentionné précédemment, des exemples de séquences stratigraphiques pour la zone externe des Appalaches sont présentés sur les coupes XS02 et XS06, qui illustrent la transition avec la Plate-forme du Saint-Laurent, mais également sur les coupes XS19 et XS36 qui présentent des séquences typiques des vallées de ce contexte. Dans les vallées du secteur ouest du contexte, on retrouve encore une séquence stratigraphique similaire à celle observée dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (ex. vallées de la rivière Noire dans XS19 et XS06 et de la rivière Duncan dans XS02) avec des épaisseurs importantes de sédiments silto-argileux d'origine marine reposant généralement sur un till et surmontés de sédiments alluviaux relativement minces (épaisseur totale de 15-20 m en moyenne). Dans les vallées du secteur est (ex. vallées de la rivière le Renne dans XS36 et de la rivière Mawcook dans XS06), la séquence diffère légèrement et les sédiments fins d'origine marine font place aux sédiments sablo-graveleux littoraux marins et aux sédiments silto-argileux d'origine glaciolacustre. L'épaisseur totale des dépôts y est également moindre, de l'ordre de 5-10 m en moyenne. Des épaisseurs importantes de sédiments fluvioglaciaires sont également observées dans ce contexte, notamment sur la coupe XS36, où ils reposent en partie sur le till et en partie sur le roc. A l'extérieur des vallées, la séquence typique comprend généralement des sédiments glaciaires (till continu ou remanié) d'une épaisseur moyenne d'environ 5 m, reposant sur le roc et surmontés localement de sédiments littoraux d'origine marine ou glaciolacustre.

Finalement, une seule coupe (XS24) est localisée dans la zone interne des Appalaches, plus précisément dans la vallée de la rivière Sutton. A l'extérieur des vallées, la séquence typique dans ce contexte consiste en un till ou un till remanié reposant directement sur le roc (épaisseur totale de moins de 3 m en moyenne), tel qu'illustré aux extrémités de la coupe XS24. Dans les vallées, on retrouve typiquement des sédiments fins d'origine glaciolacustre reposant sur un till et surmontés localement de sédiments alluviaux et/ou de sédiments littoraux ou deltaïques d'origine glaciolacustre. Au centre des vallées, l'épaisseur totale des sédiments peut atteindre plus de 30 m.

3.3 Conditions de confinement

Le livrable 17 présente les conditions de confinement de l'aquifère régional de roc fracturé. La méthodologie utilisée pour préparer ce livrable est décrite ci-dessous.

Trois types de conditions ont été considérés pour ce livrable, soient les conditions à nappe libre, semi-captive et captive. Ces conditions ont été définies à partir des épaisseurs estimées de sédiments présentées à la section 3.2.3, plus particulièrement des épaisseurs de sédiments argileux et de sédiments indifférenciés sous-jacents. Toutefois, étant donné le manque d'information sur la nature et la perméabilité des sédiments indifférenciés sous-jacents, l'utilisation de l'épaisseur de ces sédiments comme critère de confinement entraîne une certaine incertitude sur les conditions définies, particulièrement les conditions à nappe semi-captive dont les critères sont basés sur ces estimés d'épaisseur. Par conséquent, les conditions à nappe semi-captive ont été subdivisées en trois sous-catégories afin de tenter d'illustrer l'incertitude et mieux guider l'utilisation potentielle de ce livrable. Les différents critères utilisés pour définir chaque condition sont résumées ci-dessous dans tableau 3.3.

Le livrable 17 permet de distinguer rapidement la distribution des différentes conditions de confinement. Les conditions à nappe captive (en vert) couvrent environ le tiers de la zone d'étude (35 %) et sont principalement observées dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent en raison de l'importante épaisseur de sédiments argileux peu perméables. On retrouve

aussi ce type de condition dans les principales vallées de la zone d'étude (ex. : celles des rivières Richelieu, Noire et Missisquoi), également caractérisées par la présence sédiments argileux (d'origine marine ou glaciolacustre). Les conditions à nappe semi-captives sont quant à elles présentes dans presque la moitié de la zone d'étude (49 %) et se retrouvent dans la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent, dans la zone externe des Appalaches ainsi que, dans une moindre mesure, dans la zone interne des Appalaches. Ces zones sont caractérisées par des épaisseurs modérées des sédiments potentiellement peu perméables. Finalement, les conditions à nappe libre qui occupent environ 16 % de la zone d'étude sont surtout présentes dans la zone interne des Appalaches où l'épaisseur totale des dépôts est généralement faible à l'extérieur des vallées. Ces conditions se retrouvent également sur les collines montérégiennes et ailleurs dans la zone d'étude sur les hauts topographiques caractérisés par l'absence de sédiments argileux et la faible épaisseur de sédiments glaciaires (till). Quelques zones de conditions à nappe libre associées à la présence de roc sub-affleurant sont également présentes dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent le long de la rivière Yamaska (entre Saint-Hyacinthe et Saint-Hugues) ainsi qu'au sud Varennes et Contrecoeur.

Tableau 3.3 : Critères pour la définition des conditions de confinement

Condition de confinement		**Critères utilisés**
Condition à nappe captive		- Épaisseur de sédiments argileux > 5 m
Condition à nappe semi-captive	Niveau 1	- Épaisseur de sédiments argileux entre 1-5 m - Épaisseur de sédiments indifférenciés > 3 m
	Niveau 2	- Épaisseur de sédiments argileux < 1 m - Épaisseur de sédiments indifférenciés > 3 m - Sédiments glaciaires (till) cartographiés en surface
	Niveau 3	- Épaisseur de sédiments argileux < 1 m - Épaisseur de sédiments indifférenciés > 3 m - Sédiments non glaciaires (till) cartographiés en surface
Condition à nappe libre		- Épaisseur de sédiments argileux < 1 m - Épaisseur de sédiments indifférenciés < 3 m

Dans les zones de condition à nappe captive, la présence d'une couche peu perméable, telle que les sédiments silto-argileux de la mer de Champlain dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent, vient confiner l'aquifère sous-jacent, limitant ainsi l'écoulement vertical de l'eau souterraine (recharge ou résurgence). Par la même occasion, l'aquifère ainsi confiné se trouve relativement isolé de l'écoulement des eaux de surface et des activités anthropiques sus-jacentes. Dans le cas des zones de condition à nappe libre, la nappe de l'aquifère de roc fracturé est libre de s'adapter aux conditions climatiques variables (précipitations, pression, …) étant donné l'absence de sédiments peu perméables sus-jacent. La nappe peut donc fluctuer librement dans le roc ou les sédiments sus-jacents selon les apports en eau. L'infiltration, et éventuellement la recharge, est donc généralement plus importante et plus rapide dans ces conditions. En contrepartie, les zones en condition libre peuvent être influencées par les activités anthropiques en surface.

A noter que les conditions de confinement applicables aux aquifères granulaires n'ont pas été définies et peuvent être différentes que celles déterminées pour l'aquifère régional de roc fracturé. Les aquifères granulaires étant peu étendus dans la région, il n'était pas possible d'en définir les conditions de confinement dans le cadre d'une étude régionale.

3.4 Contextes hydrogéologiques

Le livrable 18 présente les grands contextes hydrogéologiques ainsi que les séquences hydrostratigraphiques typiques. La méthodologie utilisée pour préparer ce livrable est décrite ci-dessous.

Les contextes hydrogéologiques régionaux ont été définis sur la base des contextes géologiques du socle rocheux et des épaisseurs de sédiments argileux. Ainsi, les cinq contextes hydrogéologiques suivants ont été définis : 1) la Plate-forme du Saint-Laurent (partie nord), 2) la Plate-forme du Saint-Laurent (partie sud), 3) les Appalaches (zone externe), 4) les Appalaches (zone interne) et 5) les collines montérégiennes. Les parties nord et sud de la Plate-forme du Saint-Laurent ont été définies à partir de la carte d'épaisseur de sédiments argileux, la partie nord étant caractérisée par des épaisseurs de sédiments argileux de plus 10 m et la partie sud, des épaisseurs de moins de 10 m. Bien qu'arbitraire, cette subdivision du contexte de la Plate-forme du Saint-Laurent semble appropriée compte tenu de l'impact significatif qu'a la présence d'argile sur l'hydrogéologie régionale de la partie nord, autant au niveau de la géochimie de l'eau souterraine que de l'hydrodynamique de l'aquifère régional rocheux. La limite sud-est de la Plate-forme du Saint-Laurent (parties nord et sud) correspond à la Ligne de Logan, séparant les roches sédimentaires peu déformées de la Plate-forme du Saint-Laurent des roches sédimentaires des Appalaches affectées par un métamorphisme régional et ayant subies des déformations plus importantes. La zone externe des Appalaches correspond approximativement à la zone de Humber externe bien que sa limite sud-est, la faille de Oak Hill, soit différente de celle définie pour la zone externe de Humber à la section 3.1.3 (la faille de Brome). Ce choix est arbitraire mais l'utilisation de la faille de Oak Hill, qui constitue également un contact géologique (limite nord-ouest du Groupe de Oak Hill), semblait mieux adaptée aux besoins d'un projet hydrogéologique régional. De plus, cette position est semblable à celle de la limite marine, ce qui a des implications sur la géochimie de l'eau souterraine (section 4.6). La zone interne des Appalaches correspond quant à elle au regroupement des zones de Humber interne et de Dunnage ; cette dernière a été combinée à la zone de Humber interne étant donné la faible superficie qu'elle couvre dans la zone d'étude mais aussi en raison de l'absence de différences significatives au niveau des caractéristiques hydrauliques dérivées des informations disponibles.

Les zones de séquences hydrostratigraphiques typiques ont quant à elles été définies à partir des épaisseurs estimées des sédiments. La combinaison de ces données a permis de définir six séquences typiques : 1) roc affleurant, 2) sédiments fins sur roc, 3) sédiments fins sur sédiments indifférenciés sur roc, 4) sédiments indifférenciés sur roc, 5) sédiments indifférenciés sur sédiments fins sur roc et 6) sédiments indifférenciés sur sédiments fins sur sédiments indifférenciés sur roc. Ces séquences typiques ont été établies dans le but de servir d'indicateurs régionaux des conditions potentielles pouvant être rencontrées dans un secteur ; elles ne peuvent donc pas remplacer des études locales.

La distribution de ces séquences sur le livrable 18 indique une prédominance de la séquence de sédiments indifférenciés sur roc dans tous les contextes, à l'exception de celui de la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent. Cette dernière est caractérisée par une séquence de sédiments fins reposant sur sédiments indifférenciés et roc. La carte de ce livrable peut fournir des informations d'intérêt pour l'exploitation et la gestion des ressources en eau souterraine lorsque combinée à d'autres données telles que la géologie du Quaternaire et les épaisseurs des sédiments.

4 CONDITIONS HYDROGEOLOGIQUES

4.1 Propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques sont des caractéristiques d'un aquifère qui permettent de représenter quantitativement l'écoulement de l'eau souterraine. Ces propriétés incluent notamment la conductivité hydraulique (K; m/s) et la transmissivité ($T = K \cdot b$, où b est l'épaisseur de l'aquifère (m); m^2/s) qui sont estimées par les essais hydrauliques, typiquement à partir de l'analyse du rabattement (s; m) en fonction du temps (t; s) induit dans des puits d'observation par pompage à débit constant Q (m^3/s). Une autre propriété, le coefficient d'emmagasinement (S; $m^3/m^2/m$, sans dimension), peut être estimée conjointement mais, à cause de sa moindre influence sur l'évolution du rabattement, son estimation est souvent négligée étant donné l'imprécision associée à certains types d'essais hydrauliques. Enfin, la capacité spécifique ($CS = Q/s$; m^2/s) est une propriété caractérisant l'efficacité d'un puits de pompage qui permet une estimation indirecte et approximative de T. Puisque les données de CS sont beaucoup plus courantes que celles sur T ou K, la capacité spécifique est fréquemment utilisée pour l'estimation de T, puis K (Mace, 2001).

4.1.1 Méthodologie d'analyse

4.1.1.1 Création d'une base de données des propriétés hydrauliques

Afin de faciliter le traitement des propriétés hydrauliques comme des variables statistiques continues, un sous-ensemble de la base de données du projet a été préparé au moyen de scripts développés dans le logiciel statistique R (R Core Team, 2013). La préparation de cette nouvelle base de données dédiée à l'évaluation des propriétés hydrauliques (ci-après appelée BDPH – base de données pour les propriétés hydrauliques) est une étape essentielle à l'obtention de résultats de qualité suffisante et comprend, globalement, la fusion de plusieurs tables de la base de données du projet de la Montérégie Est en une grande table où chaque ligne correspond à un objet et où les objets non valides ont été supprimés. Les tables de la base de données du projet jugées pertinentes pour l'étude des propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux sont :

- table « objet » incluant l'identifiant des objets et permettant la fusion des autres tables via certains champs représentant des clés primaires
- table « validation » incluant les critères de validation permettant d'éliminer les objets jugés « non valides »
- table « captage » incluant différentes informations sur les puits de captage (ex. : utilisation, type de captage, aquifère intercepté, etc.)
- table « infrastructure » incluant des informations sur la construction des puits, notamment la date et la méthode de forage, la profondeur totale, les diamètres du forage et du tubage, la longueur du tubage, etc.
- table « niveau_eau » comprenant les niveaux d'eau statiques mesurés dans les puits (date et mesures)
- table « essais_pompage » incluant les données sur les divers essais hydrauliques dans les puits (ex. : débit pompé, profondeur du niveau dynamique, estimations de S, de T, de K, etc.)
- table « localisation » incluant la localisation des puits (i.e. coordonnées UTM) ainsi que d'autres informations complémentaires (ex. : altitude au sol à l'endroit de l'objet, municipalité, etc.)

D'autres informations complémentaires ont également été inclues à la BDPH, notamment :

- localisation des puits relativement à la zone d'étude (à l'intérieur ou à l'extérieur)
- profondeur des puits relativement au roc (i.e. puits atteignant le roc et, si oui, profondeur sous le toit du roc)
- contexte géologique / hydrogéologique aux puits
- géologie cartographiée aux puits (province géologique, groupe, âge, formation géologique, etc.)
- conditions de confinement estimées aux puits (libre, semi-captive, captive)

Une fois ces données importées en tant que tables (dataframes) dans R, les objets jugés non valides pour l'analyse statistique sont éliminés à l'aide de la table de validation. Ensuite, chaque autre table est nettoyée des champs superflus et restructurée. Les noms des champs sont notamment modifiés afin qu'ils soient facilement compréhensibles dans la BDPH finale. De plus, plusieurs champs « optimisés » ont été créés pour faciliter l'utilisation de champs offrant plus d'une valeur (ex. : le diamètre du tubage ou sinon celui du forage). De même, un choix est fait lorsqu'un objet est renseigné sur plus d'une ligne dans une table (ex. : dans la table des essais hydrauliques de même que dans la table des niveaux d'eau statiques). Alors, certains champs sont résumés par la moyenne des valeurs présentes pour l'objet tandis que, pour d'autres champs, notamment ceux décrivant un essai hydraulique, les valeurs d'une seule ligne (ou un seul essai) sont retenues pour l'objet, selon certains critères (ex. : durée de pompage maximisée, refus des champs vides).

Suite à ces traitements, les tables sont fusionnées à la table de validation. La grande table ainsi obtenue, appelée BDPH dans le texte de cette section, comprend 106 champs et contient 37 118 objets jugés valides. Cependant, ce n'est qu'une fois la variable d'analyse choisie (par exemple *K*) et le script d'analyse démarré que la BDPH est réduite par l'élimination des objets ne renseignant pas les variables (principale et auxiliaires) requises par l'analyse.

4.1.1.2 Analyses statistiques

Les analyses statistiques des variables d'intérêt (*T*, *K*, *S*, *CS*) ont été réalisées à l'aide de scripts. Ces derniers comportent des options qui permettent d'adapter l'analyse à la quantité de données disponibles et à la distribution statistique globale (normale ou log-normale) de la variable d'intérêt ainsi que de limiter cette analyse à un intervalle de profondeur sélectionné et de filtrer préalablement la table selon un choix de critères modulables. Cette approche semi-automatisée est avantageuse puisque les analyses peuvent être ré-exécutées à tout moment (en particulier suite à une mise à jour de la base de données du projet) et parce que l'effet des différentes opérations mentionnées précédemment sur les résultats statistiques peut être inspecté à chaque étape (voir le tableau 4.1 à titre d'exemple). Le tableau 4.1 présente l'effet des différents filtres appliqués sur le nombre de données dans la BDPH. Le logarithme en base 10 a été utilisé puisque *K* est un paramètre reconnu pour avoir une distribution statistique log-normale. Le tableau 4.1 montre que les filtres ont comme conséquence principale d'éliminer plus de 50% des objets de la BDPH, leur effet sur la distribution statistique de la variable d'intérêt étant négligeable. Seulement, on note une légère diminution de la dispersion (écart-type) des valeurs.

Tableau 4.1 : Aperçu de l'effet des filtres appliqués sur la BDPH

Étape dans le filtrage	Effet sur les objets		Effet sur le log10 K (dès que K est disponible)				
	N	Chg. (%)	Q1	Q2	Q3	Moy.	Éc.-t.
À l'ouverture	37 118	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Filtre requis pour calculer T(CS)	19 552	-47.3	NA	NA	NA	NA	NA
Retrait des T(CS) incalculables*	19 491	-0.3	-5.95	-5.35	-4.69	-5.3182	0.97
Filtres Theis / Jacob	15 369	-21.1	-5.74	-5.16	-4.54	-5.1198	0.86
Retrait diamètres improbables	14 277	-7.1	-5.78	-5.22	-4.61	-5.1744	0.84
Retrait des puits complétés dans les dépôts meubles	13 959	-2.2 (-62.4)	-5.79	-5.22	-4.62	-5.18	0.84

T(CS) = T estimé par transformation de la CS; N = nombre d'objets dans la grande table; Chg. (%) = changement de N à cause de l'étape; Qi = $i^{ème}$ quartile (Q2 = médiane); Moy. = moyenne; Éc.-t. = écart-type. * = voir section 4.1.1.3.

La propriété hydraulique finalement choisie comme variable d'analyse principale est *K*. Bien que la plupart des méthodes d'interprétation d'essais hydrauliques, y compris la transformation de la capacité spécifique, fournissent une estimation de *T* et non *K*, une conductivité hydraulique moyenne peut être calculée à partir de *T* et d'une certaine connaissance de la géométrie du puits et/ou de l'aquifère. Cette variable ayant visiblement une distribution log-normale, c'est sa transformation logarithmique ($\log_{10} K$) qui a été analysée. Néanmoins, pour faciliter la lecture, le symbole *K* est aussi utilisé pour référer à la variable d'analyse.

La conductivité hydraulique moyenne de l'aquifère environnant un puits peut être approximée par $K \approx T / b$. L'épaisseur saturée de l'aquifère (b; m) est un paramètre difficile à estimer avec précision; il peut néanmoins être approximé, en pratique. Une façon simple est de considérer l'intervalle ouvert au roc dans le puits sur toute sa longueur (open section length). Cependant, le raisonnement ci-après justifie une approche légèrement différente, qui a été retenue.

En considérant: 1) le caractère imprévisible de la productivité de l'aquifère à l'échelle locale, 2) l'hypothèse qu'un foreur n'approfondit un puits que s'il n'a pas encore atteint l'objectif de production établi avec le client, 3) l'hypothèse découlant de 2) que ce sont généralement les derniers mètres d'un puits qui sont les plus productifs, 4) l'hypothèse que la composante verticale des écoulements convergeant vers le puits au niveau rabattu est négligeable (i.e. $K_{horizontal} >> K_{vertical}$), 5) le fait que l'épaisseur saturée totale de l'aquifère régional de roc fracturé est indéfinie, l'intervalle le plus probable de productivité d'un puits au roc est défini par $b \approx$ min(profondeur totale du forage - profondeur du toit du roc, b_{max}) où b_{max} = 5 m est un seuil établi par jugement professionnel en considérant les points précédents. Ainsi, le paramètre *b*, tel que défini précédemment, est spécifique à chaque puits et correspond désormais à la longueur de l'intervalle productif d'un puits au roc.

4.1.1.3 Estimation de la conductivité hydraulique (*K*)

La BDPH contient peu de données « directes » de *T* ou *K* pour l'aquifère rocheux (environ une centaine provenant d'une quarantaine d'essais hydrauliques avec estimation de *T* ou *K*), alors que les données de *CS* sont très abondantes. La *CS* peut être approximée dans plus de 19 000 puits à partir du débit de pompage, du niveau statique et du niveau dynamique notés dans la BD. Ce sont donc les estimations indirectes de *K*, via la transformation de la *CS*, qui ont été

retenues comme variable d'analyse principale des propriétés hydrauliques. La transformation de la capacité spécifique en transmissivité, puis en conductivité hydraulique, a été faite via la formule suivante (Cooper et Jacob, 1946; Theis et al., 1963):

$$T = \frac{CS}{4\pi} ln\left(\frac{2.25Tt_p}{r_w{}^2 S}\right) = K \cdot b \qquad 4.1$$

Les champs auxiliaires requis sont : la durée du pompage (t_p ; en s), le rayon du puits (r_w ; en m), le coefficient d'emmagasinement (S ; sans unité) et l'épaisseur saturée effective (b ; en m). Les deux premiers champs (t_p et r_w) sont directement disponibles dans la BDPH, tandis que S et b doivent être générés à partir d'autres champs. Pour approximer S, une valeur typique est associée à chaque condition de confinement locale de l'aquifère (en condition libre, $S \sim 1 \times 10^{-2}$; en condition semi-captive, $S \sim 5 \times 10^{-3}$; en condition captive, $S \sim 5 \times 10^{-5}$). L'estimation de b a été décrite précédemment (section 4.1.1.2)

La transformation réalisée à l'aide de l'équation 4.1 est exécutée par lots (« batch »). Pour chaque objet, la valeur de T est d'abord calculée par une méthode itérative (méthode de Newton-Rhapson modifiée). La valeur de K est ensuite calculée à l'aide de la relation $K \approx T / b$. Dans quelques cas particuliers (moins de 100 objets), aucune solution n'a été trouvée à l'équation 4.1 pour T; les objets concernés ont alors été éliminés (voir tableau 4.1).

De façon générale, lorsque le champ analysé et les champs auxiliaires (incluant la profondeur totale du forage, la profondeur du toit du roc, le diamètre du puits, la formation géologique environnante) sont remplis dans la BDPH, un maximum de résultats visuels peuvent être générés, dont: 1) des histogrammes montrant l'effet des différents filtres sur la distribution de la variable analysée ; 2) un diagramme de boîtes à moustache (« box plot ») résumant les positions statistiques de la variable analysée pour chaque formation géologique suffisamment représentée ; 3) une évaluation de la dépendance de la variable analysée par rapport à la profondeur et, conjointement, un calcul de la densité d'occurrence des données selon la profondeur, pouvant être faits pour chaque contexte hydrogéologique.

4.1.2 Résultats

La figure 4.1 présente les distributions statistiques des données de la BDPH avant et après l'application des filtres présentés au tableau 4.1, en fonction du logarithme en base 10 des valeurs de conductivités hydrauliques ($\log_{10} K$). Dans la figure 4.1.a, le vert clair représente toutes les données respectant les critères essentiels à la transformation $T(CS)$, soient celui d'être un puits au roc et enfin celui d'avoir un diamètre réaliste (de 7,6 à 91,4 cm, soit 3 à 36 po) (n ≈ 18 000 objets). Le vert foncé représente quant à lui la distribution obtenue lorsqu'on ajoute des critères plus sévères pour $T(CS)$, soient des critères inspirés de Lavigne (2006) ($n_{sév.} \approx 7\,000$) et visant à éliminer les essais dans lesquels le niveau dynamique n'est pas quasi-stabilisé, une situation qui serait défavorable à l'estimation de T, puis K.

Dans la figure 4.1.b, le gris correspond à la distribution obtenue suite aux filtres standards (soit l'équivalent du vert clair dans la figure 4.1a), tandis que l'orange et le vert montrent l'effet qu'ont des filtres plus sévères « de Theis / Jacob » qui concernent les essais hydrauliques selon quatre critères: 1) petite valeur du u de Theis; 2) quasi-stabilisation du rabattement lors de la mesure du niveau dynamique; 3) rabattement suffisant pour être observable à distance du puits; 4) non assèchement du puits. L'histogramme orange montre l'effet de la combinaison des critères 1) et 3), tandis que l'histogramme vert clair montre l'effet de la combinaison des critères 1), 3) et 4), qui est l'option retenue pour l'analyse présentée dans cette section. Le critère 2) n'est pas utilisé, puisqu'il élimine principalement les puits peu productifs et induit, par conséquent, un biais important dans la distribution statistique du $\log_{10}$ de K.

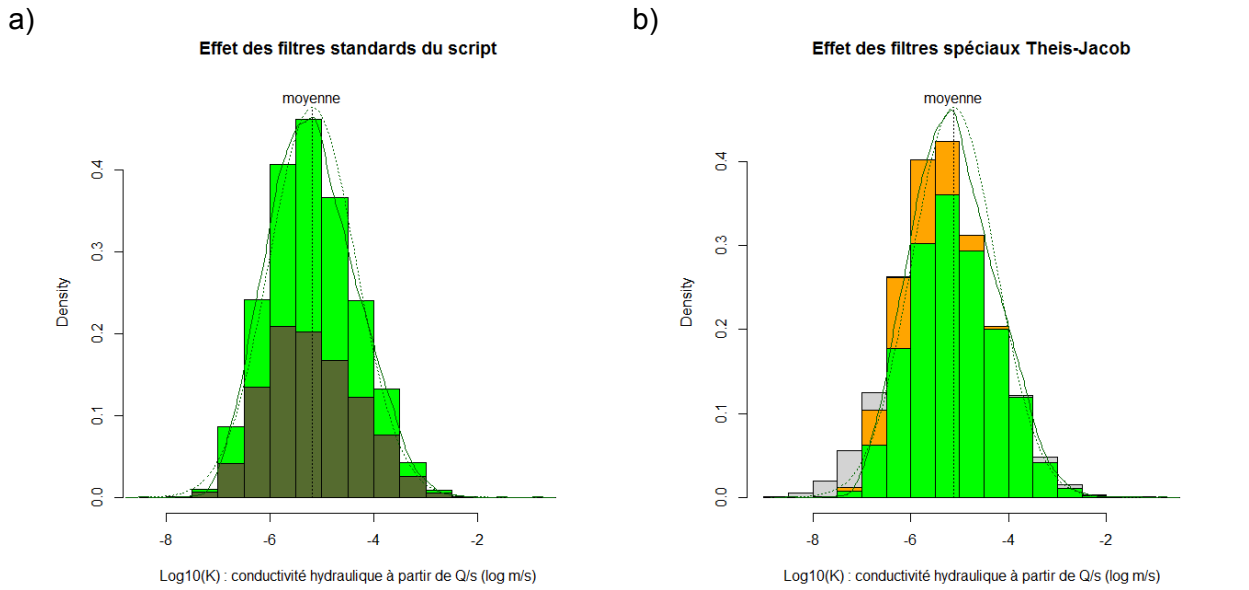


Figure 4.1 : Effet des filtres appliqués à la BDPH sur la distribution statistique du $\log_{10}$ de *K*. Plusieurs histogrammes se recouvrent (sans empilement) et chaque bâtonnet représente une densité de probabilité.

Conséquemment, la distribution statistique résultante est l'histogramme en vert clair de la figure 4.1.b, qui, après l'application de filtres, inclut environ 14 000 objets. Il est à noter, qu'une part importante des objets est filtrée parce que certaines variables n'y sont tout simplement pas disponibles. De plus, on voit que l'application d'un filtre peut modifier la forme de la distribution du $\log_{10}$ de *K* : à partir de la figure 4.1.b par exemple, on comprend qu'après les filtres plus sévères, la distribution résultante (vert clair) contient, toutes proportions gardées, moins de valeurs faibles qu'avant application de ces filtres (gris ou orange).

La figure 4.2 ci-après présente la distribution statistique résultante du $\log_{10}$ des valeurs de *K* à l'aide de boîtes à moustache (« box plot »). Dans cette figure, les valeurs sont regroupées d'abord par unité géologique (formation ou groupe), puis par contexte hydrogéologique (à gauche). Le nombre de données utilisées pour chaque unité géologique est indiqué à droite. Il est à noter que les Appalaches regroupent ici les zones interne et externe, que la Plate-forme du Saint-Laurent inclut les parties nord et sud, et que les unités géologiques ayant moins de 4 valeurs disponibles pour *K* ne sont pas incluses dans le diagramme. Les couleurs attribuées aux boîtes du diagramme sont basées sur la position de leur médiane relativement aux quartiles 1 et 3 (illustrés par des lignes verticales grises pointillées) de l'ensemble des médianes du diagramme. La médiane est « plus faible » (boîte rouge) si elle est inférieure au premier quartile, « plus élevée » (boîte verte) si elle est supérieure au troisième quartile, ou « intermédiaire » (boîte jaune) sinon. La médiane ainsi que les quartiles 1 et 3 (qui correspondent aux 25^{e} et 75^{e} percentiles) sont représentés respectivement par le trait noir et par les limites latérales de chaque boîte de couleur. L'étendue des valeurs non aberrantes (à une distance de moins de 1.5 fois l'écart interquartile (Q_3-Q_1) de part et d'autre de la boîte) est représentée par la moustache accompagnant chaque boîte. Les valeurs aberrantes sont représentées par des points gris (au-delà des moustaches). Ainsi, lorsqu'aucun point gris n'est visible au-delà d'une extrémité de moustache, c'est que cette dernière représente le vrai minimum ou maximum des valeurs pour l'unité géologique en question. Les valeurs du $\log_{10}$ de *K* apparaissent plus élevées pour les unités géologiques de la Plate-forme du Saint-Laurent que pour celles des Appalaches ou des collines Montérégiennes. Interprété seul, ce constat suggérerait qu'il existe des différences réelles et significatives de *K* d'un contexte hydrogéologique à un autre. Cependant, la

confrontation des figures 4.2 et 4.3 révèle que la variabilité de *K* entre les unités géologiques serait en fait le reflet de la variabilité de ce paramètre en fonction de la profondeur (*K*(*z*)). Malgré l'influence de la profondeur sur la distribution statistique de K, cette dernière est représentée au livrable 21. Ce livrable a été préparé en attribuant aux différentes formations géologiques les valeurs médianes de K présentées à la figure 4.2. Les points de contrôle (i.e. objets jugés valides) utilisés pour générer la distribution statistique sont également présentés sur ce livrable.

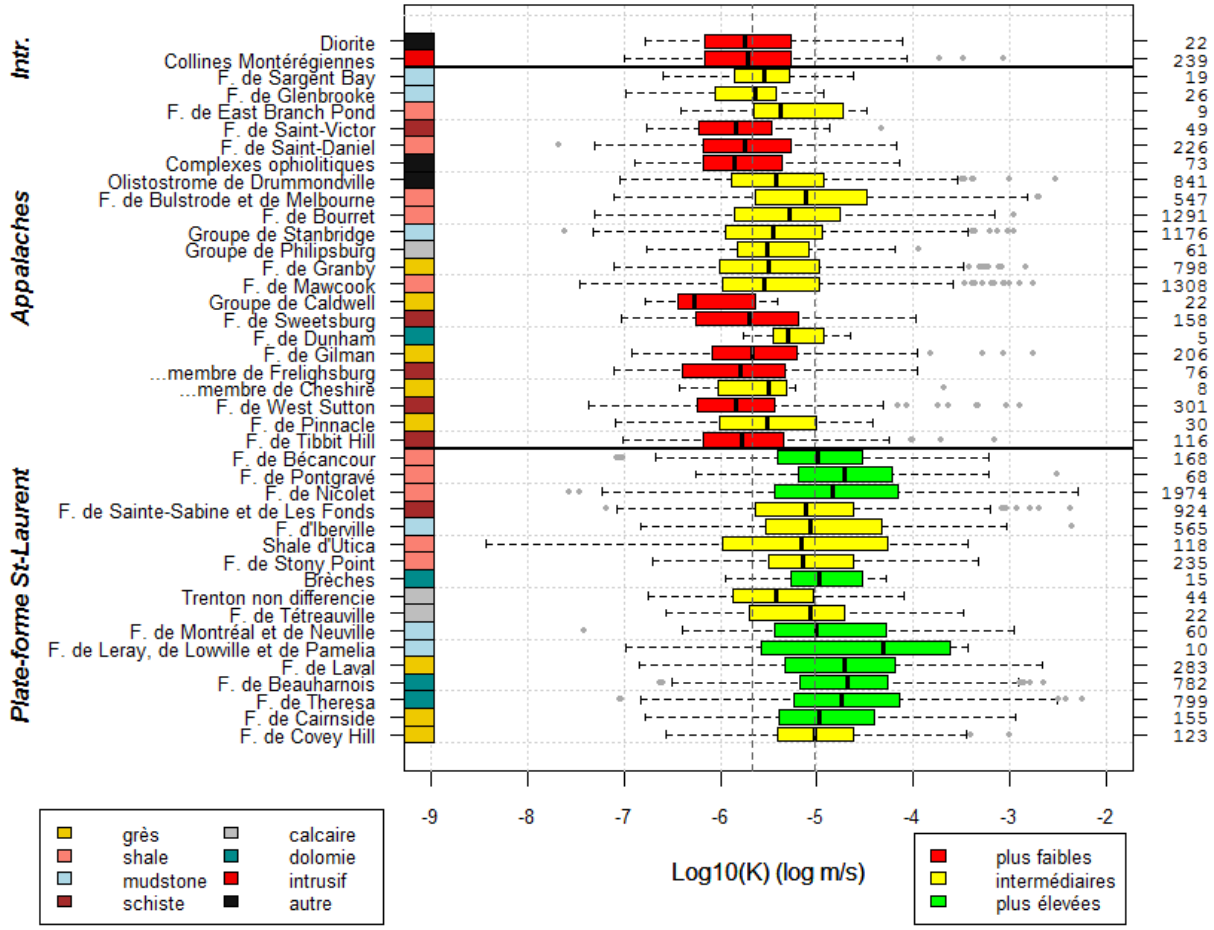


Figure 4.2 : Diagramme de boîtes à moustache (box plot) résumant les positions statistiques du logarithme de la conductivité hydraulique ($\log_{10}$(K)) pour les formations géologiques de la Montérégie Est

En effet, on constate, par la figure 4.3, que les gammes de profondeur dans le roc des puits (*z*) sont très distinctes entre les Appalaches et les Montérégiennes, d'un côté, et la Plate-forme du Saint-Laurent, d'un autre côté, à quelques exceptions près (i.e. formations de Bulstrode et de Melbourne dans les Appalaches, formation de Trenton non différenciée dans la Plate-forme). Le tableau 4.2 ci-dessous synthétise, pour chacun des contextes hydrogéologiques, les tendances centrales de *K* et de la profondeur des puits.

La figure 4.4 illustre mieux la forte corrélation négative liant la médiane du $\log_{10}(K)$ et la médiane de *z* (R^2 = 0.70) Les valeurs utilisées pour générer ce nuage de points sont issues des statistiques produites pour les diagrammes de boîtes à moustache. On y voit, directement cette fois, le lien qui unit les médianes du $\log_{10}$ *K* aux médianes de la profondeur dans le roc. À titre informatif, lorsque le même exercice est répété avec les médianes du $\log_{10}$ *K* et de *z* des

différents contextes hydrogéologiques (extraites du Tableau 4.2), la corrélation évaluée est plus forte encore (R^2 = 0.90).

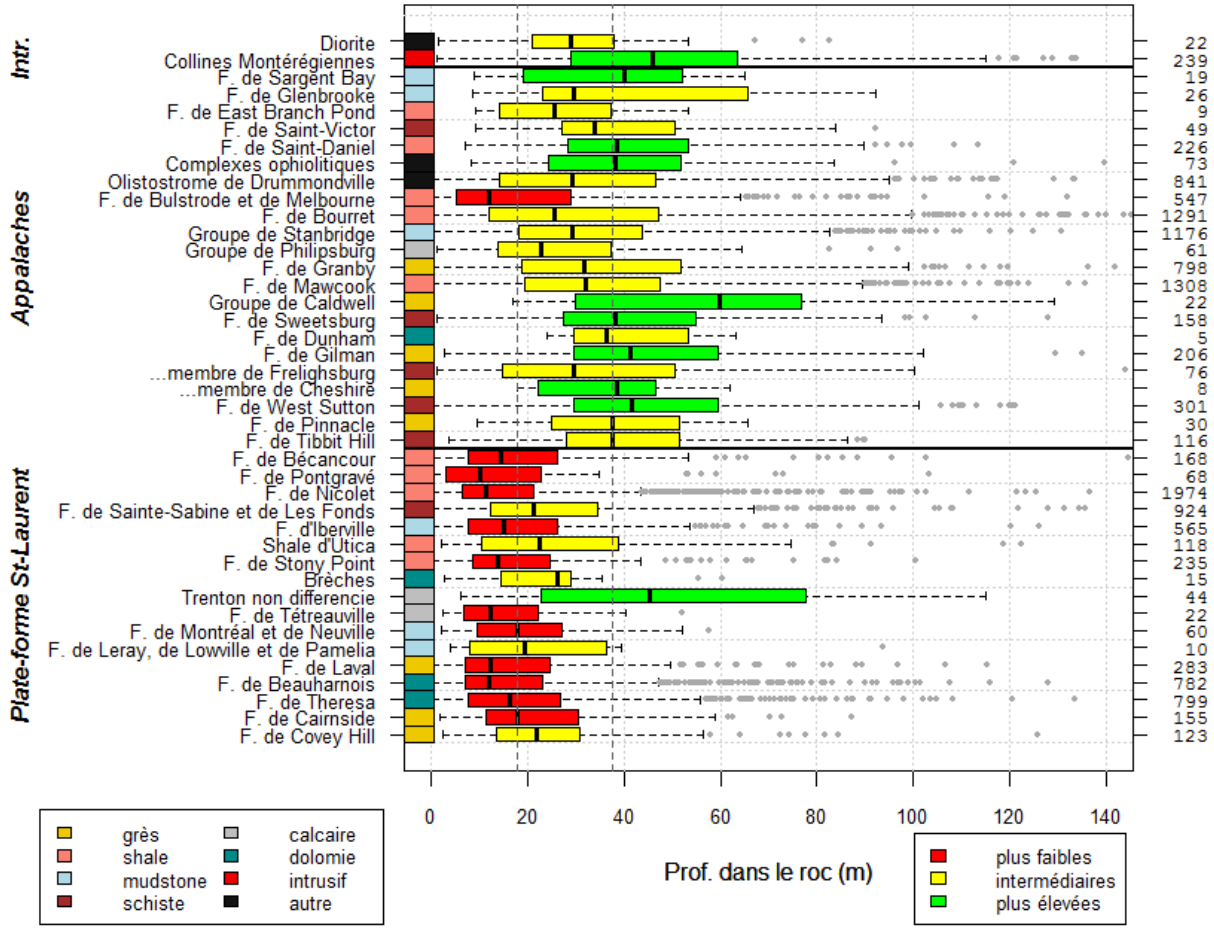


Figure 4.3 : Diagrammes de boîtes à moustache (box plot) résumant les positions statistiques de la profondeur sous la surface du roc pour les formations géologiques de la Montérégie Est

Tableau 4.2 : Tableau synthèse des statistiques par contexte hydrogéologique

Contexte	Médiane du $\log_{10}$ de *K* (K en m/s)	Prof. dans le roc (médiane) (en m)	Prof. du toit du roc (médiane) (en m)	Prof. totale du forage (médiane) (en m)	Nombre d'objets disponibles
Plate-forme du St-L. (N)	-5.14	16.5	17.7	36.6	1 289
Plate-forme du St-L. (S)	-4.82	13.7	9.8	25.9	5 028
Appalaches externes	-5.41	28	6	34.8	6 070
Appalaches internes	-5.77	39.1	4.6	46.3	1 336
Montérégiennes	-5.71	45.8	4.5	53.4	236
Ensemble	-5.22	22.3	7.6	32.0	13 959

En complément, la figure 4.5 synthétise plusieurs informations d'intérêt. Tout d'abord, sur la figure 4.5a, tous les points *K*(*z*) sont affichés en couleurs pâles calquées sur la palette de la légende. Ensuite, les médianes calculées à intervalles de profondeur réguliers (5 m) sont représentées par des carrés de couleurs correspondant aux contextes hydrogéologiques.

L'intérieur des carrés n'est coloré que si le nombre de données présentes dans l'intervalle de calcul dépasse un seuil fixé arbitrairement ($n_i \geq 40$). Une courbe est définie à l'aide de la fonction non linéaire suivante développée pour $K(z)$ (Jiang et al., 2010) (voir section 4.1.3 pour détails) :

$$K(z) = K_0 \frac{\lambda}{\lambda_0}\left[\frac{1}{1+(z/z_c)} + \frac{(b_r/b_0)(z/z_c)}{1+(z/z_c)}\right]^3 \qquad 4.2$$

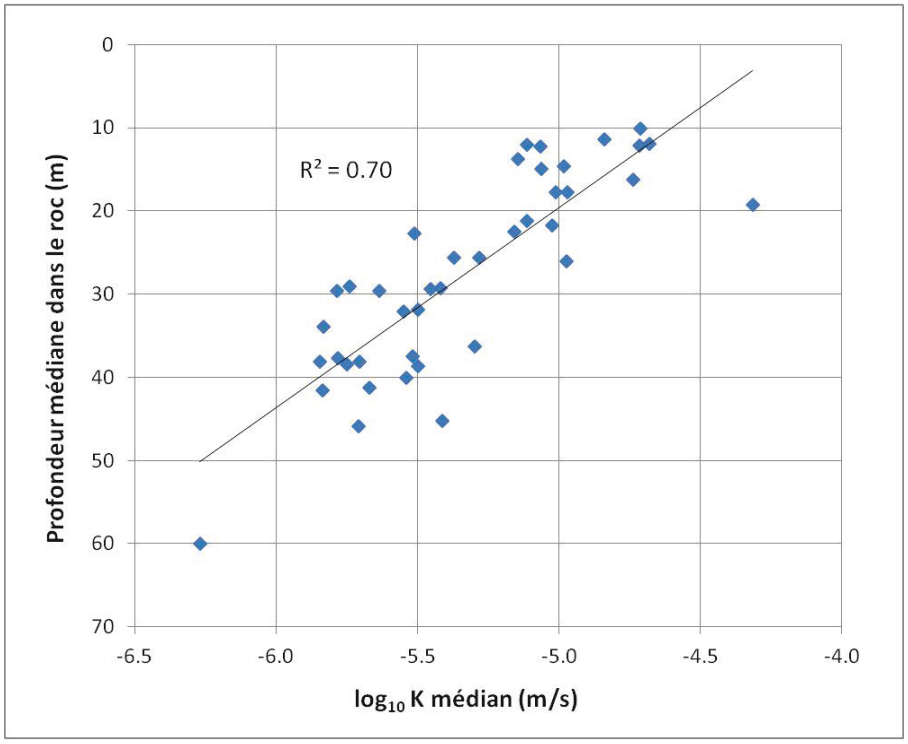


Figure 4.4 : Corrélation observée entre les médianes de la conductivité hydraulique ($\log_{10}$ K) et de la profondeur dans le roc (z) pour chaque unité géologique

Dans cette équation non linéaire, les indices 0 (zéro) réfèrent à la valeur qu'aurait la variable indicée à une profondeur nulle (z = 0 m), alors que z est la profondeur sous la surface du roc, λ / λ_0 est la densité relative de fractures à une profondeur z, z_c est une profondeur de référence et b_r/b_0 est une évaluation de l'ouverture effective des fractures. Cette formule semi-empirique combine plusieurs relations hydromécaniques adaptées au milieu fracturé et possède donc un fondement physique d'intérêt. Pour obtenir une solution particulière à cette équation, une fonction de densité relative de fractures par rapport à z, $\lambda/\lambda_0(z)$, est définie préalablement, tandis que l'optimisation des trois paramètres inconnus (K_0, z_c, b_r/b_0) est facilitée par l'attribution de valeurs initiales plausibles et par la substitution $V_0 = 10^{\log Vo}$. L'équation 4.2 est ajustée aux points-médianes, pour chaque contexte, puis pour l'ensemble de la zone d'étude. Par contre, dans ce dernier cas, il a été décidé d'ajuster la courbe du modèle non pas aux carrés noirs mais à l'ensemble des carrés représentatifs (colorés à l'intérieur), pour contrer la dominance relative des données de certains contextes qui varie avec la profondeur. Enfin, un « intervalle de confiance » (lignes pointillées) a été tracé, pour l'ensemble de la zone d'étude, à ± 1 écart-type autour de la moyenne des valeurs pour chaque intervalle de profondeur.

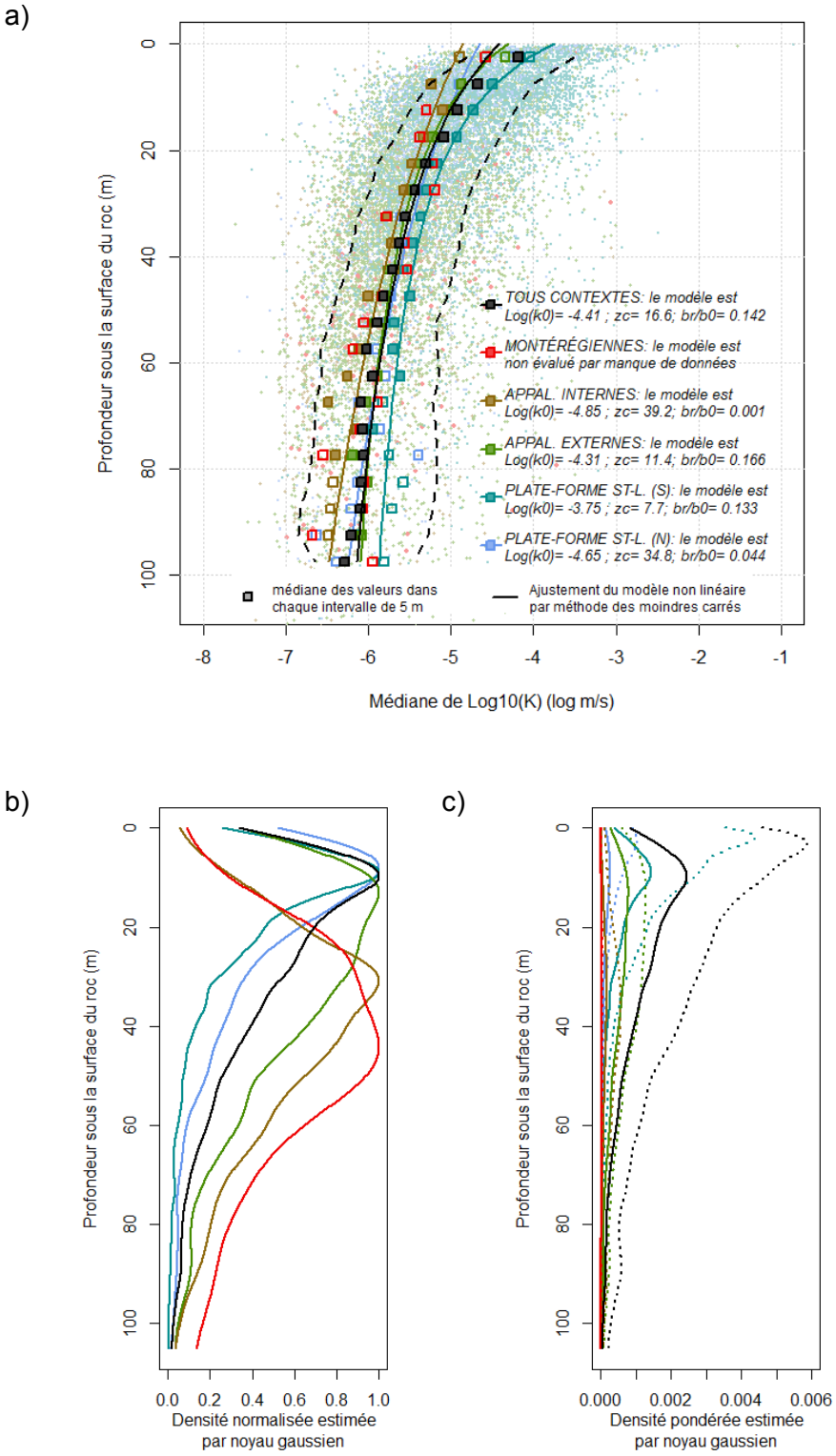


Figure 4.5 : a) Dépendance du logarithme de K à la profondeur dans le roc par contexte hydrogéologique ; b et c) Densité empirique relative des puits selon leur profondeur dans le roc (z) pour les différents contextes hydrogéologiques et pour l'ensemble de la zone à l'étude

Parallèlement, les figures 4.5b et 4.5c montrent les estimations de densité empirique de *z* pour les différents contextes géologiques, puis pour l'ensemble de la zone à l'étude. Dans la figure 4.5b, le maximum de chaque courbe est fixé à 1 par une multiplication simple de la densité, tandis que dans la figure 4.5c, c'est la surface sous chaque courbe qui est d'abord normalisée puis pondérée en fonction de la proportion de données que représente un contexte donné dans l'ensemble. La densité empirique initiale de z (avant que les filtres ne soient appliqués) y est également estimée et représentée par des courbes pointillées. La courbe en pointillé noir représente l'ensemble des données, ce qui correspond à la somme des surfaces sous les courbes de pointillés colorés des différents contextes. De la même façon, pour les données filtrées représentées par des traits pleins, on peut considérer la courbe noire comme un ensemble équivalant à la somme des surfaces sous les autres courbes de couleurs.

Étudiées conjointement, ces deux figures (4.5a puis 4.5b/c) apportent des renseignements sur la dépendance de *K* à la profondeur, sur sa dispersion et sur les fréquences des puits en fonction de leur profondeur dans le roc. L'intervalle de confiance proposé indique une dispersion d'amplitude semblable avec la profondeur, d'environ 1.5 ordre de grandeur. La figure 4.5b met en évidence les différences entre les «classes modales» de profondeurs pour chaque contexte hydrogéologique, différences qui expliqueraient l'essentiel de la variabilité interclasse de *K* (*K*(geol)). Enfin, la figure 4.5c rappelle les importances relatives de chaque contexte liées à la quantité de données disponibles. On y voit, entre autres, que le contexte de la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent est celui qui contient le plus de données, tandis que le contexte des collines Montérégiennes est celui qui en contient le moins. De plus, on constate que l'application des filtres a diminué la densité de puits plus fortement aux faibles profondeurs sous la surface du roc (*z* = [0, 20 m]).

4.1.3 Discussion des résultats

L'analyse de *K* montre que 1) la dépendance des valeurs de *K* à la profondeur dans le roc (*z*; m) domine toute dépendance spatiale horizontale, que 2) la distribution de la profondeur des puits dans le roc diffère d'un contexte hydrogéologique à un autre et que, par conséquent, 3) la différence entre les distributions statistiques de *K* pour différents contextes n'est probablement qu'apparente. En étudiant simultanément les figures 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5, on constate, en effet, que 1) la courbe de la conductivité hydraulique en fonction de la profondeur *K*(*z*) est très semblable pour les contextes hydrogéologiques (Figure 4.5a) et que, 2) les médianes de *K*(geol) sont généralement inversement corrélées aux tendances centrales de *z*(geol) (Figures 4.2 et 4.3, ou 4.4). Autrement dit, la variabilité interclasse de *K* traduit (à l'inverse) celle de *z*, que ce soit à l'échelle des contextes hydrogéologiques ou des formations géologiques.

A partir de ces informations, un modèle mathématique conceptuel à une dimension est proposé pour l'ensemble de la Montérégie Est afin de décrire la variabilité spatiale de *K* à l'échelle régionale par rapport à la profondeur. Tel qu'expliqué par Jiang et al. (2010), une tendance systématique à la décroissance de *K* avec la profondeur est couramment identifiable grâce à l'analyse statistique de jeux de données hydrauliques spatialisées, bien qu'une telle relation par rapport à la profondeur ne reproduise pas les valeurs observées individuellement à cause de l'inévitable hétérogénéité locale de *K*. La formule semi-empirique développée par Jiang et al. (2010) (équation 4.2) pour représenter la variation de la perméabilité (*k*) ou de la conductivité hydraulique (*K*) avec la profondeur sous la surface du roc (*z*) apparaît appropriée pour modéliser la relation observée entre *K* et *z* en Montérégie Est, puisqu'elle s'ajuste très bien aux résultats obtenus lors de l'analyse statistique de *K*(*z*). En ajustant l'équation 4.2 à l'ensemble des statistiques d'intervalle obtenues via l'analyse de *K*(*z*) pour tous les contextes hydrogéologiques, on obtient la fonction suivante, spécifique aux conditions de la Montérégie Est :

$$K(z) = 3.9 \cdot 10^{-5} \frac{\lambda}{\lambda_0} \left[\frac{1}{1 + (z/16.6)} + \frac{(0.14)(z/16.6)}{1 + (z/16.6)} \right]^3 \quad \text{où} \quad \frac{\lambda}{\lambda_0}(z) = 0.10 + 0.90 \cdot e^{-3 \cdot 10^{-3} z} \qquad 4.3$$

Ce modèle mathématique proposé pour décrire la variable hydraulique *K* en fonction de la profondeur sous la surface du roc, *K*(*z*), est une approximation de l'évolution de la médiane de *K* avec la profondeur (équation 4.3). Il permet donc de calculer la tendance centrale attendue, en principe, pour *K*(*z*) dans le système réel moyen. Utilisé seul, ce modèle permet une représentation déterministe et semi-homogène de l'hydraulique de l'aquifère régional de roc fracturé. Néanmoins, il demeure possible de créer, via des simulations stochastiques, un champ hétérogène de *K*(x, y, z) en utilisant davantage de mesures statistiques, tels la moyenne et l'écart-type, qui ont été évaluées aux différentes profondeurs. La définition déterministe *K*(*z*) a l'avantage d'être simple, mais comme la variabilité latérale de *K* (en *x* et *y*, à *z* fixé) y est totalement absente, *K*(*z*) n'est sans doute approprié que pour générer le champ « lissé » de *K*, c'est-à-dire à une échelle régionale. Enfin, malgré ces limites, l'utilisation du modèle *K*(*z*) pour estimer les plages de conductivité hydraulique est préférable à celle des statistiques de *K* en fonction des unités géologiques ou même des contextes, puisque la variabilité en fonction de la profondeur semble être nettement plus importante que la variabilité latérale, tel qu'expliqué plus haut. En effet, les tendances centrales de *K*, lorsqu'évaluées par secteur géographique plutôt que par intervalle de profondeur dans le roc, sont trop influencées par la distribution inégale des profondeurs des puits, que les secteurs soient définis par les formations géologiques ou par les contextes hydrogéologiques.

Par ailleurs, la représentativité des distributions statistiques évaluées à partir des données disponibles demeure incertaine. Bien qu'un biais existe certainement, son évaluation quantitative est difficile. Parmi les sources de biais supposées, la non déclaration ou la non compilation d'une part importante des puits jugés inintéressants (ex. : suite à des essais hydrogéologiques infructueux) est suspectée d'être à l'origine d'une surestimation systématique des tendances centrales (i.e. moyenne, médiane, classe modale) par rapport à la réalité. Cette problématique n'est pas propre à la région d'étude, mais la disponibilité du jeu de données hydrogéologiques traitées et validées de cette étude constitue une opportunité pour mieux comprendre les biais affectant les estimations des propriétés hydrauliques, en un premier temps, et les conséquences qu'ils peuvent avoir sur les calculs et les simulations impliquant des propriétés hydrauliques biaisées, en un second temps. Ces questions sur la représentativité et la conceptualisation des données hydrauliques provenant de bases de données régionales feront justement l'objet d'une publication scientifique (Laurencelle et al., en préparation).

En résumé, l'interprétation des données hydrauliques directes et indirectes doit être faite avec prudence, puisque ces propriétés hydrauliques estimées peuvent dépendre de plusieurs autres variables. Dans le cas présent, les données disponibles indiquent que la conductivité hydraulique de l'aquifère régional de roc fracturé dépend surtout de la profondeur, d'où le modèle mathématique proposé pour calculer la tendance de la variable *K* selon la profondeur via une équation de la forme *K*(*z*) (équations 4.2 et 4.3). Le livrable 21, qui illustre la distribution statistique de K en fonction des formations géologiques, présente donc, d'une part, un portrait caractérisé par une incertitude liée à la quantité et la fiabilité des données et, d'autre part, un portrait biaisé par l'influence de la profondeur dans le roc des puits disponibles. Malgré ces limites et en l'absence de données plus représentatives, ce livrable peut tout de même donner des indications qualitatives sur la faible variabilité régionale de K.

4.2 Piézométrie et écoulement

L'écoulement de l'eau souterraine dans un aquifère se fait des régions où la charge hydraulique est élevée vers les régions où les charges sont plus faibles. La charge hydraulique représente l'élévation du niveau d'eau mesuré dans un puits par rapport à un niveau de référence, qui est normalement le niveau moyen de la mer. Les cartes piézométriques sont une représentation en plan de la distribution des charges hydrauliques dans un aquifère. Ces cartes sont préparées en rapportant les points de mesure des niveaux d'eau pris dans les puits sur une carte, ce qui permet de définir la position de courbes d'égal niveau d'eau, appelées isopièzes.

Des détails sur la production des cartes piézométriques sont donnés dans les guides de cartographie hydrogéologique du MDDEFP (2008a et 2008b). Pour les projets PACES, le protocole détaillé utilisé pour la production de la carte piézométrique est présenté à l'annexe 3 du rapport. En Montérégie Est, les aquifères granulaires ont une extension limitée et ne sont pas d'envergure régionale. Il n'a donc pas été possible de produire une carte piézométrique pour les aquifères granulaires. Une carte piézométrique a été produite pour l'aquifère régional de roc fracturé, qui correspond au livrable 20 présenté à l'annexe 2. Pour ce faire, une sélection et validation des puits aménagés au roc et des données de niveaux d'eau leur étant associées a d'abord été faite. L'interpolation des niveaux d'eau a été faite par krigeage. Deux zones d'interpolation ont été définies, les zones ouest et est, séparées approximativement par la limite entre la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres) et la zone externe des Appalaches (Piedmont). Cette subdivision était nécessaire parce que la Plate-forme du Saint-Laurent est caractérisée par un faible relief et par une densité de points de contrôle de niveaux d'eau généralement faible (particulièrement dans la partie nord), alors que, dans le Piedmont et les Appalaches, le relief peut être très accidenté et la densité des points de contrôle est généralement plus élevée mais varie en fonction du relief (i.e. peu de points de contrôle sur les hauts topographiques). Dans cette dernière zone, le krigeage a utilisé une dérive externe basée sur la topographie afin d'assurer la cohérence entre les niveaux d'eau interpolés et la topographie, ce qui n'a pas été nécessaire pour la zone de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres).

Sur le livrable 20, on montre 12 plages d'élévation des niveaux d'eau, allant de moins de 12.5 m à plus de 600 m par rapport au niveau moyen de la mer (nmm). Cette carte piézométrique régionale donne une vue d'ensemble de la dynamique d'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux régional. La carte montre aussi les lignes de partage de l'eau souterraine qui définissent les limites des sous-bassins hydrogéologiques. Ces sous-bassins hydrogéologiques permettent de visualiser la zone contribuant à l'alimentation en eau souterraine des cours d'eau qui sont en contact avec l'aquifère de roc fracturé. Le livrable 28a, présenté à la section 4.4, donne des précisions quant à la nature des liens entre l'aquifère rocheux et les cours d'eau et indique les zones potentielles de résurgence de l'eau souterraine. Les données sur les niveaux d'eau ont aussi été exploitées pour caler le modèle numérique d'écoulement dont les résultats sont présentés à la section 6.4.

Au niveau régional, la carte piézométrique (livrable 20) montre que les conditions d'écoulement sont très distinctes dans les différents contextes hydrogéologiques de la Montérégie Est. Dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent, les faibles gradients hydrauliques horizontaux (i.e. les changements latéraux de niveau d'eau) indiquent que l'écoulement de l'eau souterraine y est généralement très faible. Au sud de ce contexte, des hauts piézométriques sont associés aux collines montérégiennes qui sont des zones de recharge préférentielle. Ces hauts piézométriques se prolongent vers le nord, ce qui indiquerait qu'un certain écoulement se ferait des collines montérégiennes vers le nord. Les bas niveaux piézométriques observés au niveau des cours d'eau de ce contexte indiqueraient qu'il y a un écoulement latéral de l'est vers l'ouest relativement lent à partir des hauts piézométriques avec résurgence diffuse dans les cours

d'eau. La vitesse de cet écoulement est faible car une épaisse couche de sédiments argileux sépare le roc des cours d'eau. La présence du patron d'écoulement lent du sud vers le nord à partir des collines montérégiennes est appuyée par la géochimie de l'eau souterraine qui indique que les concentrations augmentent généralement des Montérégiennes vers le nord et qu'on trouve à l'extrémité nord des eaux qui ont des compositions proches de celle de l'eau de la mer de Champlain (section 4.6). La présence d'eau saumâtre au nord des Montérégiennes indique que cet écoulement a été très limité depuis le retrait de la mer de Champlain. La faiblesse de cet écoulement est aussi relié au fait que la recharge à travers l'épaisse couche d'argile est très limitée (section 4.3), mais aussi au fait que l'eau provenant du Piedmont et des Appalaches à l'est serait interceptée par la rivière Yamaska ou ferait résurgence au front des Appalaches (Ligne de Logan) (voir le modèle conceptuel discuté à la section 4.7 pour plus de détails). Cet interception de l'eau provenant de l'est est indiqué par le changement des gradients hydrauliques horizontaux qui sont importants à l'ouest du Piedmont mais qui diminuent vers l'ouest par la suite. Le bas piézométrique associé à la rivière Yamaska indique que l'eau provenant de l'est ne dépasse par ce cours d'eau qui est localement en contact direct avec l'aquifère rocheux, tel qu'indiqué par la présence d'affleurements rocheux dans le lit ou les berges de ce cours d'eau (livrable 28a, section 4.4).

Dans le contexte hydrogéologique de la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent, on retrouve des crêtes et des creux piézométriques orientés nord-sud qui indiquent que l'écoulement est généralement orienté est-ouest, allant des zones de recharge vers la rivière Richelieu, principalement, mais aussi vers d'autres zones de résurgence. La recharge dans ce contexte est modérée mais généralement distribuée sur l'ensemble du contexte, sauf le long de la vallée du Richelieu où on retrouve une couverture argileuse peu perméable (livrable 28b, section 4.3). Il y a présence d'un faible haut piézométrique dans le secteur est (Saint-Alexandre/sud du mont Saint-Grégoire) qui correspondrait à une zone de recharge un peu plus importante à partir de laquelle l'écoulement se fait principalement vers l'est et vers l'ouest.

Tel que mentionné précédemment, le contexte des collines montérégiennes représente une zone de recharge préférentielle de l'aquifère régional de roc fracturé. À partir de ces hauts piézométriques, l'écoulement est à peu près radial, ce qui est plus facilement observable pour les Montérégiennes situées dans la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres), mais qui se voit aussi pour les Montérégiennes présentes dans les Appalaches.

Dans le contexte de la zone externe des Appalaches (Piedmont), on peut distinguer des conditions légèrement différentes au nord et au sud des Montérégiennes. Au nord, il y a des zones de recharge préférentielle à l'est et à l'ouest de la vallée de la rivière Noire sur les hauts topographiques (livrable 28b, section 4.3) et l'écoulement se fait principalement de ces secteurs où le niveau piézométrique est élevé vers la rivière Noire ou vers la rivière Yamaska à l'ouest. Au sud des Montérégiennes, le réseau hydrographique diffère légèrement et l'orientation des principaux cours d'eau suit plus ou moins un axe est-ouest comparativement à la rivière Noire qui coule plus ou moins selon un axe nord-sud. Bien qu'on trouve aussi un écoulement des hauts topographiques vers les cours d'eau dans ce secteur, une partie du sud du Piedmont représenterait aussi une zone de résurgence de l'eau provenant des Appalaches. La géochimie de l'eau souterraine supporte cette interprétation des conditions d'écoulement (voir section 4.6).

Enfin, dans le contexte de la zone interne des Appalaches (Hautes-terres), les conditions d'écoulement sont surtout contrôlées par la topographie locale, allant des hauts topographiques (zones de recharge) vers les vallées (zones de résurgence). Tel que mentionné précédemment, la géochimie de l'eau souterraine laisse aussi présumer qu'il y aurait un écoulement régional plus profond et à plus long temps de résidence, allant des hauteurs appalachiennes et émergeant dans le Piedmont où on trouve un type d'eau appalachien plus « évolué » (section 4.6). Beaudry (2013) montre aussi que l'âge ^{14}C de l'eau souterraine échantillonnée dans les

Appalaches semble supporter l'existence d'écoulements intermédiaires et profonds qui impliquent de longs temps de résidence.

4.3 Recharge et bilan hydrologique

Comme le mentionne un des guides sur la cartographie hydrogéologique du MDDEFP (2008a), l'évaluation de la recharge est une partie importante des études hydrogéologiques visant à évaluer les ressources en eau souterraine, puisque les débits qui peuvent être exploités de façon durable dépendent grandement du renouvellement annuel de l'eau souterraine par la recharge. Cependant, l'estimation de la quantité d'eau qui s'infiltre annuellement pour recharger les aquifères est un des paramètres hydrogéologiques les plus difficiles à évaluer. Cette difficulté provient du fait que plusieurs facteurs influencent la recharge et que ceux-ci sont aussi difficiles à estimer. Généralement, plusieurs méthodes indirectes sont utilisées pour préciser la plage de valeur de la recharge. Scanlon et al. (2002) précisent les méthodes qui sont applicables pour estimer la recharge en fonction des conditions rencontrées dans un système aquifère. Bien que l'usage de diverses méthodes soit pertinent, la grande majorité de ces méthodes ne permettent pas de définir la distribution spatiale de la recharge, qui permet notamment de simuler numériquement l'écoulement de l'eau souterraine dans un système aquifère régional. Jyrkama et al. (2002) ont suggéré d'utiliser le simulateur d'infiltration HELP (« Hydrologic Evaluation of Landfill Performance ») (Schroeder et al., 1994) pour obtenir la distribution spatiale de la recharge. Cette approche a été appliquée par Croteau et al. (2010) pour estimer la distribution spatiale de la recharge dans le bassin versant de la rivière Châteauguay, en calant les résultats de HELP avec une comparaison des débits de base d'un sous-bassin versant. Ces résultats ont permis la modélisation numérique de l'écoulement dans un système aquifère rocheux et son application à l'évaluation des débits exploitables (Lavigne et al., 2010a et 2010b). Cette approche a aussi été utilisée par Vigneault et al. (2007) à l'Île-du-Prince-Édouard pour évaluer l'effet des changements climatiques sur la recharge.

Pour le projet en Montérégie Est, puisqu'une des activités prévues était la modélisation numérique du système d'écoulement régional, la recharge a initialement été estimée à l'aide de HELP. Les résultats obtenus de HELP ont servi à la production du livrable 28b montrant la distribution spatiale de la recharge dans l'aquifère rocheux régional. Bien que la présente section se concentre sur la description de l'approche et des résultats obtenus avec HELP, d'autres travaux ont aussi été consacrés à l'estimation des processus de recharge en Montérégie Est. La section 6.1 documente notamment les résultats de la modélisation hydrologique réalisée par l'IRDA, qui a permise, entre autre, d'évaluer la recharge distribuée spatialement à l'aide du modèle SWAT (« Soil Water Assessment Tool ») (Arnold et al., 2005). D'autres travaux visant à évaluer la recharge ont aussi été réalisés dans le cadre du projet et la section 6.3 documente les résultats initiaux obtenus à partir de l'interprétation d'hydrogrammes de puits.

Le simulateur d'infiltration HELP a une base physique et permet d'utiliser des données climatiques réelles ainsi que des propriétés physiques des matériaux. Dans sa version originale, HELP ne fournit des résultats que pour une cellule représentant une séquence de matériaux. Cependant, les travaux réalisés par Croteau et al. (2010) ont permis de développer des programmes de pré-traitement et de post-traitement permettant de générer des résultats pour plusieurs cellules de manière semi-automatique. Ces programmes rendent pratique l'application de HELP à l'estimation de la distribution spatiale (mais aussi temporelle) de la recharge dans un système aquifère régional. HELP fait l'estimation quotidienne des paramètres du bilan hydrologique selon l'équation générale suivante :

$$\text{Recharge} = \text{Précipitation} - \text{Ruissellement} - \text{Évapotranspiration} \pm \text{Emmagasinement} \qquad 4.4$$

Dans HELP, le paramètre du ruissellement de l'équation 4.4 inclut le ruissellement de surface ainsi que le ruissellement de sous-surface (aussi désigné par « drainage latéral » dans HELP).

4.3.1 Données utilisées

Plusieurs données sont nécessaires pour l'utilisation de HELP, dont certaines ne sont pas toujours disponibles en quantité ou en qualité suffisante (ex. : séries temporelles des données discontinues ou avec plusieurs données manquantes, couverture spatiale insuffisante des stations météorologiques, …) ou sont inexistantes. Par conséquent, certains jeux de données (ex. : évapotranspiration et rayonnement solaire) ont été générés par HELP à partir de données complémentaires disponibles pour l'ensemble du territoire l'étude. Pour les fins de simulation de la recharge à l'échelle régionale, la zone d'étude a été subdivisée en cellules de 250x250 m. Les données nécessaires à l'utilisation de HELP ont été assemblées dans une base de données à l'aide d'un SIG (système d'information géographique) pour chacune de ces cellules et comprennent :

- précipitations totales et température moyenne quotidiennes (pour les 16 stations météorologiques actives – voir section 1.5.2.2)
- évapotranspiration quotidienne estimée à l'aide de :
    - latitude de la région d'étude
    - indice de surface foliaire maximal (CCRS, 2011)
    - profondeur racinaire et période de croissance de la végétation (dates de début et de fin) (« Land Cover/Plant growth database » dans Neitsch et al. (2002b))
    - normales climatiques pour la vitesse moyenne annuelle du vent et l'humidité relative saisonnière (Environnement Canada, 2011) (section 1.5.2.2)
- rayonnement solaire quotidien estimé à l'aide :
    - latitude de la région d'étude
    - données quotidiennes de précipitations totales et température moyenne
- caractéristiques des sols (unités pédologiques et quaternaires)
    - épaisseur des couches de sol considérées
    - propriétés physiques des couches de sol considérées incluant porosité, capacité au champ, point de flétrissement et conductivité hydraulique saturée
    - type de couche attribué aux couches de sol considérées dans HELP
- caractéristiques de la surface du sol
    - pente du sol (section 1.5.2)
    - utilisation du sol (section 1.5.3.1)
    - distance de drainage (ex. ; distance aux drains agricoles, fossés, réseaux d'égoûts pluviaux, cours d'eau naturels, …) (Croteau, 2006)

Les données de précipitations totales et de température moyenne ont été attribuées aux cellules à l'aide de polygones de Thiessen. Bien que cette méthode d'attribution puisse engendrer des discontinuités à la limite des polygones, HELP et les programmes de pré-traitement et post-traitement ne permettaient pas d'intégrer des données climatiques interpolées. Quant aux précipitations sous forme de neige, elles sont générées par HELP en fonction des données de température fournies et d'un seuil de gel fixé par l'utilisateur. Par ailleurs, bien que les données de rayonnement solaire aient été générées par HELP, elles ont pu être validées en partie à l'aide de données existantes disponibles pour 3 stations d'Environnement Canada (Frelighsburg, L'Acadie et Varennes) pour la période 1995-2010 (Environnement Canada, 2012).

Les données d'utilisation du sol dérivées du livrable 7 préparé par l'IRDA ont été utilisées pour dériver le coefficient de ruissellement à partir de la méthode du numéro de courbe (i.e. « curve number ») du Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1972) tel qu'expliqué à la section 6.1.1).

Les caractéristiques des sols pour les unités pédologiques (i.e. épaisseur et propriétés physiques) ont été obtenues de l'IRDA qui en a réalisé la compilation dans le cadre des travaux de modélisation hydrologiques avec SWAT (section 6.1.3.3) réalisés parallèlement à ceux avec HELP. Les caractéristiques des sols pour les unités quaternaires ont quant à elles été obtenues en partie des livrables 12 et 15 pour la distribution et les épaisseurs. Pour les propriétés physiques des unités quaternaires, les différentes sources consultées sont résumées au tableau 4.3. Considérant le caractère régional de l'étude, les propriétés attribuées à ces unités sont des valeurs moyennes qui ne sont évidemment pas représentatives de l'hétérogénéité locale des sédiments à l'intérieur de la région à l'étude mais qui permettent de simuler les tendances régionales. Pour le roc, l'utilisation d'une conductivité hydraulique pour un milieu poreux équivalent peut engendrer une surestimation de l'infiltration au roc et sous-estimer le drainage latéral. Par conséquent, la conductivité hydraulique du roc indiquée au tableau 4.3 a été réduite par rapport aux valeurs citées dans la littérature afin 1) d'obtenir des résultats plus représentatifs d'un aquifère rocheux hétérogène avec des fractures plus perméables que la matrice et 2) d'utiliser une valeur de conductivité hydraulique plus représentative de l'anisotropie observée (i.e. K_v est généralement plus faible que K_h).

Tableau 4.3 : Tableau synthèse des propriétés physiques des groupes de sédiments quaternaires considérés pour HELP

Groupe de sédiments quaternaires	Porosité	Capacité au champ	Point de flétrisse-ment	Conduct. hydraulique (m/s)	Référence
Séd. indifférenciés (1)	0.44	0.10	0.05	3.1×10^{-5}	(Croteau, 2006)
Séd. fins d'origine marine ou glacio-lacustre	0.45	0.42	0.33	4.0×10^{-10}	(Leroueil et al., 1983)
Séd. fins altérés d'origine marine ou glacio-lacustre	0.45	0.42	0.33	4.0×10^{-9}	(Lafleur, 1987; D'Astous, 1988)
Séd. remaniés d'origine glaciaire (till remanié)	0.46	0.36	0.2	1.3×10^{-4}	(Croteau, 2006)
Séd. d'origine glaciaire (till) (2)	0.46	0.36	0.2	1.4×10^{-8}	(Croteau, 2006; Hamel, 2002; Pontlevoy, 2004)
Roc	0.05	0.04	0.01	2.2×10^{-8}	(modifié de Croteau, 2006)

Note:

(1) : Les valeurs indiquées pour ce groupe correspondent à une moyenne pour différentes unités quaternaires

(2) : Les valeurs indiquées pour ce groupe correspondent à une moyenne estimée à partir des données disponibles

Les types de couches attribués aux couches de sol (unités pédologiques ou quaternaires) considérées dans HELP permettent à ce dernier de simuler l'infiltration de l'eau selon certaines conditions prédéfinies pour ces types. Ces derniers incluent : 1) couche avec percolation verticale, 2) couche avec percolation verticale et drainage latéral, 3) couche agissant comme barrière hydraulique. Le premier type permet un écoulement d'eau vertical principalement non saturé contrôlé par le drainage gravitaire et les propriétés physiques du sol. Il permet un flux vertical vers le haut (i.e. évapotranspiration) ou vers le bas (i.e. percolation). Le second type de couche permet le même type d'écoulement que le premier type en plus de permettre un

écoulement saturé latéral. Le troisième type de couche ne permet qu'un écoulement vertical saturé vers le bas où la percolation dépend de la charge hydraulique, de l'épaisseur de la couche de sol et de la conductivité hydraulique. Certaines règles contrôlent l'attribution des types de couches, notamment a) une couche de type 1 ne peut être surmontée d'une couche de type 2, b) une couche de type 3 ne peut être surmontée d'une autre couche de type 3, c) une couche de type 3 ne peut être la première couche d'une séquence de sol, d) lorsque la dernière couche de type 2 de la séquence ne repose pas sur une couche de type 3, toute les couches sous-jacentes à la dernière couche de type 2 sont traitées comme des couches de type 1.

La figure 4.6 donne un exemple tiré de Croteau et al. (2010) qui montre une séquence de matériaux dans laquelle l'infiltration est représentée, l'infiltration verticale de l'eau jusqu'à l'aquifère rocheux régional étant considéré être la recharge.

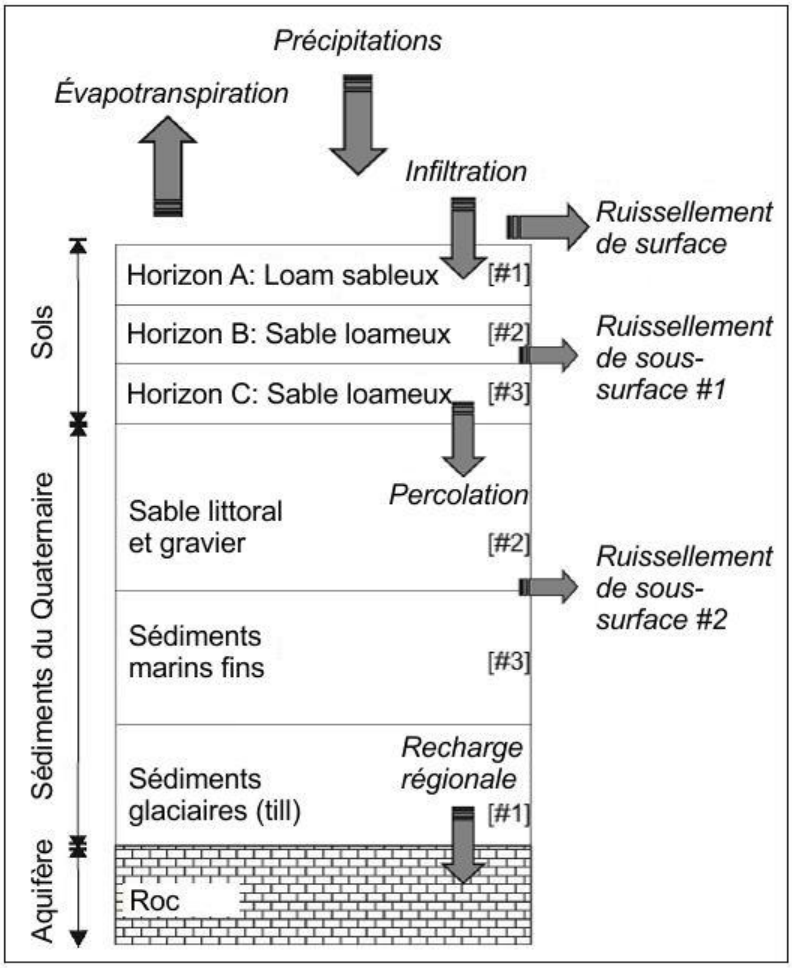


Figure 4.6 : Exemple de profil de matériaux utilisé pour estimer la recharge (modifié de Croteau et al., 2010)

4.3.2 Calage des résultats

Le calage des résultats de HELP a été réalisé de façon itérative en effectuant une vérification sommaire des résultats à l'aide des données hydrométriques disponibles (section 1.5.2.4) pour quatre bassins versants jugés représentatifs des conditions hydrogéologiques de la zone d'étude. Les quatre stations associées à ces bassins sont : station 030314 (rivière Yamaska Nord), station 030316 (Rivière David), station 030340 (rivière Yamaska Sud-Est) et station

030421 (rivière L'Acadie), La figure 4.7 présente un exemple de comparaison des résultats de HELP avec les données hydrométriques de la station 030340. Les valeurs de débits estimés, qui incluent le ruissellement de surface, le ruissellement de sous-surface (ou drainage latéral) et la recharge, simulent relativement bien les fluctuations des débits mesurés à la station pour la période commune (1979-2009) bien que les résultats de HELP aient tendance à surestimer les débits mesurés (surestimation moyenne de 11.5 %; coefficient de corrélation de 0.89). Les débits de base estimés par le CEHQ (Poirier, 2012) pour les stations considérées ont également été comparés aux apports d'eau souterraine estimés par HELP lorsque possible. Pour la station 030340 (figure 4.7), la même tendance que pour le débit total est observée, soit une légère surestimation du débit de base de référence (surestimation moyenne de 7.1 %; coefficient de corrélation de 0.67). Pour les autres stations considérées, la comparaison des débits mesurés et estimés montre également une surestimation des débits par HELP (surestimation moyenne de 24.4 %, 6.8 % et 6.2 % pour les stations 030314, 030316 et 030421 avec coefficients de corrélation respectifs de 0.85, 0.74 et 0.71). Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine des différences observées entre les débits mesurés et les résultats de HELP. Une des sources d'incertitude probable est associée à l'évaluation de l'évapotranspiration. Ce paramètre du bilan hydrologique, qui correspond généralement à plus de la moitié des précipitations totales, pourrait être sous-estimé par HELP dans certains contextes, générant ainsi des estimés de recharge plus importants (Ligget et al., 2010). Cette sous-estimation de l'évapotranspiration serait principalement attribuable à la méthode de calcul de l'évapotranspiration et à l'incertitude liée à la profondeur de la zone racinaire et pourrait être plus importante au cours des mois d'été ainsi que dans les zones à plus fort relief (ex. : bassin de la station 030314). Par ailleurs, une incertitude existe également quant à la proportion de recharge contribuant réellement au débit de base des cours d'eau des bassins versants sélectionnés et devant être considérée dans l'évaluation comparative. Bien que la recharge estimée ait été totalement incluse au débit pour les fins de comparaison aux données hydrométriques, une partie de cette recharge peut, en réalité, contribuer à l'écoulement d'eau souterraine profond sortant des bassins versants considérés au lieu de contribuer au débit de base des cours d'eau des bassins.

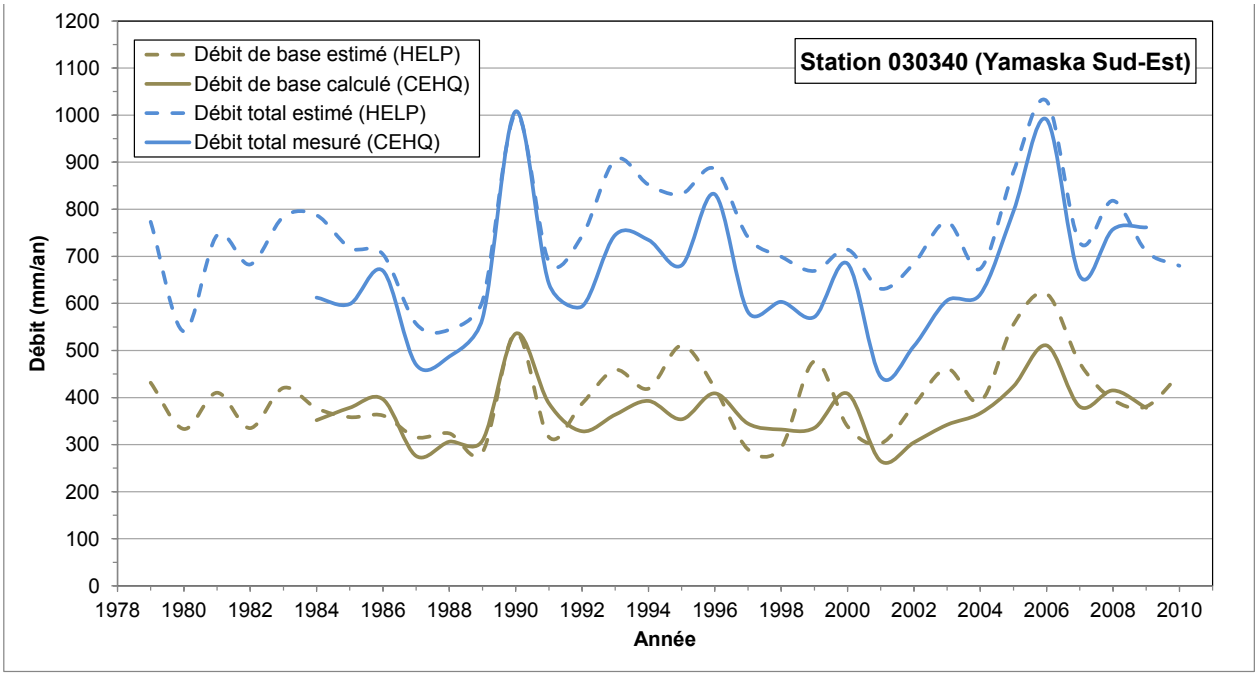


Figure 4.7 : Comparaison des résultats de HELP avec les données hydrométriques pour le bassin versant de la rivière Yamaska Sud-Est (station 030304)

4.3.3 Synthèse des résultats

Le tableau 4.4 résume les résultats du bilan hydrologique et de l'estimation de la recharge avec HELP pour chaque contexte hydrogéologique et pour l'ensemble de la Montérégie Est. Au niveau des précipitations, on constate une influence de la topographie et de l'altitude sur les précipitations, les valeurs les plus fortes étant obtenues dans les Appalaches alors que les plus faibles sont mesurées dans la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres). À l'inverse, l'effet topographique, qui est aussi lié à un effet de température, fait en sorte que la tendance est inversée au niveau de l'évapotranspiration. Les plus fortes pentes font en sorte que le ruissellement, tant de surface que de sous-surface, est plus important dans les Appalaches que dans la Plate-forme du Saint-Laurent. Au niveau de la recharge, des valeurs très faibles ont été estimées pour la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent, surtout à cause de la présence de matériaux argileux très peu perméables avec de fortes épaisseurs qui recouvrent presque tout le territoire de ce contexte. La recharge est plus importante dans la zone interne des Appalaches, suivies des Montérégiennes. La recharge est bonne mais tout de même modérée dans la zone externe des Appalaches (Piedmont) et dans la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent. Globalement, avec une recharge de l'ordre de 100 mm/an (soit environ 9 % des précipitations totales), le renouvellement de la ressource en eau souterraine est assez important en Montérégie Est, mais la répartition spatiale de cette recharge est relativement variable. Cet estimé est du même ordre de grandeur que la valeur moyenne de recahrge estimée dans le bassin de la rivière Châteauguay par Croteau (2006), soit 86 mm/an pour la période 1963-2001. La description de la répartition spatiale de la recharge sera discutée à la section 4.4 traitant des zones de recharge et de résurgence préférentielles. La section 5.2 traitant de l'usage des ressources en eau souterraine va comparer l'importance de l'utilisation par rapport au renouvellement de la ressource grâce à la recharge.

Tableau 4.4 : Bilan hydrologique et recharge moyenne obtenus de HELP par contexte hydrogéologique pour la période 1979-2010

Contexte hydrogéologique	Précipitations totales (mm/an)	Évapo-transpiration (mm/an)	Ruissell. de surface (mm/an)	Ruissell. de sous-surface (mm/an)	Emmaga-sinement (mm/an)	Recharge (mm/an)
Plate-forme nord	1046.9	562.8	249.8	213.4	6.3	13.8 (1.3%)
Plate-forme sud	1060.7	553.3	242.6	151.1	7.3	100.1 (9.4%)
Montérégiennes	1183.9	493.4	282.5	225.7	1.5	174.6 (15%)
Appalaches (zone externe)	1151.8	547.2	246.3	233.9	2.8	114.7 (10%)
Appalaches (zone interne)	1266.0	482.9	334.7	248.5	2.1	183.1 (15%)
Région d'étude	**1123.6**	**539.2**	**264.9**	**211.3**	**4.7**	**97.8 (8.7%)**

Les variations annuelles du bilan hydrologique et de la recharge estimées sont présentées au tableau 4.5 pour la période 1979-2010. Les valeurs estimées de recharge suivent généralement les fluctuations des précipitations totales et indiquent une légère tendance à la hausse pour la période considérée. Les valeurs varient de 76 à 110 mm/an (6.9 à 9.8 % des précipitations totales) avec un minimum observé vers la fin des années 1980 (période de sécheresse) et un maximum observé vers 2006.

Tableau 4.5 : Bilan hydrologique et recharge annuels obtenus de HELP pour la période 1979-2010 sur l'ensemble de la région d'étude

Année	Précipitations totales (mm/an)	Évapo-transpiration (mm/an)	Ruissell. de surface (mm/an)	Ruissell. de sous-surface (mm/an)	Emmaga-sinement (mm/an)	Recharge (mm/an) (%)
1979	1078.2	522.1	269.8	179	25.4	81.9 (7.6 %)
1980	971	546.1	176.3	160.9	10.5	77.1 (7.9 %)
1981	1187.5	589.9	262.8	216.4	28.4	90 (7.6 %)
1982	942.7	442.9	273	165	-24	85.8 (9.1 %)
1983	1332.8	516.8	342.8	271.9	109.4	91.9 (6.9 %)
1984	979	517.1	323.4	166.6	-113.2	85 (8.7 %)
1985	1063.8	483.1	279.9	172.1	41.4	87.2 (8.2 %)
1986	1168	574.7	292.7	202.2	1	97.4 (8.3 %)
1987	985.6	526.7	223.7	176.1	-26.8	86 (8.7 %)
1988	944.4	517.8	190	158.9	-3.6	81.3 (8.6 %)
1989	1005.5	501.6	253.6	139	35.5	75.9 (7.5 %)
1990	1306.5	546.5	369.4	234.3	63.1	93.1 (7.1 %)
1991	1015	517.7	326.6	161.2	-74.2	83.8 (8.3 %)
1992	1027.7	471.4	305	170.8	-14.1	94.5 (9.2 %)
1993	1261.5	549.4	383.3	201.7	28.1	99 (7.8 %)
1994	1142.5	549.1	348.8	175.3	-22.7	91.9 (8 %)
1995	1175	534.8	252.8	228.8	63.8	94.8 (8.1 %)
1996	1204	520.7	404.4	203.3	-17.5	93.2 (7.7 %)
1997	1099.2	473.9	376.3	164.6	-4.1	88.5 (8.1 %)
1998	1033.3	574.5	332.9	110.1	-61.9	77.8 (7.5 %)
1999	1080.4	533.8	190.1	211.4	44.4	100.6 (9.3 %)
2000	1235.7	556.7	329.1	186.1	74.6	89.1 (7.2 %)
2001	938.3	515	291.7	133.5	-88.8	86.9 (9.3 %)
2002	1084.2	543	250	187.5	2.2	101.5 (9.4 %)
2003	1268.9	458	284.5	261.1	168.7	96.6 (7.6 %)
2004	979.1	549.2	275.8	184.6	-126.5	96.1 (9.8 %)
2005	1313.3	545.9	327.8	301.7	35.7	102.2 (7.8 %)
2006	1408.5	593.8	380.7	346.4	-22.5	110.1 (7.8 %)
2007	1172.8	533.5	223.9	249.8	57.2	108.4 (9.2 %)
2008	1205.5	528.3	390.6	206	-20.1	100.8 (8.4 %)
2009	1135.9	570.2	296.1	208	-33.4	95.1 (8.4 %)
2010	1209.3	609.2	224.2	253.8	14.4	107.7 (8.9 %)
Moyenne	**1123.6**	**539.2**	**264.9**	**211.3**	**4.7**	**97.8 (8.7%)**
Min.-Max.	**938 - 1409**	**443 - 609**	**176 - 404**	**110 - 346**	**-127 - 169**	**76 – 110**
Écart-type	**126.9**	**37.8**	**60.9**	**49**	**60.2**	**8.8**

4.3.4 Analyse comparative des résultats obtenus avec les apports verticaux

Tel que mentionné à la section 1.5.2.2, les données d'apports verticaux ont été obtenues en supplément aux données climatiques. Ces données d'apports verticaux, correspondant aux quantités d'eau disponibles pour infiltration provenant de la pluie et de la fonte des neiges, ont

été obtenues grâce à un modèle de fonte de neige différent du simulateur intégré à HELP et calées avec les données de neige au sol et de précipitations sous forme de pluie. Par conséquent, les apports verticaux constituent un intrant d'intérêt pour l'évaluation de la recharge à l'échelle régionale. Toutefois, compte tenu que les données d'apports verticaux validés n'ont été rendues disponibles qu'à la fin 2012, leur utilisation s'est limitée à une analyse comparative pour un sous–bassin versant de la région (bassin de la rivière aux Brochets – station 030420).

Pour cette comparaison, les données de précipitations totales et de température des stations actives considérées pour l'évaluation de la recharge avec HELP ont été remplacées par les données d'apports verticaux et de températures interpolées sur une grille de 0.1 x 0.1 degré. Les autres intrants de HELP, de même que la période considérée (1979-2010) sont restés les mêmes.

Les résultats des bilans hydrologiques annuels obtenus avec les apports verticaux et les précipitations totales sont présentés au tableau 4.6 tandis que les valeurs moyennes annuelles de recharge sont illustrées à la figure 4.8. Pour le bassin versant considéré, la recharge moyenne annuelle estimée à l'aide des apports verticaux s'est avérée du même ordre de grandeur que celle estimée à l'aide des précipitations totales, soit environ 160 mm/an, et ce malgré une différence d'environ 6 % entre les valeurs annuelles moyennes des apports verticaux (~ 1110 mm/an) et des précipitations totales (~ 1180 mm/an). Les variations annuelles pour la recharge sont également similairement. La principale différence dans le bilan hydrologique annuel se situe au niveau de l'évapotranspiration qui est plus élevée pour les apports verticaux que pour les précipitations totales. L'évapotranspiration plus élevée, combinée aux apports verticaux légèrement plus faibles, engendre un ruissellement de surface plus faible que pour les estimés obtenus avec les précipitations totales. Une des causes possibles de cette différence est l'utilisation de la température interpolée sur une grille de 0.1 x 0.1 degré plutôt que la température mesurée aux stations météorologiques actives considérées. Par ailleurs, bien que les valeurs de recharge annuelle estimées avec les deux jeux de données semblent similaires, les fluctuations intra-annuelles de la recharge sont variables. L'analyse des valeurs mensuelles générées par HELP révèle qu'au printemps et à l'automne, la recharge estimée avec les apports verticaux serait notamment plus importante que celle estimée avec les précipitations totales. A l'été, les valeurs estimées avec les apports verticaux seraient légèrement plus faibles. Par conséquent, pour la période et le bassin versant considérés, l'utilisation des apports verticaux dans HELP influencerait plutôt les variations interannuelles que valeurs annuelles moyennes.

Tableau 4.6 : Comparaison des valeurs estimées par HELP avec les apports verticaux et les précipitations totales pour le bassin de la rivière aux Brochets

Données utilisées	Précipitations totales (mm/an)	Évapo-transpiration (mm/an)	Ruissell. de surface (mm/an)	Ruissell. de sous-surface (mm/an)	Recharge (mm/an)
Précipitations totales	1179.1	535.8	267.1	211.7	162.4 (13.8 %)
Apports verticaux	1109.3	569.5	173.2	200.8	164.9 (14.9 %)

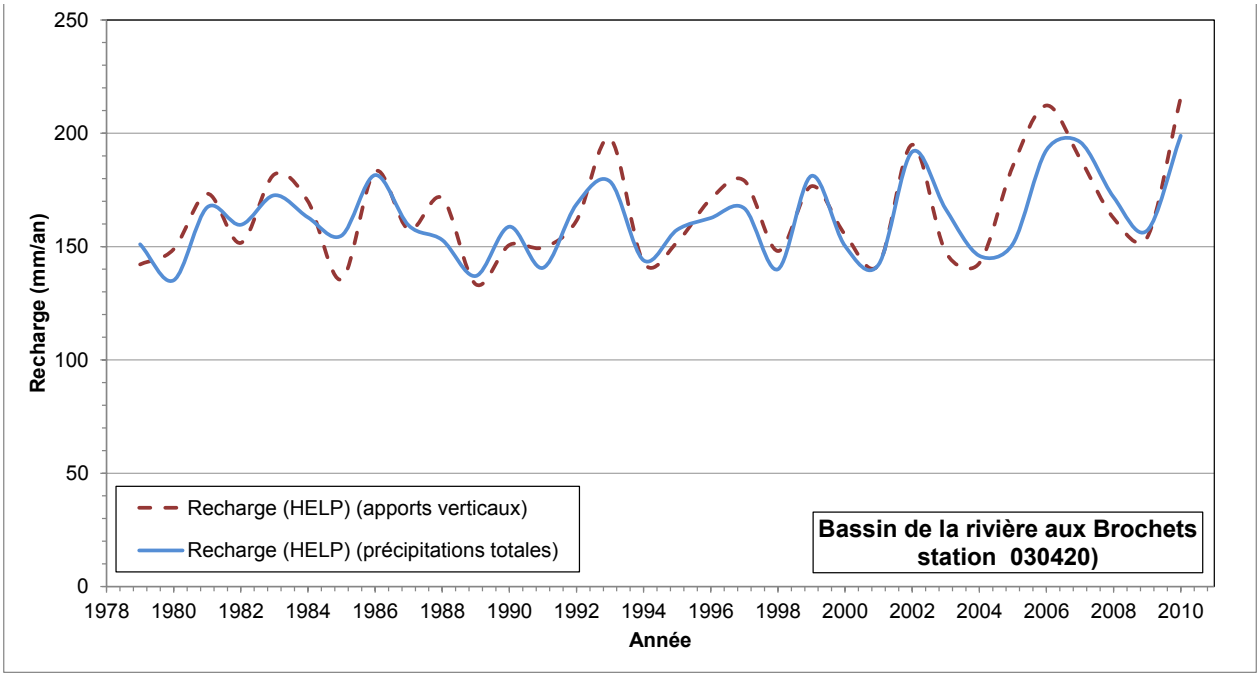


Figure 4.8 : Comparaison de la recharge estimée par HELP avec les apports verticaux et les précipitations totales pour le bassin de la rivière aux Brochets

4.4 Zones de recharge et de résurgence

La carte du livrable 28a reproduit la piézométrie (niveau d'eau) de l'aquifère rocheux régional (livrable 20, section 4.2) à laquelle sont superposés des polygones de couleur pour souligner les limites des zones préférentielles de recharge et de résurgence. Le type de lien entre l'aquifère rocheux régional et les cours d'eau est également indiqué sur la carte 28a par un trait de couleur différent selon la nature du lien. Pour définir les zones de recharge préférentielles, deux types de critères ont été utilisés : une recharge importante au-dessus d'un seuil sélectionné (250 mm/an) et la présence d'un dôme piézométrique d'une superficie supérieure à 1 km^2 (hors des zones captives). À l'inverse, les zones de résurgence préférentielles ont été identifiées à l'aide des dépressions de la surface piézométrique et des zones de nappe affleurante (< 1 m de profondeur), hors des zones captives et des zones de recharge significative (< 50 mm/an). Ces dépressions correspondent souvent à la présence de cours d'eau, mais des zones de résurgence ont aussi été identifiées à des endroits sans cours d'eau, ce qui pourrait représenter de la résurgence diffuse qui peut être indiquée, par endroits, par la présence de milieux humides ou de sols organiques. La carte du livrable 28a montre aussi la nature du lien potentiel entre l'aquifère rocheux régional et les cours d'eau qui a été définie sur la base des conditions de confinement (livrable 17, section 3.3) et de l'épaisseur des sédiments argileux (sections 3.2 et 3.3). La présence d'affleurements dans le lit des cours d'eau n'a pas été explicitement considérée pour définir la nature de liens potentiels entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux. Cependant, cette information avait été utilisée pour la production de la carte d'épaisseur de dépôts meubles ainsi que pour les autres cartes d'épaisseur de sédiments (livrable 15, section 3.2.2). Les critères suivants ont été utilisés pour définir les types de liens potentiels entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux régional :

- Lien « direct » : conditions libres ou conditions semi-captives avec une couverture de dépôts meubles d'épaisseur limitée (< 1 m d'argile et > 3 m de dépôts, avec du till en surface)

- Lien « direct discontinu ou lien indirect diffus » : autres conditions semi-captives (par rapport aux conditions semi-captives considérées comme indiquant un lien direct)
- Lien « indirect diffus ou inexistant » : conditions captives
- Lien « non déterminé » : cours d'eau mineurs qui ne sont pas susceptibles de servir d'exutoires importants pour la résurgence de l'eau souterraine (cours d'eau dont l'ordre de Strahler > 2)

Pour le contexte hydrogéologique de la Plate-forme nord, la recharge est généralement de nulle à faible étant donné la présence d'une couche argile épaisse (> 10 m) et continue, qui limite toute recharge significative de l'aquifère rocheux régional (livrable 28b, section 4.3). Cependant, il y a des zones d'étendue restreinte où la recharge est significative, notamment au sud-est de Varennes (secteur de St-Amable) ainsi qu'à l'ouest de Saint-Antoine-sur-Richelieu. Au niveau des zones de résurgence, une portion de la rivière Yamaska, allant du sud de Saint-Hyacinthe jusqu'à l'ouest de Saint-Hugues, est considérée être en lien direct avec l'aquifère rocheux. L'attribution de ce type de lien est supportée par la présence d'affleurements rocheux observés dans le lit ou les berges de ce tronçon de la rivière ainsi que par la dépression piézométrique correspondant à la position de la rivière (livrable 28a). Ce tronçon de la rivière Yamaska représenterait ainsi la seule importante zone de résurgence identifiée dans le contexte de la Plate-forme nord. Une autre zone de résurgence significative pourrait toutefois être présente à la limite du Piedmont (Appalaches externes) où les gradients hydrauliques horizontaux sont plus élevés, bien que les critères utilisés pour la définition régionale des zones de résurgences n'ont permis d'identifier que des zones de résurgence plus limitées en superficie dans ce secteur. Le changement important du gradient hydraulique horizontal à cet endroit pourrait indiquer que l'écoulement d'eau souterraine allant vers l'ouest à partir de la limite du Piedmont est plus faible que l'écoulement provenant de l'est, et impliquerait donc la perte d'eau (résurgence) à l'endroit où le changement de gradient est observé (voir coupes du modèle conceptuel à la section 4.7). Cette résurgence « régionale » est aussi prédite par la modélisation numérique de l'écoulement (section 6.4) et elle pourrait être reliée au changement de la topographie entre le Piedmont et la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres), et être favorisée par les failles délimitant le front des Appalaches externes. De plus, à l'ouest de l'écaille de Saint-Dominique, on observe des fossés de drainage perpendiculaires à la faille qui pourraient indiquer des apports d'eau souterraine à cet endroit. Ailleurs dans ce contexte, les cours d'eau ont des liens considérés « indirects diffus » avec l'aquifère rocheux parce qu'ils correspondent tout de même souvent avec des dépressions de la piézométrie, mais la présence d'une épaisse couche argileuse ne permet pas de lien direct. Il faut aussi noter qu'il y a peu de possibilité de résurgence d'eau souterraine provenant de l'aquifère rocheux au fleuve Saint-Laurent à cause de l'épaisse couche argileuse entre l'aquifère rocheux et le niveau du fleuve (12-15 m près de Varennes, ~ 10 m près de Verchères, > 65 m près de Sorel).

Pour le contexte hydrogéologique de la Plate-forme sud, une recharge modérée, mais assez bien distribuée spatialement, de l'aquifère rocheux se produit à travers le till dans les zones semi-captives (livrable 28b, section 4.3). Par contre, la recharge est plus limitée dans les zones avec un couvert argileux plus épais, notamment sur une bande étroite le long de la rivière Richelieu qui s'élargit considérablement entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Beloeil. Certains secteurs ont été interprétés comme étant des zones de recharge préférentielle, notamment dans de faibles hauts piézométriques situés dans le secteur à l'est de ce contexte, entre Saint-Alexandre et Farnham, ainsi qu'au nord-est de Napierville (livrable 28a). L'écoulement se fait de façon plus ou moins radiale à partir de ces hauts piézométriques jusqu'aux cours d'eau avoisinants. Des zones de résurgence significatives sont présentes le long de la rivière Richelieu, principalement dans la portion entre le contact géologique des formations Trenton/Lorraine et le bassin Chambly. La résurgence de l'eau souterraine se produit aussi le long de plusieurs autres cours d'eau ainsi que dans la baie Missisquoi. Le lien des cours d'eau

avec l'aquifère rocheux est généralement interprété comme étant soit direct ou direct discontinu à cause du type et de l'épaisseur de dépôts meubles sur le roc dans ce contexte (généralement du till). Le lien de certains tronçons de la rivière Richelieu est toutefois défini comme indirect diffus étant donné la présence de conditions captives engendrées par un couvert argileux plus épais. Le front appalachien (qui correspond à la limite entre les Basses-terres et le Piedmont) pourrait représenter une zone de résurgence, mais les indications sont beaucoup moins claires dans ce contexte car les nombreux cours d'eau qui recoupement ce front constituent des zones de résurgence préférentielles qui réduisent la résurgence régionale possible au front appalachien.

Le contexte hydrogéologique des Montérégiennes représente des zones de recharge préférentielles (livrable 28a) avec des valeurs de recharge importantes (section 4.3, livrable 28b). Il y a résurgence de cette eau souterraine dans certains des cours d'eau entourant les Montérégiennes, mais qui sont localisés soit dans les Basses-terres ou les Appalaches. Il y a très peu de cours d'eau sur les Montérégiennes et pratiquement pas de zones de résurgence locales sur ces collines elles-mêmes. Parmi les données disponibles, quelques sources ont également été identifiées au pourtour des monts Saint-Bruno, Saint-Hilaire, Saint-Grégoire et Yamaska, indiquant une résurgence d'eau souterraine. Bien que les données colligées et les travaux réalisés n'aient pas permis de préparer un inventaire exhaustif des sources, les forts dénivelés topographiques entraînant de forts gradients hydrauliques entre les Montérégiennes et leurs milieux environnants constituent tout de même des conditions propices à la présence de sources à la périphérie des collines.

Dans le contexte de la zone externe des Appalaches (Piedmont), la recharge est modérée à faible dans le secteur de la vallée de la rivière Noire (livrable 28b), mais elle est plus importante sur les collines au nord-ouest et au sud-est de cette vallée qui constituent des zones de recharge préférentielle (livrable 28a). Les types d'eau souterraine identifiés dans ces secteurs sont d'ailleurs représentatifs d'eaux de recharge récentes (section 4.6). Ailleurs dans le Piedmont, il y a des zones de recharge importantes, particulièrement sur les hauts topographiques où la couverture de sédiments sur le roc est faible; ce sont potentiellement des zones de recharge préférentielle. Dans la moitié sud du Piedmont, même si des recharges significatives ont été estimées, le type d'eau relativement évolué présent dans une grande partie de ce secteur indiquerait qu'il constitue également une zone de résurgence régionale de l'eau souterraine provenant des Appalaches, avec un long temps de résidence dans l'aquifère rocheux (section 4.6). Les zones de résurgence de l'eau souterraine dans le Piedmont se trouvent surtout dans les vallées. Le type de contact hydraulique entre ces cours d'eau et l'aquifère rocheux est variable. Dans la vallée de la rivière Noire, la présence de sédiments argileux peu perméables rend le lien généralement discontinu ou indirect. Le lien est souvent direct pour les autres cours d'eau du Piedmont, mais il est indirect aux endroits où il y a des accumulations plus importantes de sédiments fins. Tel que mentionné précédemment, une zone de résurgence régionale est présumée être présente au front ouest de ce contexte (front des nappes externes).

Enfin, dans le contexte de la zone interne des Appalaches (Hautes-terres), on retrouve les plus fortes valeurs de recharge (livrable 28b, section 4.3) de la Montérégie Est sur les hauts topographiques qui constitueraient de grandes zones de recharge préférentielle (livrable 28a). La géochimie de l'eau souterraine de ce contexte est d'ailleurs caractéristique de conditions de recharge (section 4.6). Les zones de résurgence se trouvent dans les vallées appalachiennes et les autres terrains plus bas de la partie ouest de ce contexte. Puisque des sédiments fins sont souvent présents en surface dans les vallées, les liens entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux régional sont généralement discontinus ou indirects.

4.5 Vulnérabilité des nappes

D'après un des guides de cartographie hydrogéologique du MDDEFP (2008b), 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 des activités anthropiques potentiellement polluantes. Cette carte doit permettre d'identifier les zones les plus vulnérables, ce qui permet de prendre des mesures d'aménagement du territoire permettant de protéger la ressource. De telles mesures préventives peuvent souvent éviter les travaux longs et onéreux de réhabilitation des nappes. Les conditions qui contrôlent la vulnérabilité des nappes sont nombreuses et complexes. Les cartes de vulnérabilité permettent en fait d'intégrer un ensemble de conditions qui contribuent à la vulnérabilité d'un aquifère, « traduisant » ainsi la connaissance hydrogéologique en un outil facilement applicable par des non spécialistes. L'estimation de la vulnérabilité sur un territoire est « relative », les valeurs n'étant pas absolues et pas directement comparables d'une région à l'autre car, même si la même méthode utilisée pour évaluer la vulnérabilité comporte habituellement des étapes bien définies, de nombreux choix professionnels doivent généralement être faits dans la production d'une carte de vulnérabilité. Une telle carte montre donc, de façon relative, le niveau de vulnérabilité d'un aquifère dans un territoire donné.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour évaluer la vulnérabilité, tant pour les aquifères à l'échelle régionale que pour les approvisionnements en eau à l'échelle locale. Frind et al. (2006) définissent le concept de « vulnérabilité de puits » et font aussi une très bonne revue des concepts de vulnérabilité et de susceptibilité. Deux types de vulnérabilité sont distingués : 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 ainsi qu'à la nature des contaminants potentiels pouvant affecter la qualité de l'eau souterraine. La vulnérabilité intrinsèque est mieux adaptée à une évaluation régionale d'un aquifère étendu et c'est ce type de vulnérabilité qui a été défini en Montérégie Est et pour les autres projets PACES. Le programme PACES spécifie que la méthode qui doit être utilisée pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque est la méthode DRASTIC. Le protocole suivi pour appliquer cette méthode est annexé au présent rapport et il présente l'approche suivie en détail. La présente section se limitera à décrire brièvement l'approche suivie et ensuite les résultats obtenus pour l'aquifère rocheux régional de la Montérégie Est. Il n'y a pas dans la région d'étude d'aquifères granulaires assez étendus pour justifier l'évaluation de leur vulnérabilité. Pour ces aquifères, il est tout de même possible d'utiliser l'épaisseur de sédiments argileux pour avoir une indication de leur vulnérabilité (sections 3.2 et 3.3).

DRASTIC est un indice qui a été développé par la U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) dans les années 1980 pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères aux États-Unis (Aller et al., 1987). Cette approche utilise 7 paramètres, chacun correspondant à une des lettres du mot « DRASTIC ». Ces paramètres et leurs définitions sont illustrés à la figure 4.9. La valeur de chaque paramètre est classée en intervalles (pour les variables quantitatives) ou en types de milieu (pour les variables qualitatives), selon leur contribution potentielle au risque de pollution d'un aquifère par une contamination provenant de la surface du sol. En d'autres mots, des points (ou cotes) sont attribués, selon un gabarit, en fonction de la valeur d'un paramètre ou des caractéristiques géologiques pour un site donné. Ces intervalles de valeurs vont généralement de 1 (faible vulnérabilité) à 10 (forte vulnérabilité) (valeurs dans le protocole à l'annexe 3 de ce rapport). Des poids de 1 à 5, ont aussi été attribués à chacun des 7 paramètres (figure 4.9) en fonction de l'importance relative présumée des processus physiques représentés par les paramètres par rapport à leur contribution à la vulnérabilité d'un aquifère.

La somme des points (cotes) attribués aux différents paramètres DRASTIC multipliés par leur poids, donne l'indice DRASTIC de vulnérabilité :

$$D_R D_w + R_R R_w + A_R A_w + S_R S_w + T_R T_w + I_R I_w + C_R C_w = \text{Indice DRASTIC} \qquad 4.5$$

où l'indice R représente la cote (*rating*) et l'indice W le poids (*weight*) de chaque paramètre, et où les paramètres sont définis comme suit : profondeur à la nappe (D : *Depth to water table*), recharge (R : *net Recharge*), milieu aquifère (A : *Aquifer media*), type de sol (S : *Soil media*), pente topographique (T : *Topography slope*), impact de la zone vadoze (I : *Impact of vadose zone*), et conductivité hydraulique de l'aquifère (C : *aquifer Conductivity*).

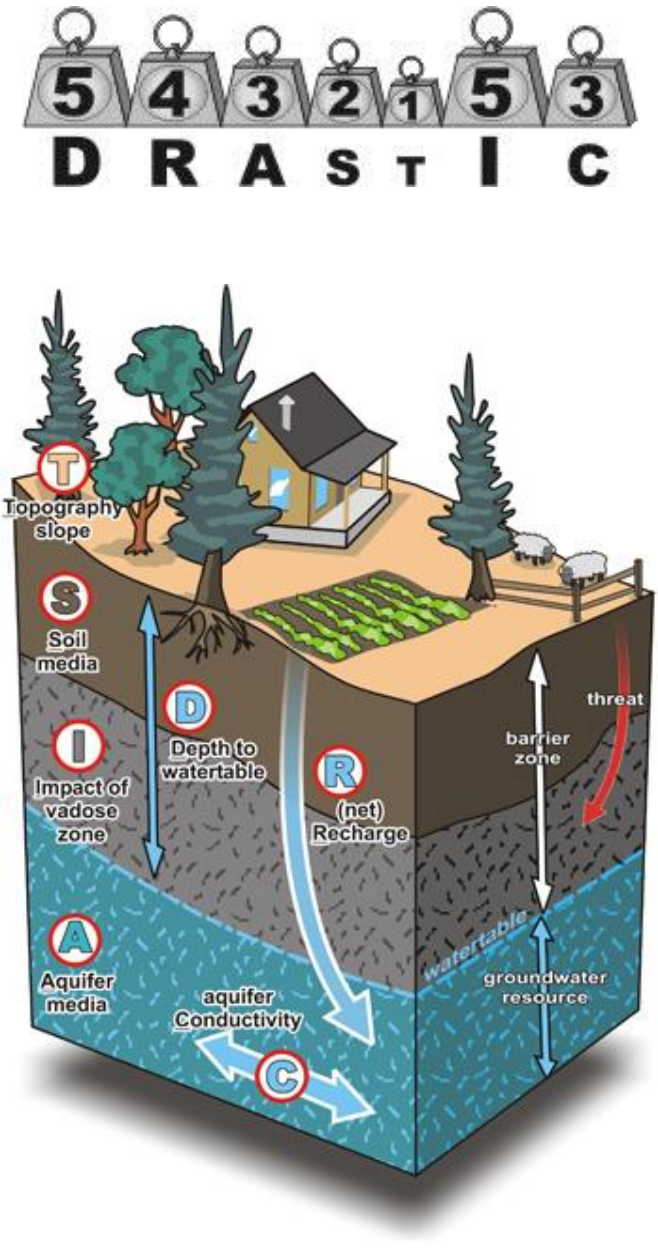


Figure 4.9 : Poids et définitions des paramètres DRASTIC (De Chardon, 2009)

Préalablement au calcul de l'indice DRASTIC, une carte de la distribution spatiale de chacun des 7 paramètres doit être générée en format matriciel (*raster*) de façon à pouvoir additionner

les couches telles que défini par l'équation 4.5. Dans le cadre des projets PACES, des mailles de 250 x 250 m ont été utilisées pour les couches matricielles couvrant la région à l'étude, de façon à avoir un nombre de mailles raisonnable sur l'ensemble de la zone, tout en ayant une résolution spatiale acceptable en fonction des données disponibles. Ces opérations ont été réalisées dans le système d'information géographique (SIG) ArcGIS.

Le livrable 22 représente l'indice DRASTIC de vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional en Montérégie Est. Une échelle de couleur est utilisée pour indiquer les plages de valeur de l'indice, telles que définies dans le guide de la méthode (Aller et al., 1987). Une présentation alternative est aussi utilisée pour présenter l'indice DRASTIC dans l'atlas hydrogéologique de la Montérégie Est à l'annexe 1 ainsi qu'à la figure 4.10. Dans l'atlas, les plages ont été définies de façon relative en utilisant les percentiles de la distribution des valeurs d'indice DRASTIC obtenues dans la région d'étude. Un tel mode de présentation permet de mieux illustrer l'importance relative de la vulnérabilité dans la région d'étude. Le livrable 22 montre aussi des cartes en petit format pour chacun des paramètres de la méthode DRASTIC.

Selon les contextes hydrogéologiques, la valeur moyenne de l'indice DRASTIC en Montérégie Est ne montre pas une grande variabilité en comparaison d'autres régions au Québec. La valeur moyenne pour l'ensemble de la région étant 124, avec les valeurs suivantes selon les contextes : 94 dans la Plate-forme nord, 137 dans la Plate-forme sud, 120 dans les Montérégiennes, 141 dans la zone externe des Appalaches (Piedmont) et 134 dans la zone interne des Appalaches (Hautes-terres). La carte du livrable 22 montre toutefois une variabilité spatiale relativement importante de l'indice DRASTIC entre les contextes hydrogéologiques eux-mêmes ainsi qu'à l'intérieur de ceux-ci. La carte DRASTIC de l'atlas utilisant les plages de valeur de l'indice basée sur les percentiles (10^e, 25^e, 75^e et 90^e) permet de mieux faire ressortir les valeurs faibles et fortes d'indice. Cette carte est reproduite à la figure 4.10 et utilisée dans ce rapport pour décrire la distribution spatiale de la vulnérabilité. En Montérégie Est, les zones considérées à « faible » vulnérabilité relative ont un indice inférieur à 100 (vert pâle) et des secteurs à vulnérabilité jugée « très faible » ont même un indice inférieur à 85 (vert foncé). Les zones à vulnérabilité « intermédiaire » ont des valeurs d'indice entre 100 et 145 (jaune). Les zones à vulnérabilité relativement « élevée » ont un indice entre 145 et 160 (orange) et, enfin, les zones à vulnérabilité « très élevée » ont un indice excédant 160 (rouge). La figure 4.10 montre que l'indice DRASTIC de vulnérabilité varie de façon distincte dans les contextes hydrogéologiques de la Montérégie Est.

À l'intérieur de la Plate-forme nord, la présence d'une épaisse couche de sédiments argileux peu perméables fait en sorte que la vulnérabilité est généralement faible ou même très faible. Cependant, localement la vulnérabilité peut être intermédiaire ou même élevée dans les secteurs où l'épaisseur du couvert argileux est moins importante (ex. : sud-est de Contrecoeur et Varennes, le long de certains tronçons de la rivière Yamaska).

Dans le contexte de la Plate-forme sud, les conditions semi-captives sont prédominantes en relation avec un recouvrement du roc par des épaisseurs variables de till, généralement considéré semi-perméable. Ces conditions amènent des vulnérabilités intermédiaires sur une grande partie de ce contexte. Cependant, à certains endroits où on retrouve une couche argileuse, tel que le long de la rivière Richelieu, la vulnérabilité est faible alors qu'à d'autres endroits la vulnérabilité est élevée, et même très élevée, à cause d'une combinaison de facteurs (ex. : recharge plus élevée, type de sol plus vulnérable, zone non saturée plus mince) (voir livrable 22).

Pour le contexte des Montérégiennes, même si ce sont des zones de recharge importantes, les fortes pentes et la profondeur de la nappe font en sorte qu'on y retrouve des vulnérabilités faibles ou intermédiaires.

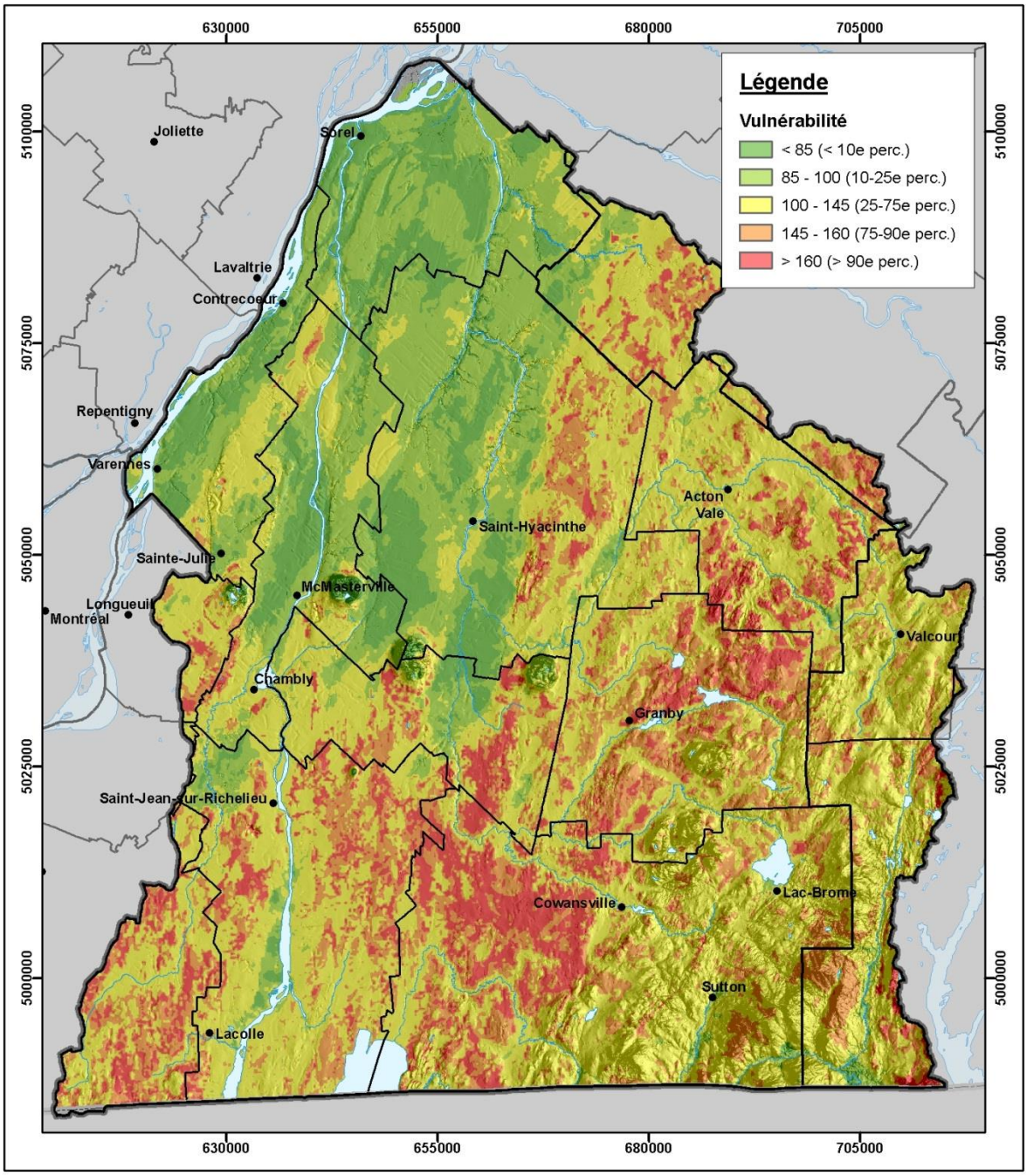


Figure 4.10 : Vulnérabilité DRASTIC avec des plages de valeurs basées sur la distribution relative des indices en Montérégie Est

Dans la zone externe des Appalaches (Piedmont), on retrouve de grandes étendues avec des vulnérabilités intermédiaires ou même faibles (ex. : vallée de la Noire), grâce à une combinaison de pente et de type de sol (livrable 22). Cependant, certains secteurs correspondant à des zones de recharge préférentielle ont des vulnérabilités élevées ou très élevées, notamment à l'ouest de la rivière Noire, au nord-est de Granby, au sud du Mont Yamaska et particulièrement dans un grand secteur s'étendant à l'ouest de Cowansville.

Finalement, dans le contexte de la zone interne des Appalaches (Hautes-terres), on retrouve de grands secteurs avec des vulnérabilités intermédiaires, surtout à cause des fortes pentes, tandis que certaines des zones de recharge préférentielle avec des pentes plus modérées atteignent des vulnérabilités élevées. Ces conditions se reflètent dans l'indice moyen pour la zone interne des Appalaches (Hautes-terres) qui est même inférieur à celui dans la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent, et significativement plus faible que celui obtenu pour le Piedmont, qui est le contexte hydrogéologique où la vulnérabilité moyenne est la plus élevée. La section suivante portant sur la géochimie de l'eau souterraine fournit une certaine validation des conditions de recharge en Montérégie Est et, indirectement, ainsi que de la vulnérabilité.

4.6 Géochimie de l'eau souterraine

4.6.1 Travaux, objectifs et méthodologie

Le projet PACES a permis d'acquérir des données hydrogéochimiques à jour et détaillées comprenant des résultats analytiques pour plusieurs paramètres chimiques, principalement inorganiques, pour 237 points d'échantillonnage répartis sur l'ensemble de la Montérégie Est (figure 4.11). La méthodologie utilisée pour l'échantillonnage de l'eau souterraine est décrite à la section 2.2.4. Considérant les types de puits exploitant l'eau souterraine dans la région d'étude, les échantillons sont plus nombreux dans les puits exploitant l'aquifère rocheux (86% des échantillons) que pour les puits installés dans les aquifères granulaires (14% des échantillons). L'emphase a été mise sur l'aquifère rocheux qui constitue l'aquifère le plus exploité régionalement, tant par les puits municipaux que résidentiels. Les paramètres analysés sur chacun des échantillons sont : métaux (30), anions majeurs (bromures, chlorures, fluorures, nitrites, nitrates, sulfates) et les nutriments (phosphore inorganique et azote ammoniacal). Les analyses spécialisées suivantes ont été faites pour un sous-ensemble représentatif d'échantillons : isotopes stables (91 échantillons : $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$), isotopes du carbone (^{14}C et $\delta^{13}C$) et tritium (^{3}H) (55 échantillons avec ^{14}C ou ^{3}H, dont 25 avec les deux analyses).

L'évaluation de la géochimie et de la qualité d'eau souterraine à l'aide des données hydrogéochimique nécessite d'abord une interprétation et une mise en contexte. Cette section présente une synthèse de l'interprétation géochimique réalisée dans le cadre du projet de maîtrise de Châtelaine Beaudry (Beaudry, 2013). Dans le cadre de ce chapitre portant sur les conditions hydrogéologiques, la présente section discute des résultats obtenus en relation avec les objectifs reliés à la compréhension des conditions géochimiques : 1) identifier et définir les différents groupes d'eau ayant des caractéristiques géochimiques distinctes et préciser leur répartition spatiale; 2) identifier et expliquer les effets des principaux processus géochimiques qui contrôlent les caractéristiques géochimiques des groupes d'eau; 3) interpréter la présence, dans différents contextes hydrogéochimiques, des groupes d'eau pour en déduire les implications sur la dynamique régionale d'écoulement. Dans le chapitre 5 portant sur les ressources en eau souterraine, la section 5.4 discute des résultats de l'étude géochimique reliés aux objectifs de définition de la qualité de l'eau souterraine dans la région d'étude.

4.6.2 Définition et nature des groupes d'eau souterraine

Huit (8) groupes d'eau ont été défini par analyse statistique multivariée (plus précisément par analyse hiérarchique regroupée) et par analyses graphiques (Beaudry, 2013). Les données utilisées pour l'analyse statistique multivariée correspondent aux résultats analytiques (normalisées et standardisés) associés à 190 échantillons pour 16 paramètres géochimiques sélectionnés : pH, MDT, pe, HCO_3, NH_4, Ba, B, Ca, Cl, Mg, Mn, K, Si, Na, Sr, SO_4. Les 190 échantillons sélectionnés pour les analyses rencontrent les 2 critères suivants : 1) ils sont représentatifs de l'aquifère rocheux; 2) leur bilan ionique (anions + cations considérés) est jugé

acceptable (±15%). A noter que les paramètres suivants n'ont pas été analysés mais ont été estimés à partir d'autres résultats : bicarbonate (HCO_3) et ammonium (NH_4). Les échantillons initialement rejetés ont ensuite été associés à l'un des huit groupes, sur la base de leurs caractéristiques chimiques et physiques par rapport à celles des groupes.

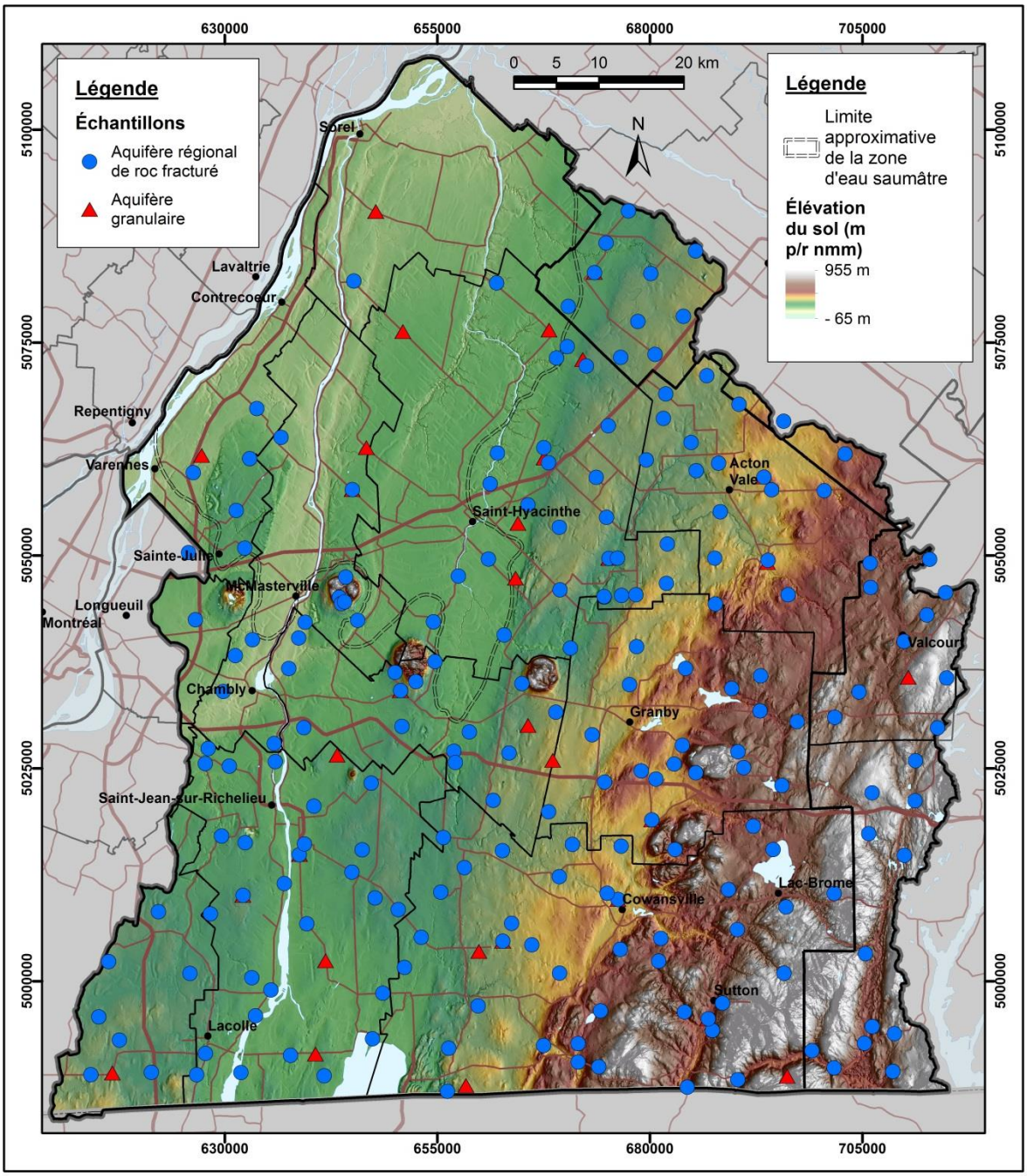


Figure 4.11 : Localisation des échantillons d'eau souterraine prélevés en Montérégie Est

La figure 4.12 montre l'assignation des échantillons d'eau aux huit (8) groupes d'eau ainsi que l'interprétation de la répartition spatiale de ces groupes. Cette figure montre aussi l'étendue approximative de l'eau souterraine saumâtre (vestige de la mer de Champlain; détails dans Beaudry et al., 2011) ainsi que la limite de l'extension maximale atteinte par la mer de

Champlain au pied des Hautes-terres appalachiennes (Parent et Occhietti, 1988). Le tableau 4.7 résume les informations concernant les groupes d'eau : répartition spatiale, niveau de confinement et caractéristiques chimiques (incluant les éléments mineurs) et physiques. Les groupes dont le nom commence par « M » sont associés à des eaux de mélange ou dites typiquement « Montérégiennes ». Les groupes dont le nom commence par « A » sont associées principalement aux Hautes-terres des Appalaches (ou zone interne des Appalaches), tandis que les eaux « MC » sont associées aux vestiges de la mer de Champlain et les eaux « BT » aux Basses-terres (ou Plate-forme du Saint-Laurent).

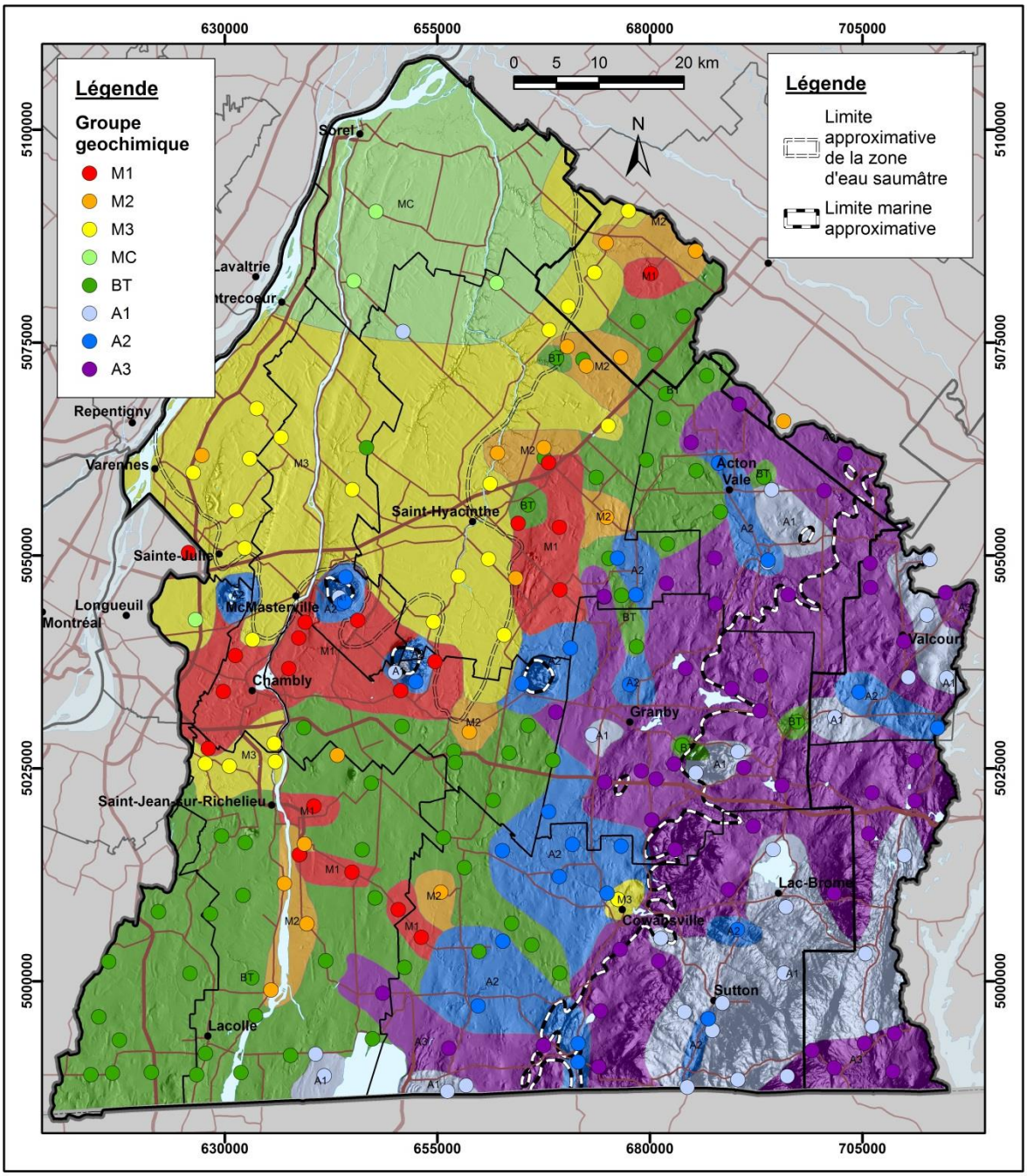


Figure 4.12 : Répartition spatiale des groupes d'eau souterraine

Tableau 4.7 : Sommaire des caractéristiques des groupes d'eau identifiés en Montérégie Est

Groupe	Distribution spatiale	Confine-ment	Caractéristiques chimiques et physiques distinctives	Éléments mineurs	Qualité relative
M1 (rouge)	Principalement au pourtour de la zone saumâtre (au sud des Montérégiennes et à l'ouest du Piedmont) et dans le sud de la Plate-forme à l'est de la vallée du Richelieu.	Captif à semi-captif[f]	Eau évoluée et ancienne de type Na-HCO_3 résultant du contact eau douce/eau marine. Très riche en sodium dû à l'échange ionique Ca-Na. Eaux les plus alcalines de la région (pH médian de 8.6).	F S	Passable
M2 (orange)	Distribution discontinue, surtout au pourtour, à l'est, de la zone saumâtre. Aussi dans une zone limitée du sud de la Plate-forme dans la vallée du Richelieu.	Captif à semi-captif	Eau évoluée de type Na-HCO_3 représentant un mélange entre les eaux des groupes M1 et BT.	Ba, F S Sr	Passable
M3 (jaune)	Dans le nord de la Plate-forme : soit dans le sud et l'est de la zone saumâtre. Au sud de la Plate-forme : zone limitée à l'ouest de la vallée du Richelieu.	Captif	Eau évoluée de type Na-HCO_3-Cl représentant un mélange entre les eaux des groupes M1 et MC. Eau alcaline (pH médian de 8.2).	Ba, F B As	Non potable
MC (vert pâle)	Extrémité nord de la Plate-forme, dans la zone saumâtre.	Captif	Eau saumâtre de type Na-SO_4 et Na-Cl. Vestige de la mer de Champlain. Conditions réduc-trices (pe médian de 0.0).	Sr, Fe As, S B, Mn	Non potable
BT (vert)	Sud de la Plate-forme et nord-ouest du Piedmont (zone externe des Appalaches). Présent autant dans des zones de recharge que de résurgence.	Semi-captif à libre	Eau de recharge de type Ca-HCO_3 relativement jeune. Infiltration présumée lente. Riche en MDT dû à un mélange avec des eaux marines résiduelles.	SO_4 Fe, Mn Si, Ba	Passable
A1 (bleu pâle)	En altitude et dans les vallées, surtout dans la partie sud-est de la zone interne des Appalaches (Hautes-terres) et sur les Collines montérégiennes.	Libre à semi-captif	Eau jeune de recharge en altitude de type Ca-HCO_3. Eau acide et oxydante (valeurs médianes de pH de 6.3 et de pe de 6.9).	Mn	Accepta-ble
A2 (bleu)	Surtout à l'ouest des parties centrales et sud du Piedmont et dans quelques vallées des Hautes-terres appalachiennes. Présent également sur les Collines montérégiennes.	Semi-captif à libre	Eau évoluée, ancienne et de type Na-HCO_3. Présumée riche en sodium dû à l'échange ionique Ca-Na en milieu anciennement marin (Piedmont).	F, S Mn U	Passable
A3 (mauve)	Type d'eau dominant dans la zone interne des Appalaches (Hautes-terres) et au nord-est de la zone externe (Piedmont). Se trouve en élévation et dans les vallées.	Semi-captif à libre	Eau un peu plus évoluée et plus ancienne que A1, de type Ca-HCO_3 ou Mg-HCO_3. Peu de MDT et de Cl. Apport potentiel d'eau ancienne d'origine indéterminée.	Mn Fe S, As	Accepta-ble

Beaudry (2013) présente les statistiques des concentrations des paramètres géochimiques pour chacun des groupes d'eau définis. La figure 4.13 illustre la variation de la composition géochimique de ces groupes d'eau à l'aide de diagrammes de Piper et de Stiff. Ces figures montrent que la géochimie de l'eau souterraine est relativement variable en Montérégie Est. Les groupes d'eau varient du type Ca-HCO_3, caractérisé par de faibles concentrations (groupe A1), et typique des zones de recharge, jusqu'au type Na-Cl (groupe MC), dont l'origine serait reliée à la mer de Champlain.

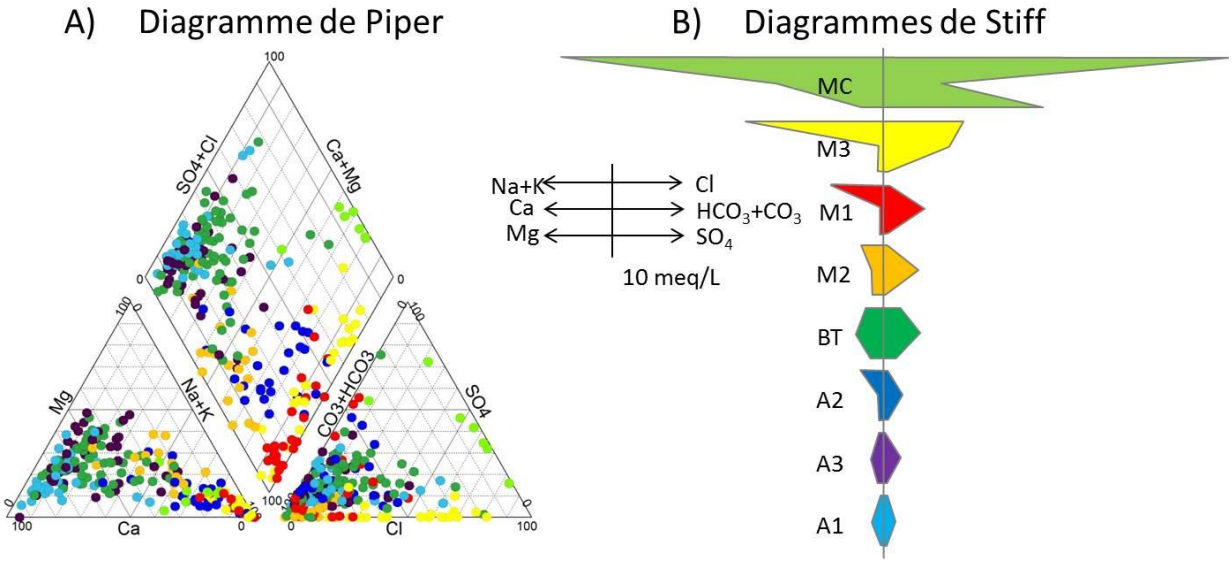


Figure 4.13 : Composition des ions majeurs pour les groupes d'eau

La variation de la composition chimique des groupes d'eau et leurs interrelations potentielles sont illustrées à la figure 4.14. Ces graphiques permettent d'identifier des pôles géochimiques représentant les diverses origines de l'eau souterraine dans la région d'étude ainsi que leur niveau d'évolution potentiel. En termes d'origines, on peut notamment reconnaître les eaux de recharge des Appalaches (groupe A1), les eaux de recharge dans les Basses-terres (ou Plate-forme du Saint-Laurent) (groupe BT), et les eaux associées à la mer de Champlain (groupe MC). Les eaux associées aux « montérégiennes » (groupe M1) représenteraient quant à elles un stade avancé d'évolution géochimique lié à l'échange ionique Ca-Na. À partir des pôles géochimiques représentant les différentes origines probables de l'eau souterraine, il y a évolution géochimique dans le temps lors de l'écoulement dans le système aquifère amenant une transformation de la géochimie de l'eau souterraine. La figure 4.15 montre le modèle conceptuel de l'évolution géochimique de l'eau souterraine en Montérégie Est développé par Beaudry (2013). Ce modèle précise les relations potentielles entre les groupes d'eau ainsi que les mécanismes géochimiques qui seraient responsables des transformations de la composition de l'eau. Ce modèle montre l'influence importante de la mer de Champlain sur la géochimie régionale de l'eau souterraine. La figure 4.15 présente chacun des 8 groupes d'eau avec la direction de son évolution potentielle (flèches) ainsi que les principaux mécanismes impliqués dans cette évolution (i.e. mélange, influence géologique, échange ionique).

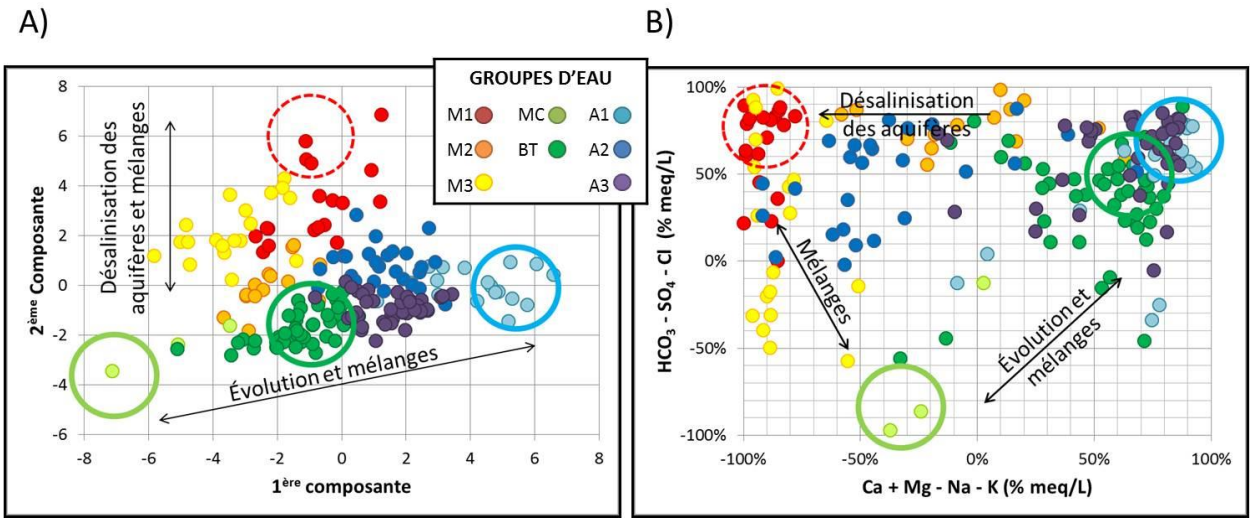


Figure 4.14 : Relations entre les groupes d'eau illustrées par un graphique des échantillons d'eau sur les deux principales composantes (gauche) et les concentrations relatives des ions majeurs (droite) (Beaudry, 2013)

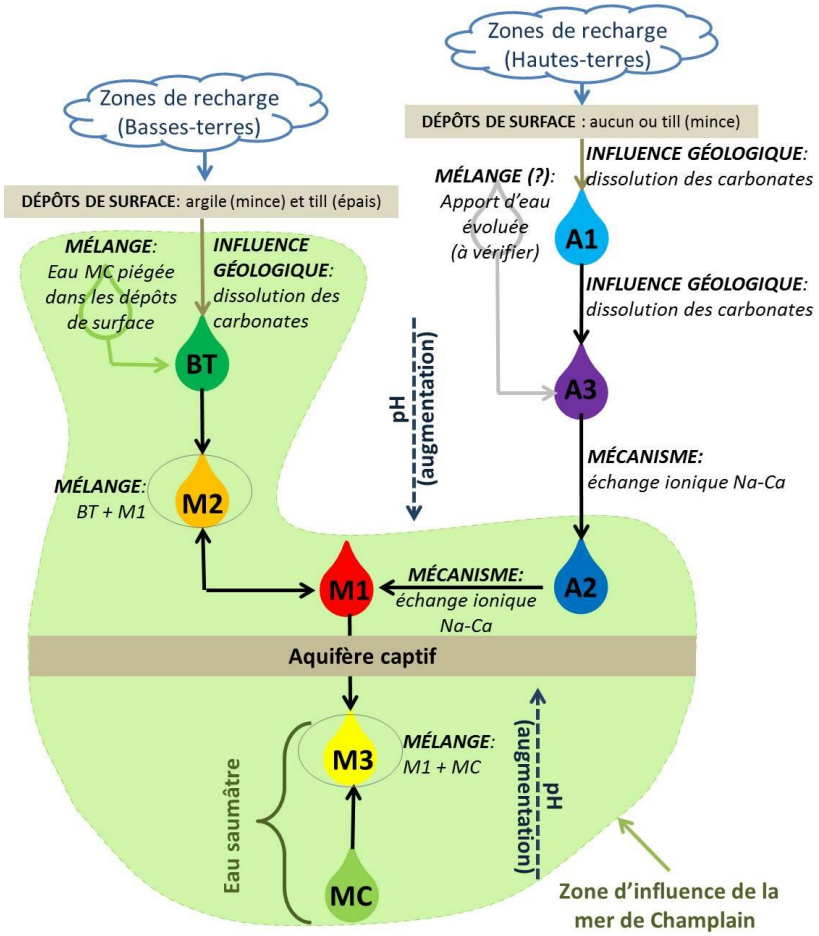


Figure 4.15 : Modèle conceptuel de l'évolution géochimique de l'eau souterraine en Montérégie Est (Beaudry, 2013)

4.6.3 Implications sur la dynamique du système aquifère

En plus de contribuer à la compréhension de la géochimie de l'eau souterraine en Montérégie Est et à la définition de sa qualité (section 5.4), la géochimie de l'eau souterraine a aussi contribué considérablement à la compréhension de la dynamique du système aquifère régional et au développement de modèles hydrogéologiques conceptuels plus représentatifs que des modèles basés uniquement sur des données hydrauliques et stratigraphiques. Les principales contributions de l'étude géochimique à ce niveau sont les suivantes :

- Validation qualitative de l'emplacement des zones de recharge préférentielle qui sont caractérisées par des eaux jeunes et peu minéralisées de type Ca-HCO_3 avec un pH acide. Les zones de recharge les plus importantes sont situées dans la zone interne des Appalaches (Hautes-terres) (groupes A1 et A3). La géochimie de l'eau retrouvée dans le contexte hydrogéologique de la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres) (groupe BT) montre que la recharge y est significative, mais moins importante
- Révision des hypothèses initiales concernant le contexte hydrogéologique de la zone externe des Appalaches (Piedmont), qui ne correspondrait pas à une grande zone de recharge du système aquifère mais qui semblerait plutôt comprendre des zones de résurgence significative de l'eau rechargée dans la zone interne des Appalaches en plus de zones de recharge locales, particulièrement dans le centre et sud du Piedmont
- Identification de types d'eau (groupes M1 et M2) qui représenteraient l'aboutissement régional de l'évolution géochimique de l'eau souterraine en zones de résurgence ou au pourtour de la zone d'eau saumâtre (groupes MC et M3)
- Identification d'un patron d'écoulement régional profond à partir de l'évolution géochimique de l'eau souterraine (écoulement interne aux Appalaches et aussi partant des Appalaches et émergeant dans le Piedmont ou autour des Montérégiennes
- Identification de résurgence d'eau souterraine évoluée à la limite du Piedmont (zone externe des Appalaches) et des Montérégiennes qui, couplée aux conditions captives de la partie nord de la Plate-forme, expliquerait la présence d'eau saumâtre dans ce secteur sur environ 2 200 km². Cette eau saumâtre représenterait une eau de la mer de Champlain en partie préservée dans certains types de sédiments ou de formations géologiques parce que partiellement lessivée par un faible écoulement d'eau souterraine

4.7 Synthèse des conditions hydrogéologiques

Le tableau 4.8 montre que des conditions hydrogéologiques distinctes sont observées dans les cinq (5) contextes hydrogéologiques définis en Montérégie Est (section 3.4). Les caractères distinctifs de ces contextes hydrogéologiques sont résumés dans la présente section.

Le contexte de la zone nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres nord) est caractérisé par un faible relief et surtout par une couverture de sédiments argileux relativement épaisse (> 20 m). Ces conditions impliquent une recharge minimale de l'aquifère rocheux régional ainsi qu'un très faible écoulement de l'eau souterraine. De cette situation découle la présence d'eau saumâtre dans l'aquifère rocheux des Basses-terres nord dû au lessivage partiel de l'eau de la mer de Champlain. Cette eau saumâtre n'est pas potable, entraînant un faible potentiel aquifère pour ce contexte, d'où une utilisation minimale de l'eau souterraine et le recours à l'eau de surface pour l'alimentation en eau.

Dans le contexte de la zone sud de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres sud), la couverture de sédiments argileux n'est généralement pas continue ou épaisse, le socle rocheux étant plutôt recouvert de till de moins de 10 m d'épaisseur qui peut permettre une recharge significative de l'aquifère rocheux. Ce couvert sédimentaire limité laisse croire qu'il y aurait des

liens entre l'aquifère rocheux et les cours d'eau, particulièrement le long de certains tronçons de la rivière Richelieu qui constitueraient des zones de résurgence. Les épaisseurs significatives de sédiments superficiels perméables ont peu d'extension spatiale, de sorte que le potentiel aquifère repose essentiellement sur l'aquifère rocheux fracturé. Il y a une utilisation significative d'eau souterraine pour l'approvisionnement dans ce contexte.

Le contexte hydrogéologique des intrusions montérégiennes représenterait une zone de recharge régionale de l'aquifère rocheux. Ce contexte présente un potentiel aquifère dans le roc fracturé, mais aussi dans les dépôts meubles du côté sud des Montérégiennes où se trouvent des accumulations significatives de sédiments grossiers perméables. L'aquifère rocheux et les aquifères granulaires entourant les Montérégiennes sont toutefois relativement vulnérables. Au niveau de la qualité d'eau, ce contexte est caractérisé par un type d'eau distinct reflétant à la fois la recharge locale et un apport d'eau évoluée. Dans ce contexte, on retrouve des dépassements significatifs des critères de potabilité pour le fluor (F) et le baryum (Ba) dans l'eau souterraine de l'aquifère rocheux.

Dans le contexte de la zone externe des Appalaches (Piedmont), on retrouve un faible couvert de till sur les hauteurs qui permettrait une recharge plus importante. Ce contexte n'est cependant pas uniquement une zone de recharge régionale car, à certains endroits dans sa partie sud, il y aurait plutôt résurgence de d'eau souterraine provenant des Appalaches. Il y aurait aussi résurgence de l'eau souterraine dans les vallées et au front des Appalaches à la limite de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres). L'aquifère rocheux est peu à moyennement perméable, mais il est exploité partout, tandis que le potentiel aquifère dans les dépôts meubles est présent par endroits dans les vallées. Il y a une utilisation importante de l'eau souterraine dans ce contexte.

Enfin, dans le contexte de la zone interne des Appalaches (Hautes-terres), on retrouve aussi une importante recharge sur les hauteurs à cause du faible couvert de till. La résurgence de l'eau souterraine se fait par endroits dans les vallées où la couverture de sédiments fins peut aussi réduire la vulnérabilité. Un potentiel aquifère au roc est présent dans l'ensemble du contexte, ainsi qu'un potentiel aquifère dans les dépôts meubles dans les vallées. La meilleure qualité d'eau souterraine de la Montérégie Est est présente dans ce contexte, qui n'a pas été envahi par la mer de Champlain. Il y a une utilisation locale de l'eau souterraine dans ce contexte, dans les secteurs où des municipalités plus importantes se sont développées.

De façon à intégrer les informations concernant les contextes hydrogéologiques (tableau 4.8) et à les illustrer schématiquement, des modèles conceptuels hydrogéologiques ont été développés à partir de coupes verticales passant à travers des secteurs typiques de la région d'étude. Ces coupes sont représentatives de la topographie et de la géologie du roc et des sédiments superficiels, mais elles ont été schématisées de façon à faciliter la description des conditions hydrogéologiques. Ces modèles conceptuels du système aquifère, qui représentent ainsi une synthèse des connaissances sur les contextes hydrogéologiques identifiés en Montérégie Est, ont été préparés pour illustrer deux secteurs représentatifs : 1) le secteur des Appalaches externes (Piedmont et partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres) ; 2) le secteur de la Plate-forme du Saint-Laurent à travers le Mont Rougemont. Ces modèles sont présentés dans l'atlas hydrogéologique du projet à l'annexe 1 et sont décrits ci-après.

Puisque de nombreux processus agissent conjointement dans le système aquifère régional, l'information a été regroupée en trois « catégories » sur les coupes : 1) géologie (matériaux constituant les dépôts meubles et le roc), 2) hydrogéologie (écoulement de l'eau souterraine et potentiel aquifère), 3) qualité de l'eau souterraine (qualité naturelle et vulnérabilité de l'aquifère).

Tableau 4.8 : Synthèse des conditions rencontrées dans les contextes hydrogéologiques de la Montérégie Est

Nom du contexte (complet)	Plate-forme du St-Laurent (partie nord)	Plate-forme du St-Laurent (partie sud)	Intrusions montérégiennes	Zone externe des Appalaches	Zone interne des Appalaches
Nom du contexte (court)	Plate-forme nord	Plate-forme sud	Montérégiennes	Appalaches externes	Appalaches internes
Région physiographique	Basses-terres (B-T) nord	Basses-terres sud	Collines montérégiennes	Piedmont appalachien	Hautes-terres (H-T) appalachiennes
Localisation et superficie	Partie de la Plate-forme allant des Montérégiennes jusqu'à la limite nord-ouest de la région, où la couverture argileuse est de plus de 10 m d'épaisseur (~ 2 600 km^2)	Partie de la Plate-forme allant des Montérégiennes jusqu'à la limite sud-ouest de la région, où la couverture argileuse est de moins de 10 m d'épaisseur (~ 2 200 km^2)	Au centre de la région, sur une bande s'étendant d'ouest en est à travers les B-T jusqu'aux Appalaches. (~ 150 km^2)	Partie centrale de la région, entre les B-T et les H-T, orientée SSO-NNE. Délimitée par la Ligne de Logan à l'ouest et la faille de Oak Hill à l'est (~ 2 300 km^2)	Partie est et sud-est de la région (~ 1 800 km^2)
Topographie	Plaine généralement sous 60 m d'altitude.	Plaine légèrement ondulée dont l'altitude va de 60 à 110 m.	Collines massives et arrondies s'élevant généralement à plus de 200 m au-dessus de la plaine et du Piedmont.	Relief ondulé selon des alignements NNE-SSO et s'élevant progressivement vers l'est. Incisé de quelques vallées appalachiennes.	Zone de plateaux et de collines/montagnes arrondies, incisée par un réseau orthogonal de grandes vallées. Altitude généralement > 225 m.
Hydrographie	Principaux cours d'eau (Richelieu et Yamaska) s'écoulant du sud au nord et multitude de petits cours d'eau et fossés. Zone bordée par le fleuve St-Laurent au nord-ouest.	Drainée par le Richelieu et ses affluents (ex. : rivières l'Acadie, Lacolle, du Sud). La Baie Missisquoi est située à l'extrémité sud et le bassin de Chambly à l'extrémité nord.	Petits cours d'eau secondaires mais dont le gradient hydraulique est élevé.	Principaux affluents de la riv. Yamaska (riv. Noire, Yamaska Sud-Est et Nord) et baie Missisquoi (riv. aux Brochets). Plans d'eau régionaux (réserv. Choinière, lacs Roxton, Boivin et Davignon).	Cours d'eau de tête des bassins Yamaska et Baie Missisquoi (riv. Yamaska Sud-Est, Missisquoi et Sutton). Lac Brome et autres plus petits lacs (Waterloo, Trousers, Selby, d'Argent, Orford).
Géologie du roc	Roches sédimentaires paléozoïques peu déformées à l'ouest de la Ligne de Logan (principalement shales et grès des groupes de Queenston et de Lorraine)	Roches sédimentaires paléozoïques peu déformées à l'ouest de la Ligne de Logan (surtout grès, dolomies, calcaires, mudstones et shales des groupes de Beekmantown, Chazy, Black River, Trenton, Ste-Rosalie et Lorraine).	Intrusifs et dykes mafiques et felsiques d'âge Crétacé, (monts St-Bruno, St-Hilaire, St-Grégoire et Rougemont dans les B-T; mont Yamaska dans le Piedmont; monts Brome et Shefford à la transition du Piedmont et des H-T)	Nappes de chevauchement externes (domaine allochtone). Principalement des ardoises, schistes, grès, et calcaires).	Nappes de chevauchement internes (domaine allochtone). Surtout roches méta-sédimentaires et méta-volcaniques déformées (schiste, ardoise, quartzite), quelques intrusifs mafiques et complexes ophiolitiques.

Géologie du Quaternaire	Épaisse couverture argileuse (> 10 m) surmontée de sédiments sableux littoraux peu épais et, localement, de sédiments alluviaux plus épais (près de Sorel). Par endroits, sédiments grossiers sous l'argile (incluant till) > 10 m.	Plaine de till recouverte de sédiments sableux et argileux relativement discontinus et généralement peu épais (< 5 m).	Roc affleurant ou faible couverture de dépôts glaciaires et localement littoraux (anciennes plages).	Plaine de till plutôt mince et recouverte de sédiments sablo-graveleux littoraux minces et discontinus. Couverture argileuse peu épaisse (5-10 m) dans les vallées. Eskers enfouis ou affleurants.	Roc affleurant ou till mince et discontinu sur les hauts topographiques. Couverture argilo-silteuse glaciolacustre dans les vallées principales, avec possibilité de sédiments fluvioglaciaires sous-jacents ou affleurants.
Séquence de sédiments quaternaires	Sables généralement minces (< 3 m) et discontinus (sauf au nord de la zone où l'épaisseur est de 10-20 m); argile épaisse (10 à > 35 m, avec moyenne de 22 m) recouvrant roc ou till et/ou amas étendus granulaires grossiers (> 10 m).	Argile discontinue et mince (< 5 m, moyenne de 2.4 m), sauf en bordure de riv. Richelieu, où elle approche 20 m localement. L'argile recouvre généralement le till et, localement, d'autres sédiments grossiers ou le roc.	Till mince (< 5 m) discontinu sur roc. Sédiments gravelo-sableux sur leur pourtour, surtout du côté sud (> 15 m).	Sables et graviers littoraux minces (< 3 m) et discontinus recouvrant principalement du till mince (< 5 m) ou roc. Couverture argileuse des vallées surmonte localement sédiments grossiers d'origine fluvioglaciaire (<15 m).	Till mince (< 5 m) sur roc sur hauts topo., et plus épais dans le bas des versants. Dans les vallées, silts argileux (2-10 m; moyenne de 0.6 m) reposant par endroits sur des amas de sédiments grossiers (< 15 m en général).
Épaisseur totale des sédiments quaternaires	Environ 0 à 85 m (moyenne de 29.4 m; écart-type de 14.2 m).	Environ 0 à 30 m (moyenne de 8.2 m; écart-type de 4.6 m).	Généralement < 5 m, sauf au pourtour où les épaisseurs peuvent atteindre > 30 m par endroits (moyenne de 5.9 m; écart-type de 4.7 m).	Généralement < 5 m sur les hauts topographiques mais jusqu'à >15 m dans les vallées (moyenne de 7.5 m; écart-type de 4.9 m; plage de 0.5 à 46 m).	Généralement < 5 m sur les hauts topographiques mais jusqu'à > 30 m dans les vallées (moyenne de 6.6 m; écart-type de 5.3 m; plage de 0.1 à 67.1 m).
Topographie du roc	Relativement plane avec de grands « sillons » SSO-NNE passant entre les Montérégiennes. Dépression (< -30 m NMM) à l'extrémité nord (Sorel / Lac St-Pierre).	Relativement plane, mais ondulée, et se relevant graduellement vers le sud. Paléovallée sous la rivière Richelieu.	Massifs rocheux arrondis surplombant les surfaces rocheuses environnantes.	Alignements de crêtes NNE-SSO aplanies et recoupées par des paléovallées peu profondes.	Fortes élévations et vallées encaissées avec des orientations générales NNE-SSO. Nombreuses zones de surcreusement dans les paléovallées.

Aquifères et aquitards	Aquifère superficiel marginal : sable (< 3 m) Aquitard : argiles lacustre et marine (10 - >35 m) Aquifères granulaires potentiels : sédiments indifférenciés sous l'argile, pouvant inclure des unités perméables (ex. : sable) et semi-perméables (ex. : till) (moyenne de 6.1 m). Le roc fracturé constitue l'aquifère régional.	Aquitard : argile discontinue (< 5 m) Aquifères granulaires potentiels : sédiments indifférenciés sous l'argile, pouvant inclure des unités perméables (ex. : sable) et semi-perméables (ex. : till) (moyenne de 5.5 m). Le roc fracturé constitue l'aquifère régional.	Aquifères granulaires exploités et aquifères granulaires potentiels (> 15 m), surtout du côté sud des collines. Roc fracturé des intrusifs, et possiblement des dykes, en lien avec les unités des B-T.	Aquifères granulaires potentiels dans les vallées. Le roc fracturé constitue l'aquifère régional.	Aquifères granulaires exploités dans plusieurs vallées (ex. : vallées des rivières Sutton, aux Brochets, Yamaska et de certains affluents du Lac Brome). Le roc fracturé constitue l'aquifère régional.
Conductivité hydraulique (*K*) et transmissivité (*T*) (tendance régionale)	Tendance à la décroissance de la transmissivité (T, m^2/s) avec la profondeur dans le roc (z, m) observée dans tous les contextes. Les courbes de $T(z)$ des différents contextes sont similaires et près de la courbe globale incluant tous les contextes de la région : $\log_{10} T(z) = 116 / (z + 41.7) - 6.26$. L'équation équivalente, pour la conductivité hydraulique (K) (m/s) est $\log_{10} K(z) = 149 / (z + 31.6) - 8.52$. L'équation de $K(z)$ suggère une valeur moyenne de $10^{-3.9}$ m/s près du toit du roc (z = 1 m) qui, progressivement, perd un ordre de grandeur à une profondeur de 10 m ($10^{-4.9}$ m/s), à 25 m ($10^{-5.9}$ m/s), à 60 m ($10^{-6.9}$ m/s) puis à 200 m ($10^{-7.9}$ m/s). Les statistiques ci-dessous sont données à titre illustratif puisque, comme mentionné à la section 4.1, les valeurs estimées de conductivité hydraulique sont caractérisées par un biais induit par la profondeur des puits dans le roc, qui diffère significativement d'un contexte à un autre.				
Conductivité hydraulique (*K*) (statistiques par contexte)	*K* médiane : $10^{-6.0}$ m/s Plage : $10^{-7.3}$ à $10^{-4.7}$ m/s	*K* médiane : $10^{-5.0}$ m/s Plage : $10^{-6.5}$ à $10^{-3.8}$ m/s	*K* médiane : $10^{-6.6}$ m/s Plage : $10^{-7.9}$ à $10^{-5.3}$ m/s	*K* médiane : $10^{-6.2}$ m/s Plage : $10^{-7.3}$ à $10^{-4.8}$ m/s	*K* médiane : $10^{-6.5}$ m/s Plage : $10^{-7.8}$ à $10^{-5.4}$ m/s
	Plage définie entre les 10e et 90e percentiles.				
Profondeur des puits au roc	Prof. médiane : 21 m Plage : 6 à 63 m	Prof. médiane : 12 m Plage : 4 à 38 m	Prof. médiane : 52 m Plage : 23 à 95 m	Prof. médiane : 31 m Plage : 8 à 71 m	Prof. médiane : 43 m Plage : 16 à 78 m
	Plage définie entre les 10^e et 90^e percentiles.				
Confinement / Vulnérabilité	Conditions principalement captives, sauf localement (ex. : SE de Contrecoeur et Varennes, ainsi que le long de certains tronçons de la rivière Yamaska).	Conditions semi-captives prédominantes, avec des conditions captives et libres par endroits.	Conditions libres sur les Montérégiennes et semi-captives ou captives à leur pourtour.	Conditions semi-captives dominantes mais grandes étendues en conditions libres; la vallée de la riv. Noire est généralement en condition captive.	Conditions généralement libres sur les hauts topographiques (par endroits semi-captives). Conditions semi-captives ou captives dans les vallées.
Recharge HELP (moyenne : 97.8 mm/an)	13.8 mm/an	100.1 mm/an	174.6 mm/an	114.7 mm/an	183.1 mm/an

Zones de recharge	Recharge nulle à faible. Zone potentielle de faible recharge au sud-est de Varennes. La couche d'argile limite toute recharge significative.	Recharge modérée à travers le till dans les zones semi-captives.	Zones de recharge relativement importantes pour les collines situées dans le contexte des B-T.	Recharge modérée à faible dans vallée de la riv. Noire. Recharge locale potentielle dans autres secteurs.	Grandes zones de recharge sur les hauts topographiques.
Zones de résurgence	Résurgence importante dans une portion de la riv. Yamaska (entre St-Hugues et St-Hyacinthe). Résurgence diffuse par endroits et faible dans autres cours d'eau où l'argile est plus mince. Résurgence au fleuve peu probable à cause de l'argile épaisse	Résurgence prédominante le long de la riv. Richelieu (surtout dans portion entre le contact géologique du Trenton/Lorraine) et dans le bassin Chambly. Résurgence locale au front du Piedmont et vers la Baie Missisquoi.	Peu ou pas de zones de résurgence sur les collines elles-mêmes mais résurgence locale identifiée au pourtour de certaines des collines.	Résurgence discontinue dans vallée de riv. Noire. Zone de résurgence régionale au front ouest (front des nappes externes). Les parties sud et nord-est de ce contexte seraient des zones de résurgence régionales d'eau appalachienne.	Résurgence locale dans les vallées et autres terrains plus bas de la partie ouest de ce contexte.
Patron d'écoulement	Écoulement généralement faible. Alimentation potentielle par les Montérég. et écoulement dominant est-ouest avec résurgence diffuse dans les cours d'eau. Apport limité du Piedmont à l'est.	Écoulement orienté est-ouest, des zones de recharge vers la riv. Richelieu ou vers autres zones de résurgence. Présence d'un faible haut piézo. dans secteur est (St-Alexandre).	Écoulement radial à partir du sommet des collines.	Écoulement, partant des hauts topographiques, et autres zones de recharge, vers le front ouest du contexte et aussi dans la vallée de la rivière Noire.	Écoulement local à partir des hauts topographiques vers les vallées. Écoulement intermédiaire à régional, plus profond, émergeant dans le Piedmont.
Géochimie	Eau saumâtre (~2200 km^2) et eau de types M3 (mélange avec mer de Champlain) dans la moitié sud et MC (mer de Champlain) dans la moitié nord. Eau de types M1 et M2 en périphérie sud et est de ce contexte.	Eau généralement de type BT (recharge B-T) avec eau de type M1 (Montérégiennes) au sud des montérégiennes ainsi que le long de la riv. Richelieu. Type d'eau M2 (mélange M1 et BT) au sud le long du Richelieu.	Eau de type A1 (recharge) ainsi que A3 (évoluée appalachienne) pour les collines à l'ouest, ou A2 (appalachienne évoluée) pour les collines à l'est.	Eau de type BT (recharge B-T) autour de vallée de riv. Noire. Eau de types M1 (Montérég.) et M2 (mélange M1 et BT) à la limite ouest (moitié nord). Eau A3 (influence marine – appal.) et A2 (appal. évoluée) dans moitié sud.	Eau A1 (recharge appalachienne) et A2 (appalachienne évoluée) sur les hauts topographiques et dans les vallées et parties basses du contexte.
Qualité d'eau	Eau généralement non potable. Dépassement des critères de potabilité en Ba et F, et de nombreux critères esthétiques, (Cl, Na, Fe et Mn ainsi que SO_4 et S).	Dépassements d'ordre esthétique fréquents pour Fe, Mn et dureté ainsi que pour S, Na et F dans la zone centrale uniquement.	Un dépassement d'ordre esthétique en Fe et Mn. Peu de données disponibles.	Dépassements d'ordre esthétique fréquents pour Fe et Mn ainsi que S.	Dépassements d'ordre esthétique associés au type d'eau A2 (Fe et S, et plus souvent pour Mn). Dépassement notable du critère de potabilité pour U dans le secteur centre.

Sur la coupe du modèle conceptuel montrant la géologie, on présente les unités géologiques du roc, leurs lithologies ainsi que les principales failles cartographiées. La coupe montre aussi l'assemblage de sédiments superficiels recouvrant le roc. Sur la deuxième coupe représentant les conditions hydrogéologiques, on montre de façon schématique les directions d'écoulement et on indique si les conditions rencontrées en surface correspondent à des zones de recharge ou plutôt à des zones de transition ou de résurgence de l'eau souterraine. Les conditions de confinement de l'aquifère au roc sont aussi indiquées à la base de la coupe (libre, semi-captif ou captif). Cette coupe distingue aussi la nature aquifère ou aquitard des unités géologiques et elle indique l'importance relative du débit de puits qui pourraient s'approvisionner dans les différentes conditions aquifères de ce secteur. La troisième coupe du modèle conceptuel portant sur la qualité d'eau montre la vulnérabilité de l'aquifère rocheux, les types d'eau présents dans cet aquifère et les principaux problèmes de qualité d'eau rencontrés.

Le premier modèle conceptuel représente la transition entre la zone externe des Appalaches (Piedmont) et la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres) sur la base d'une coupe, orientée du sud-est vers le nord-ouest, et située dans le nord-est de la région d'étude (figure 4.16). Cette coupe passe à proximité de Roxton Falls et Saint-Liboire et croise la rivière Yamaska. Dans ce secteur, il y a une utilisation d'eau souterraine relativement importante dans les Appalaches (zones interne et externe) où des puits résidentiels et municipaux exploitent principalement l'aquifère régional de roc fracturé. Au niveau des sédiments superficiels, on retrouve dans ce secteur des sédiments fins dans la Plate-forme du Saint-Laurent et les vallées. Des sédiments peu à moyennement perméables (till) se retrouvent sur les hauts topographiques. Enfin, des sédiments perméables sont présents dans les vallées (en surface ou enfouis) et en couverture mince le long des rivières. On voit sur la coupe de la figure 4.17 que dans la zone externe des Appalaches se retrouvent des roches métamorphiques ayant une perméabilité faible à moyenne. Ce roc peut être plus fracturé autour des failles, mais surtout dans les premiers mètres sous la surface du roc (section 4.1). Les roches sédimentaires retrouvées dans les Basses-terres ont une perméabilité moyenne pour la région. Au niveau des dépôts meubles, on peut retrouver des dépôts plus perméables par endroits dans les vallées des Appalaches. Les dépôts meubles sont plus épais dans les vallées, mais encore plus dans les Basses-terres où de fortes épaisseurs de sédiments fins sont présentes. La topographie et la nature des dépôts meubles contrôlent en partie les conditions d'écoulement de l'eau souterraine.

Au niveau de l'écoulement de l'eau souterraine (figure 4.18), ce secteur est caractérisé par un écoulement restreint à l'ouest de la rivière Yamaska qui est indiqué par de très faibles gradients hydrauliques. Il y aurait une résurgence significative de l'eau souterraine dans les cours d'eau et aux endroits avec changements de pente abruptes, tel qu'à la limite ouest du Piedmont. Les zones de recharge se retrouvent dans les zones élevées avec dépôts perméables présents en surface et les fluctuations de niveau d'eau sont plus importantes dans ces zones de recharge. Au niveau du potentiel d'exploitation de l'eau souterraine, l'aquifère granulaire est exploité par certaines municipalités dans les vallées (conditions de confinement variables), tandis que l'aquifère régional de roc fracturé est exploité par des puits résidentiels et municipaux.

Ces conditions d'écoulement ainsi que l'histoire géologique de la région influencent la qualité d'eau souterraine naturelle qui peut être rencontrée dans ce secteur (figure 4.19). On retrouve de l'eau souterraine de meilleure qualité dans ou près des zones de recharge. Par contre, il y a dégradation de la qualité naturelle de l'eau souterraine en bordure de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres). Cette dégradation est causée en partie par la présence d'eau naturelle saumâtre d'origine marine (à l'ouest de la rivière Yamaska) et par le type de roche. Bien que l'eau soit de meilleure qualité près des zones de recharge, ce sont aussi des zones qui sont plus vulnérables à la contamination. Dans la zone externe des Appalaches (Piedmont), les dépassements typiques de critères sont surtout de nature esthétique et concernent surtout le fer (Fe) et le manganèse (Mn). Dans le Piedmont, on retrouve un possible mélange d'eau de

recharge avec une eau plus évoluée et plus chargée en composés dissous provenant des Appalaches. À la limite du Piedmont et dans les Basses-terres, les dépassements de critères de potabilité sont relativement fréquents pour le baryum (Ba) et le fluor (F), ainsi que les dépassements de critères esthétiques pour le sodium (Na) et le chlorure (Cl).

Le deuxième modèle conceptuel chevauche le Mont Rougemont et présente les conditions retrouvées au nord et au sud de cette Montérégienne (figure 4.16). Ce secteur est ainsi représentatif des zones nord et sud de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres). L'utilisation d'eau souterraine est importante dans la partie sud de ce secteur où des puits municipaux exploitent des aquifères granulaires et des puits résidentiels exploitent l'aquifère de roc fracturé. Au niveau des sédiments superficiels, il y a une présence significative de sédiments fins au nord de cette montérégienne, tandis qu'on retrouve des sédiments peu à moyennement perméables (till) du côté sud. Des sédiments perméables sont présents surtout en couverture mince le long des rivières et au pourtour de cette Montérégienne.

La première coupe de ce modèle illustrant les conditions géologiques montre l'important contraste entre le nord et le sud de la Montérégienne (figure 4.20). L'intrusif de la Montérégienne et les dykes qui lui sont associés percent à travers les roches sédimentaires qui sont présentes en lits relativement horizontaux. Le roc est plus perméable dans la zone fracturée près de la surface du roc et il pourrait aussi être plus fracturé près des intrusions montérégiennes ou des dykes. La topographie de la surface du roc est à environ 50 m plus bas au nord de la Montérégienne par rapport au niveau retrouvé du côté sud. Dans cette dépression du roc du côté nord, on retrouve des dépôts peu perméables qui sont beaucoup plus épais que du côté sud où on retrouve plutôt des dépôts perméables enfouis ou partiellement enfouis.

La deuxième coupe du modèle conceptuel montre les conditions d'écoulement (figure 4.21). Dans ce secteur, l'écoulement est restreint au nord des montérégiennes. Ailleurs, l'écoulement de l'eau souterraine est semblable à celui de l'eau de surface au niveau régional. Les zones de recharge principales se trouvent sur les Montérégiennes et dans les zones avec des dépôts semi-perméables ou perméables. Il y a résurgence significative d'eau souterraine dans les cours d'eau pour la partie sud, mais elle est faible (locale et diffuse) à inexistante pour la partie nord à cause de l'épais couvert argileux. La coupe montre donc un patron d'écoulement allant de la Montérégienne surtout vers le sud et dans la zone fracturée ou en surface. La difficulté de résurgence de l'eau souterraine du côté nord, causé par la présence d'argile épaisse, ne permet pas un écoulement important dans cette direction. L'exploitation de l'eau souterraine du côté nord est relativement limitée bien qu'il y ait quelques puits de surface privés exploitant les aquifères granulaires de faible épaisseur (utilisés notamment pour l'approvisionnement agricole). L'aquifère régional de roc fracturé est principalement exploité par des puits privés du côté sud, ce qui n'est pas possible du côté nord à cause de la présence d'eau saumâtre. Le côté sud de la Montérégienne présente aussi un potentiel aquifère intéressant dans un aquifère granulaire, qui est d'ailleurs exploité par des municipalités. Cet aquifère granulaire est d'étendue restreinte et il est en condition semi-captive ou libre par endroits.

Dans ce secteur, l'eau est de meilleure qualité dans ou près des zones de recharge (figure 4.22). Ces zones de recharge sont aussi plus vulnérables. Ces eaux présentent des dépassements de critères esthétiques reliés au fer (Fe) et au manganèse (Mn). Il y a un mélange possible des eaux de recharge avec des eaux souterraines plus évoluées et chargées en solutés autour des montérégiennes. La coupe montre que les dépassements typiques autour des montérégiennes au niveau de la potabilité sont reliés au fluorure (F), tandis que les dépassements de critères esthétiques sont reliés au sodium (Na) et au sulfure (S). Il y a présence d'eau saumâtre non potable au nord qui représente de l'eau de la mer Champlain qui a été peu diluée étant donné l'écoulement restreint d'eau souterraine de ce côté.

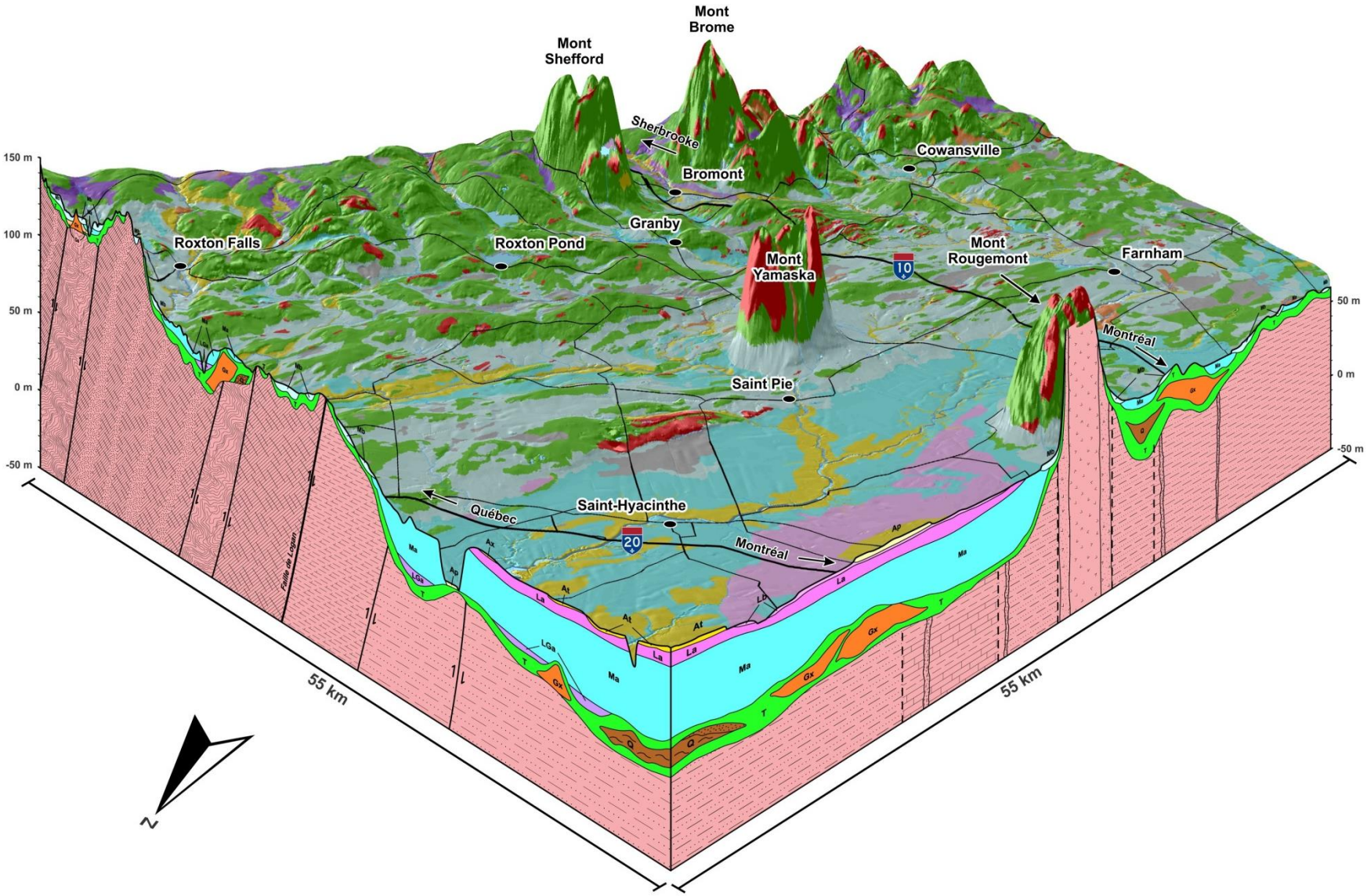


Figure 4.16 : Localisation des coupes pour les modèles conceptuels

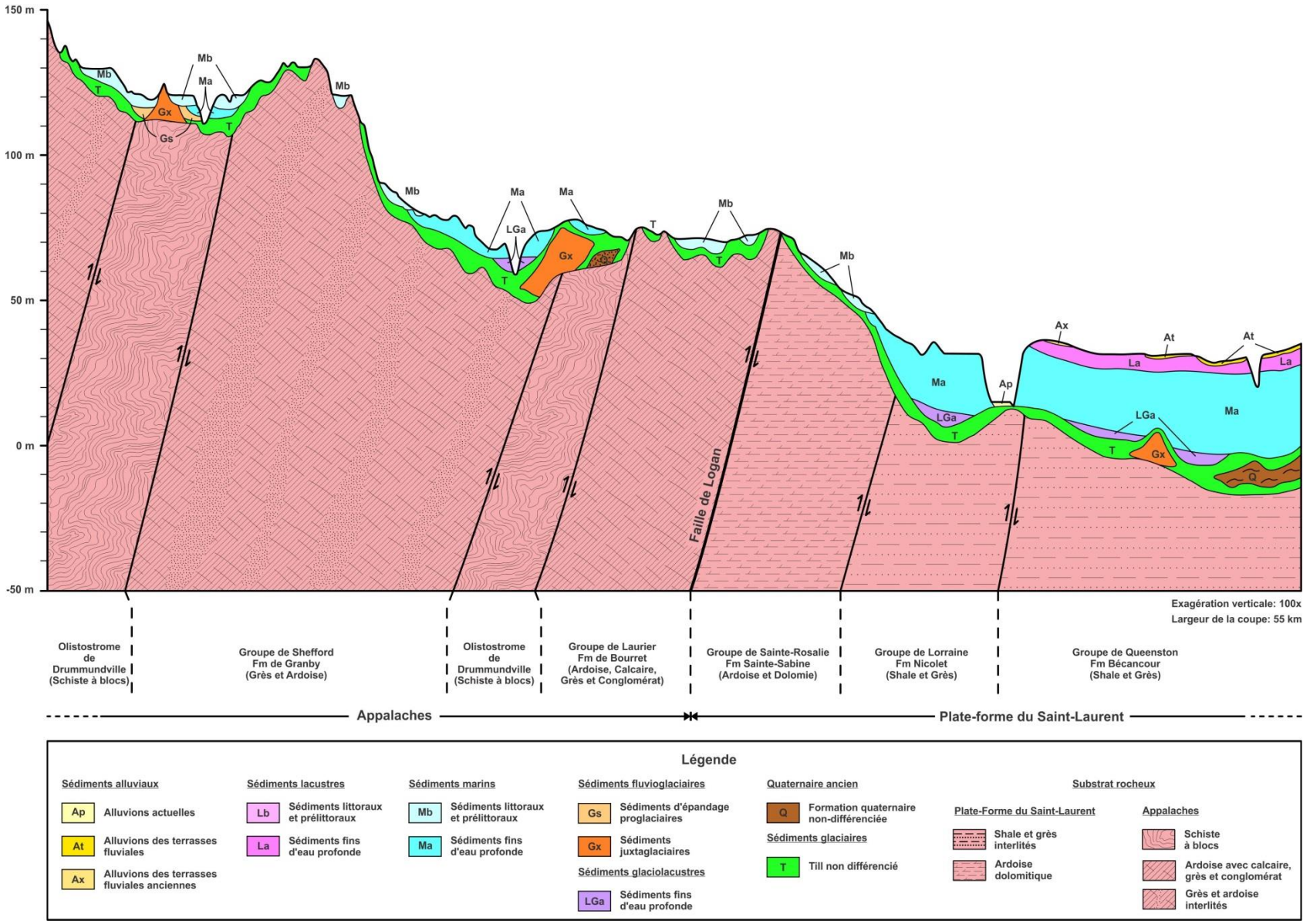


Figure 4.17 : Volet géologie du modèle conceptuel traversant une partie des Appalaches et de la Plate-forme du Saint-Laurent

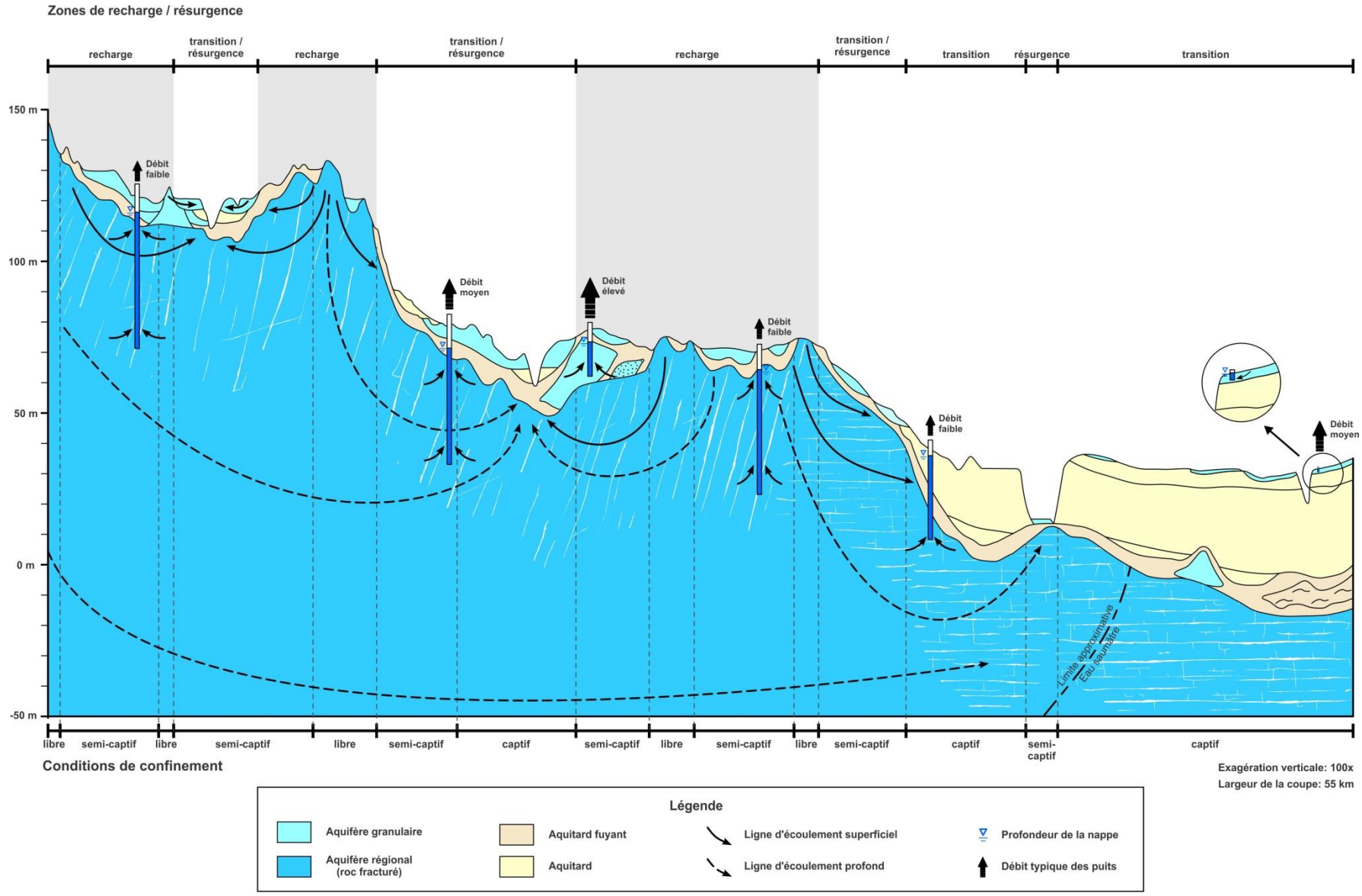


Figure 4.18 : Volet écoulement du modèle conceptuel traversant une partie des Appalaches et de la Plate-forme du Saint-Laurent

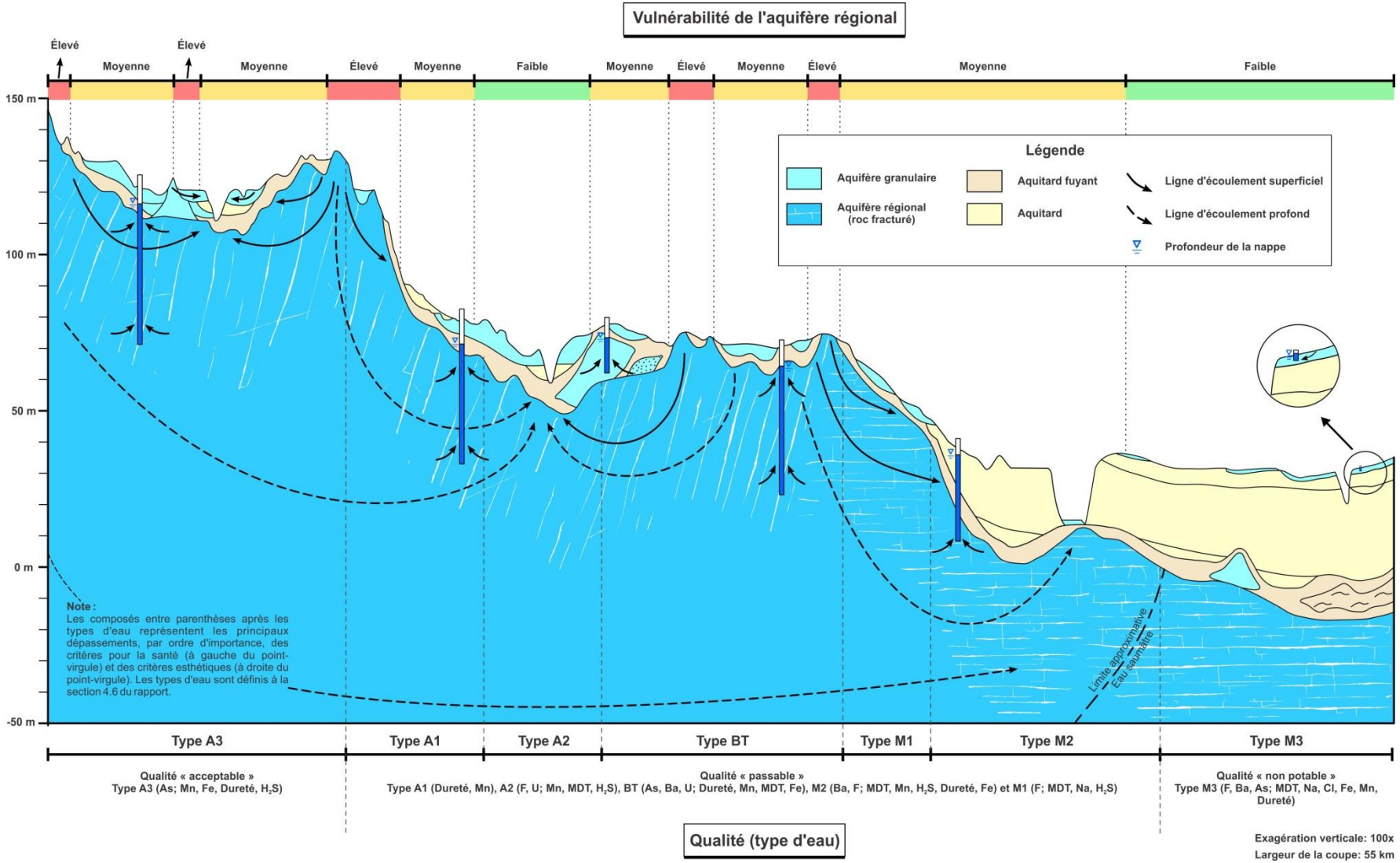


Figure 4.19 : Volet qualité d'eau du modèle conceptuel traversant une partie des Appalaches et de la Plate-forme du Saint-Laurent

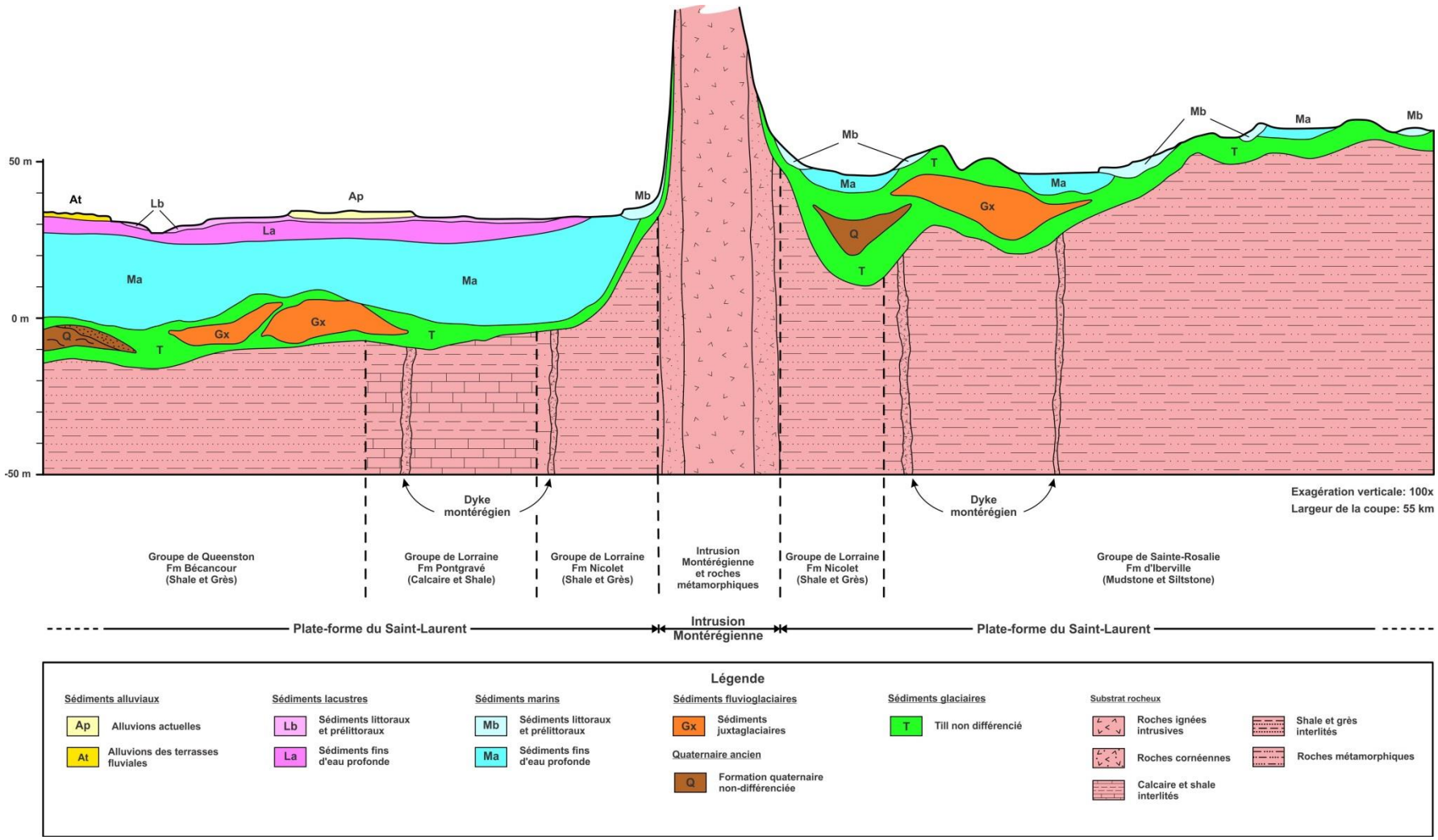


Figure 4.20 : Volet géologie du modèle conceptuel traversant le mont Rougemont et une partie de la Plate-forme du Saint-Laurent

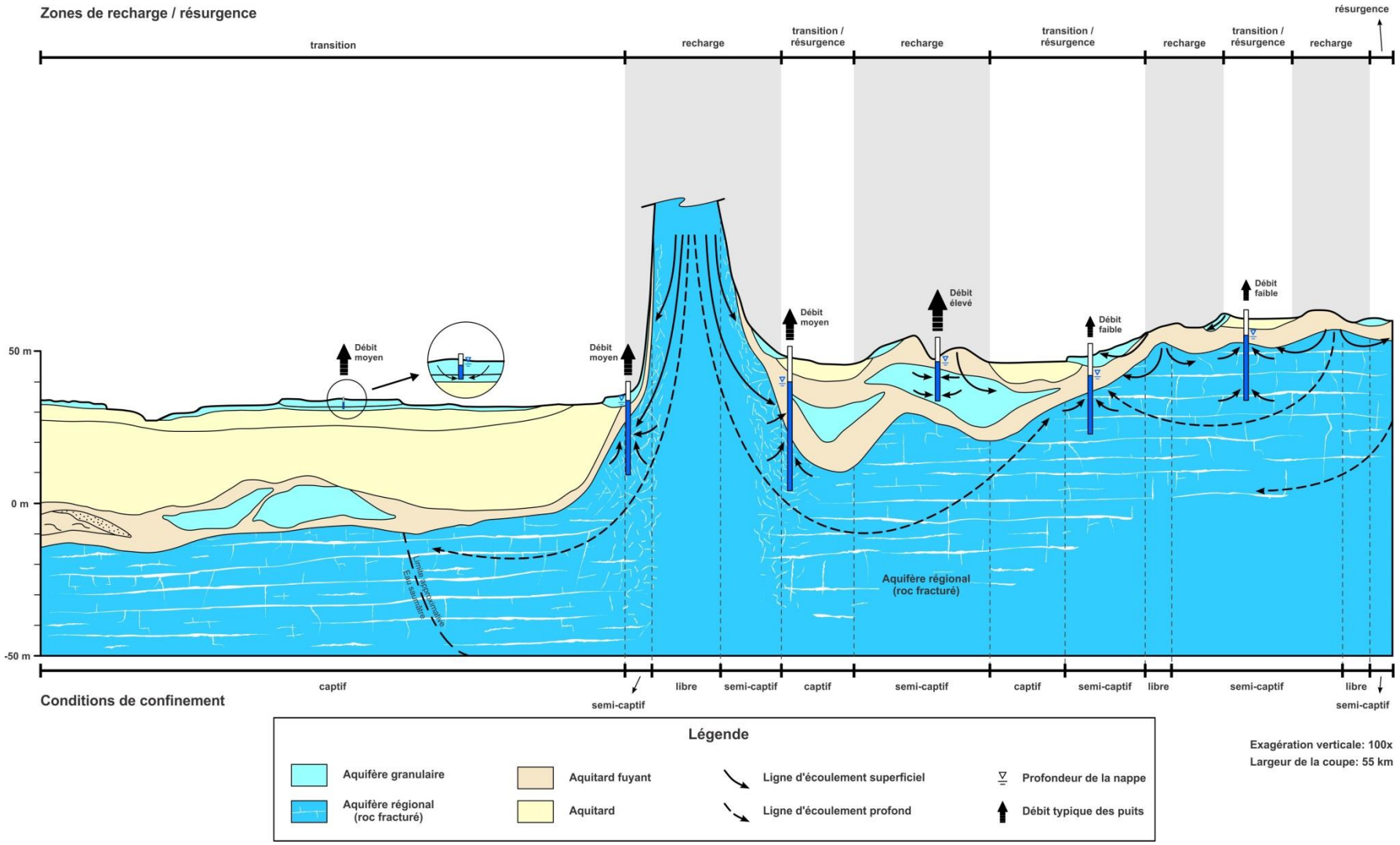


Figure 4.21 : Volet écoulement du modèle conceptuel traversant le mont Rougemont et une partie de la Plate-forme du Saint-Laurent

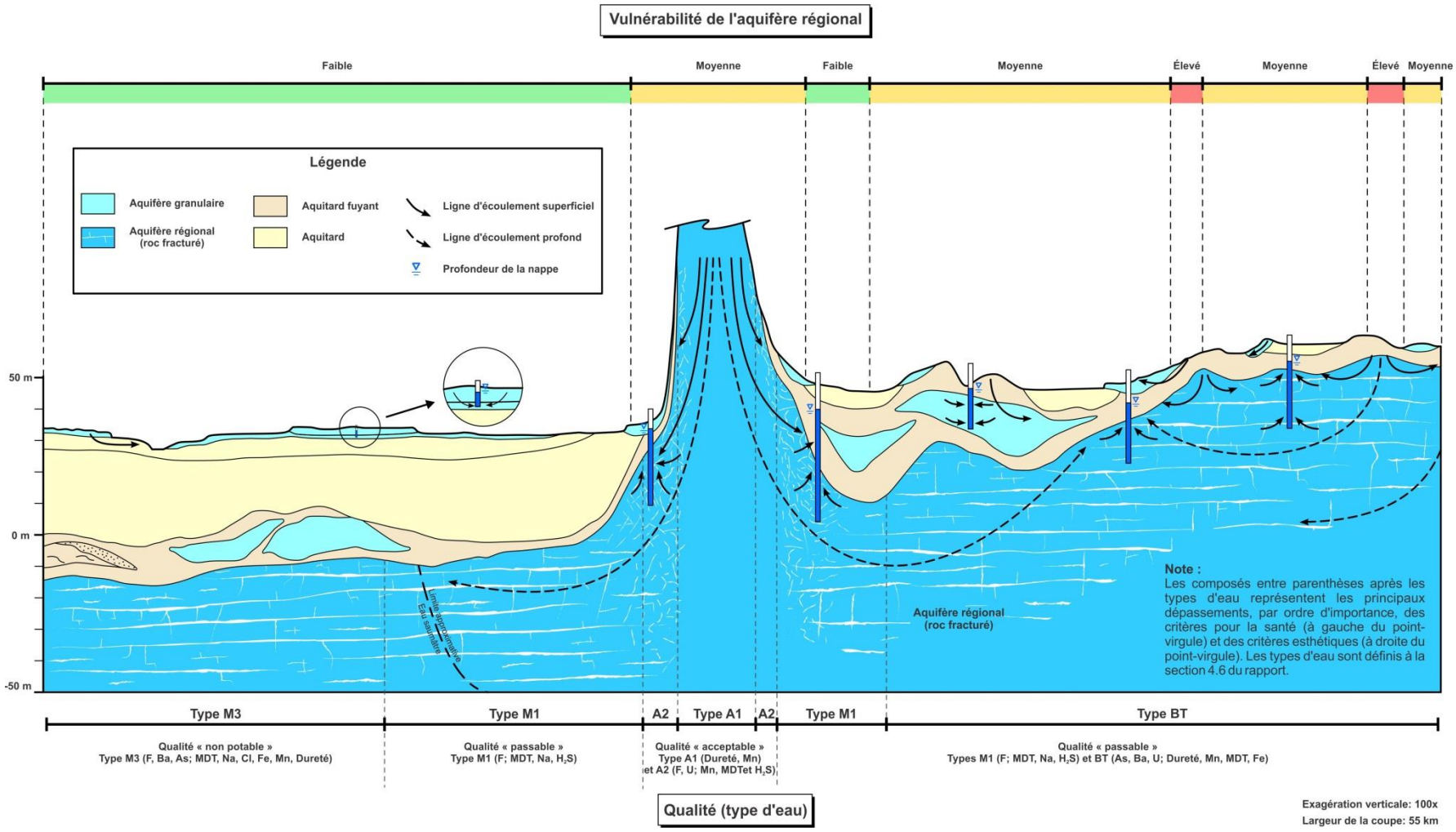


Figure 4.22 : Volet qualité d'eau du modèle conceptuel traversant le mont Rougemont et une partie de la Plate-forme du Saint-Laurent

5 RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

5.1 Sources d'approvisionnement en eau

5.1.1 Synthèse des sources d'approvisionnement municipal

La carte du livrable 26 présente les sources d'approvisionnement en eau des municipalités de la Montérégie Est. Cette carte a été préparée à l'aide des données obtenues du Répertoire des réseaux municipaux de distribution d'eau potable (MDDEFP, 2011) et des informations collectées directement auprès des municipalités dans le cadre du projet. La source d'approvisionnement spécifiée concerne les réseaux municipaux de distribution d'eau potable et ne tient donc pas compte des prélèvements privés tel que les puits résidentiels ou commerciaux. Les données concernant ces prélèvements privés sont toutefois comptabilisées dans le bilan d'utilisation d'eau présenté à la section 5.2. Le tableau 5.1 résume les informations disponibles sur les sources d'approvisionnement par municipalité régionale de comté (MRC) tandis que les données détaillées par municipalités sont présentées à l'annexe 6.

Dans la région d'étude, un peu plus de 20 % des réseaux municipaux utilisent l'eau souterraine comme source d'approvisionnement tandis que l'eau de surface alimente presque tous les autres réseaux (~ 75 %). Moins de 5 % des réseaux ont des sources d'approvisionnement mixtes (eau de surface et souterraine). La partie nord-ouest de la région d'étude, correspondant approximativement à la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres nord), est presqu'entièrement desservie par des réseaux approvisionnés par de l'eau de surface étant donné la présence d'une zone d'eau souterraine saumâtre (voir section 4.6). Les principales sources d'approvisionnement pour ces réseaux sont les rivières Richelieu et Yamaska ainsi que le fleuve Saint-Laurent. Dans la partie sud-ouest de la région (Basses-terres sud), environ le tiers des municipalités ne possèdent pas de réseau de distribution d'eau potable ; pour les résidents, commerçants, industries et agriculteurs de ces municipalités, l'eau souterraine représente généralement la principale source d'approvisionnement en eau. Pour les autres municipalités pour ce secteur, l'approvisionnement des réseaux municipaux provient principalement de l'eau de surface, surtout pour les municipalités situées le long de la rivière Richelieu. Moins d'une demi-douzaine de réseaux municipaux s'approvisionnent via l'eau souterraine dans ce secteur. Dans les Appalaches (zones interne et externe), près de la moitié des municipalités ne sont pas desservies par un réseau de distribution d'eau. Pour les municipalités avec réseau dans ce secteur, la source d'approvisionnement principale est l'eau souterraine (~ 27 % des réseaux), suivi de l'eau de surface (~ 23 %) et d'une combinaison d'eau de surface et d'eau souterraine (~ 2 %). Les principales municipalités (population > 2 000) dont les réseaux sont alimentés par de l'eau souterraine sont Upton, Brigham, Lac-Brome, Saint-Germain-de-Grantham, Roxton Pond, Saint-Liboire, Waterloo, Saint-Alexandre, Napierville, Rougemont et Saint-Césaire.

5.1.2 Portrait des puits d'approvisionnement municipaux

La plupart des réseaux de distribution d'eau s'approvisionnant en eau souterraine exploitent les aquifères via des puits de captage. La présente section dresse le portrait de ces puits d'approvisionnement municipaux et de leurs propriétés, fournissant un aperçu de la capacité d'exploitation des ressources en eau souterraine dans certains secteurs de la région d'étude.

5.1.2.1 Identification des puits municipaux et données disponibles

Dans la région d'étude, 75 puits municipaux ont été identifiés pour les 28 municipalités possédant un réseau de distribution d'eau approvisionné en partie ou en totalité par l'eau

souterraine (N.B. : aucune information n'a été obtenue sur les puits des municipalités d'Orford et de Saint-Pie-de-Guire). La localisation de ces puits est présentée sur la carte du livrable 26 et dans l'atlas hydrogéologique du projet tandis que les quantités d'eau exploitées au niveau municipal sont documentées à la section 5.2.

Tableau 5.1 : Sources d'approvisionnement en eau des réseaux de distribution pour les municipalités dans la zone d'étude

MRC	Réseau						Hors réseau	
	Eau de surface		Eau souterraine		Mixte			
	Pop. dess. (1)	Nb munic. dess. (2)	Pop. dess. (1)	Nb munic. dess. (2)	Pop. dess. (1)	Nb munic. dess. (2)	Pop. non dess.	Nb munic. non dess.
Acton	5 500 (36 %)	1	1 224 (8 %)	1	-	-	8 558 (56 %)	6
Brome-Missisquoi	28 612 (52 %)	5	3 733 (7 %)	4	2 735 (5 %)	1	20 148 (36 %)	11
Drummond	753 (9 %)	2	2 322 (29 %)	4	1 573 (19 %)	1	3 481 (43 %)	4
La Haute-Yamaska	45 270 (54 %)	1	5 964 (7 %)	3	-	-	32 900 (39 %)	4
La Vallée-du-Richelieu	112 328 (98 %)	13	-	-	-	-	2 624 (2 %)	0
Le Haut-Richelieu	82 690 (72 %)	7	2 112 (2 %)	2	-	-	29 335 (26 %)	5
Le Val-Saint-François	3 983 (66 %)	5	-	-	-	-	2 058 (34 %)	3
Les Jardins-de-Napierville	-	-	4 826 (45 %)	3	-	-	5 876 (55 %)	5
Les Maskoutains	69 427 (83 %)	13	2 270 (3 %)	2	1 441 (2 %)	1	10 008 (12 %)	1
Longueuil	136 652 (100 %)	4	-	-	-	-	-	-
Marguerite-D'Youville	72 714 (100 %)	6	-	-	-	-	-	-
Memphrémagog	472 (9 %)	1	910 (18 %)	3	-	-	3 687 (73 %)	3
Nicolet-Yamaska	15 (100 %)	1	-	-	-	-	-	-
Pierre-De-Saurel	50 352 (100 %)	12	-	-	-	-	-	-
Roussillon	1 916 (100 %)	2	-	-	-	-	-	-
Rouville	18 270 (53 %)	5	6 157 (18 %)	2	900 (3 %)	1	8 839 (26 %)	0
Total	**628 954 (79 %)**	**78**	**29 518 (4 %)**	**24**	**6 649 (1 %)**	**4**	**127 514 (16 %)**	**42**

Notes:

(1) : Population desservie par des réseaux de distribution d'eau pour les municipalités situées en partie ou en totalité dans la zone d'étude (nombre de personnes et % par rapport à la population estimée dans la zone d'étude)

(2) : Nombre de municipalités par MRC situées en partie ou en totalité dans la zone d'étude et desservies par un réseau de distribution d'eau (N.B.: certaines municipalités possèdent plus d'un réseau)

Les puits municipaux ont été identifiés principalement à l'aide des informations transmises par les municipalités ainsi que via la compilation d'études antérieures (rapport de forages, recherche en eau souterraine, implantation de nouveaux forages, mise aux normes des puits, études hydrogéologiques diverses, etc.). Certaines informations complémentaires proviennent également du système de gestion des prélèvements d'eau (GPE) du MDDEFP (2011b) et du Système d'Information Hydrogéologique (SIH) (MDDEFP, 2009). Ainsi, il convient de prendre ce nombre total de puits municipaux recensés avec précaution puisque les sources d'information consultées ont été publiées à différentes dates et qu'elles ont parfois fourni des informations contradictoires sur l'existence et l'utilisation actuelle de ces puits.

Étant donné les différentes sources d'information utilisées, la quantité et la qualité des données disponibles pour les puits municipaux est relativement variable. Pour certains puits, plusieurs types de données sont disponibles (ex. : conception du puits, propriétés hydrauliques, etc.), alors que pour d'autres, seules des informations de base ont pu être obtenues (principalement la localisation du puits et le type d'aquifère exploité). Compte tenu de cette limitation, le nombre de données sur lesquelles portent les analyses statistiques présentées dans les sections suivantes est indiqué afin de mettre les résultats en perspective.

5.1.2.2 Types d'aquifères exploités et conception des puits

Les puits municipaux répertoriés sont des puits tubulaires exploitant l'eau souterraine à partir du roc (principalement via les fractures) ou des puits de surface exploitant l'eau souterraine à partir des dépôts meubles. Sur les 75 puits municipaux identifiés, ~ 20 % sont aménagés dans les dépôts meubles, le reste correspondant à des puits tubulaires au roc (tableau 5.2). Le livrable 26 montre la localisation des puits municipaux et le type d'aquifère exploité par ces puits.

Les figures 5.1 et 5.2 illustrent certaines des caractéristiques de conception des puits municipaux à l'aide de diagrammes où les valeurs maximales et minimales sont représentées par les extrémités des lignes alors que la boîte représente les limites entre les 25^{e} et 75^{e} percentiles. Le diamètre moyen des tubages des puits municipaux pour lesquels des informations sur l'infrastructure étaient disponibles est de 20 cm (8 po) (figure 5.1) alors que la plage de valeur pour ces diamètres de puits est de 15 à 30 cm, avec des diamètres un peu plus importants en moyenne pour les puits dans les dépôts meubles.

La figure 5.2 présente quant à elle les plages de profondeur des puits municipaux, en distinguant les puits dans les dépôts meubles de ceux au roc. Les puits dans les dépôts meubles sont globalement d'une profondeur moindre par rapport à ceux aménagés dans le roc, avec des profondeurs généralement inférieures à 25 m. À l'inverse, les puits dans le roc fracturé interceptent l'aquifère sur des longueurs plus importantes (plus de 50 % des puits au roc le traversent sur plus de 70 m), avec une plage d'épaisseurs relativement variable. Ceci illustre notamment la variabilité locale caractérisant l'aquifère rocheux qui peut fournir des débits variables selon les sites, nécessitant parfois le forage d'ouvrages profonds afin d'assurer les débits requis par rapport aux besoins en eau des municipalités.

Enfin, à titre de comparaison, la figure 5.3 présente la fréquence cumulée des profondeurs des puits utilisés à d'autres fins (ex. : puits résidentiels, agricoles, ou autres). Leur plage de profondeur est inférieure à celle de l'ensemble des puits municipaux ainsi qu'à celle des puits municipaux au roc. Ceci s'explique encore une fois par le fait que les puits privés n'ont généralement pas à fournir des débits aussi importants que ceux des puits municipaux.

Tableau 5.2 : Tableau synthèse des puits municipaux selon le type d'aquifère exploité

MRC	Municipalité	Type d'aquifère exploité	Nombre de puits
Acton	Upton	Dépôts meubles	3
		Roc	1
Brome-Missisquoi	Abercorn	Roc	1
	Brigham	Dépôts meubles	1
	Farnham	Dépôts meubles	1
	Frelighsburg	Dépôts meubles	1
	Lac-Brome	Dépôts meubles	1
		Roc	1
	Sutton	Dépôts meubles	1
Drummond	Durham-Sud	Dépôts meubles	1
	Saint-Germain-de-Grantham	Roc	6
	Saint-Guillaume	Dépôts meubles	2
	Wickham	Dépôts meubles	1
		Roc	3
La Haute-Yamaska	Roxton Pond	Roc	3
	Warden	Dépôts meubles	3
		Roc	7
	Waterloo	Dépôts meubles	2
Le Haut-Richelieu	Saint-Alexandre	Dépôts meubles	3
Les Jardins-de-Napierville	Hemmingford	Roc	1
	Napierville	Roc	3
	Saint-Cyprien-de-Napierville	Roc	1
Les Maskoutains	Saint-Dominique	Roc	3
	Sainte-Hélène-de-Bagot	Roc	6
	Saint-Liboire	Roc	3
Memphrémagog	Potton	Dépôts meubles	1
	Stukely-Sud	Roc	1
Rouville	Rougemont	Dépôts meubles	3
		Roc	3
	Saint-Césaire	Dépôts meubles	3
	Saint-Paul-d'Abbotsford	Roc	5

5.1.2.3 Propriétés hydrauliques associées aux puits municipaux

Dans cette section, on s'intéresse principalement aux valeurs de capacité spécifique (*CS*) et de transmissivité (*T*) obtenues à partir des essais hydrauliques effectués sur les puits municipaux. À titre de comparaison, des statistiques de *CS* calculées pour d'autres types de puits sont aussi présentées (voir section 4.1).

Comme mentionné plus tôt, les données sur les propriétés hydrauliques caractérisant les aquifères (*T*, *K*, *S*) et l'efficacité d'un puits de pompage (*CS*) sont importantes car elles permettent d'évaluer « l'exploitabilité » des ressources en eau souterraine, qui se distingue de la « disponibilité » de ces ressources déterminée par la proportion de la recharge (section 4.3) qui peut être exploitée de façon durable.

Pour obtenir un portrait le plus complet possible, deux grands types de données hydrauliques ont été rassemblées pour les puits municipaux : 1) les résultats issus d'essais de pompage documentés dans des études antérieures et 2) les estimations de propriétés hydrauliques faites à partir des données du SIH (section 4.1). Si, pour un même puits, plusieurs valeurs de *CS* ou *T* étaient présentes, les données issues d'interprétations d'essais de pompage sont considérées comme étant plus fiables que les estimations basées sur *CS*. De même, si plusieurs essais de pompage ont été réalisés sur un même puits, les valeurs de *CS* et *T* jugées de meilleure qualité ont été utilisées.

Cette sélection a été faite au cas par cas, selon la date et le type d'essai effectué (ex. : les essais récents étaient préférés aux plus anciens). Pour les valeurs de *CS*, l'idée est d'avoir un débit et une durée de pompage les plus élevés possibles. Pour les valeurs de *T*, les essais de pompage de plus longues durées sont également préférés. De plus, les valeurs issues de ce type d'essai sont considérées comme plus représentatives à l'échelle régionale que celles des essais de perméabilité *in situ* (de type « *slug test* »). Compte tenu du nombre de puits municipaux pour lesquels des données de propriétés hydrauliques étaient disponibles, il convient de souligner que ce portrait global doit être considéré avec prudence.

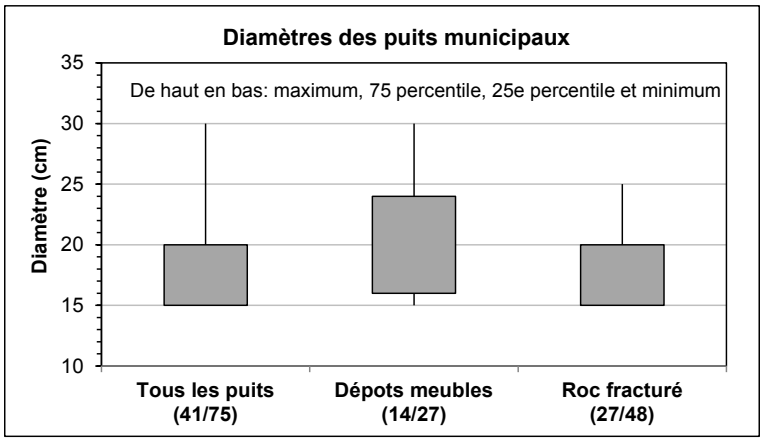


Figure 5.1 : Diamètres (cm) des tubages des puits municipaux selon l'aquifère capté (nombre de puits avec information entre parenthèses)

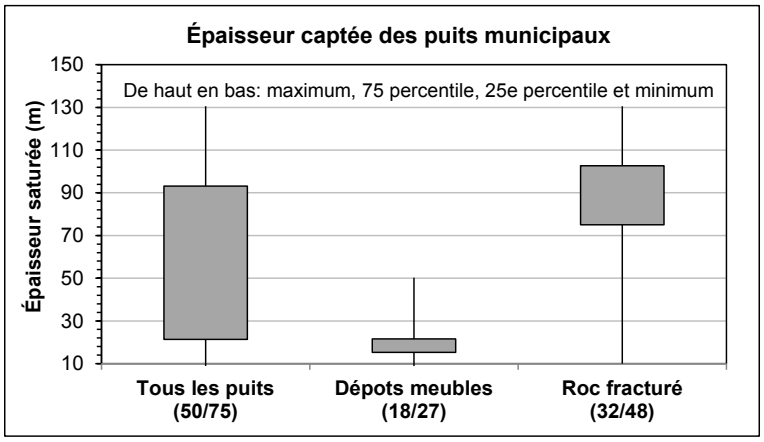


Figure 5.2 : Épaisseur captée (m) pour les puits municipaux selon l'aquifère exploité (nombre de puits avec information entre parenthèses)

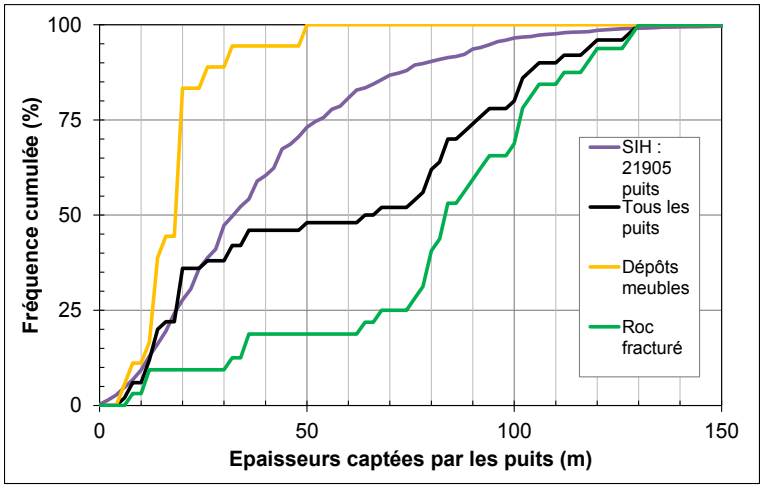


Figure 5.3 : Fréquences cumulées des épaisseurs captées pour les puits municipaux, selon l'aquifère exploité

La figure 5.4 montre que les puits municipaux dans les dépôts meubles présentent des capacités spécifiques, globalement, plus importantes que celles des puits dans le roc fracturé. De plus, la plage de variation des valeurs de *CS* est faible dans les dépôts meubles, contrairement au roc fracturé. À titre de comparaison, les puits utilisés à d'autres fins (ex. : résidentiels, agricoles, etc.) montrent aussi des capacités spécifiques variables, mais globalement inférieures à celles des puits municipaux (figure 5.5).

Un comportement similaire est observé dans les données de transmissivité (*T*) (figures 5.6 et 5.7) ; les valeurs sont beaucoup plus élevées dans les dépôts meubles et moins dispersées autour de la médiane. Pour les puits municipaux exploitant l'aquifère au roc, la valeur médiane est inférieure, avec un étalement des valeurs bien plus grand.

Enfin, sur les 75 puits, 16 ont un couple de valeurs de *CS* et de *T* calculés directement à partir d'essais de pompage. Sur ces 16 puits, 12 présentent une corrélation linéaire entre les logarithmes (base 10) de *CS* et de *T* (figure 5.8). A noter que 8 des 12 puits présentant une corrélation sont aménagés dans le roc et 4 dans les dépôts meubles.

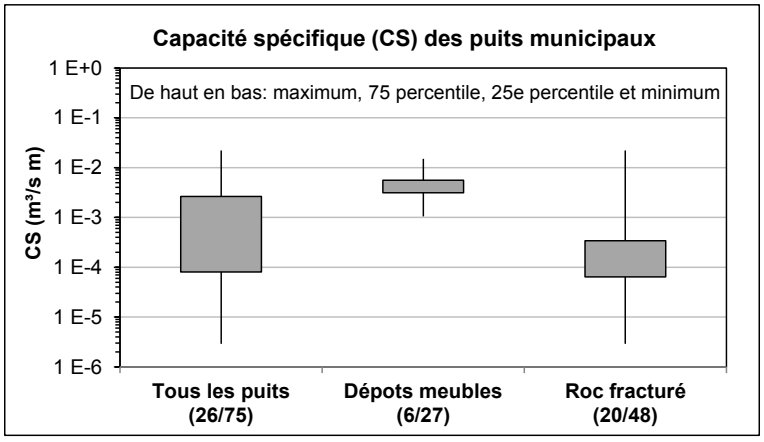


Figure 5.4 : Plage de valeurs de capacité spécifique (*CS*) des puits municipaux selon l'aquifère exploité

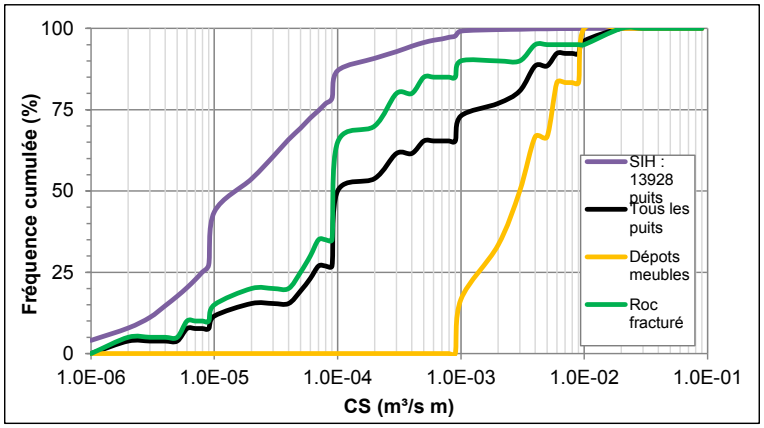


Figure 5.5 : Fréquence cumulée de capacité spécifique (*CS*) des puits municipaux selon l'aquifère exploité

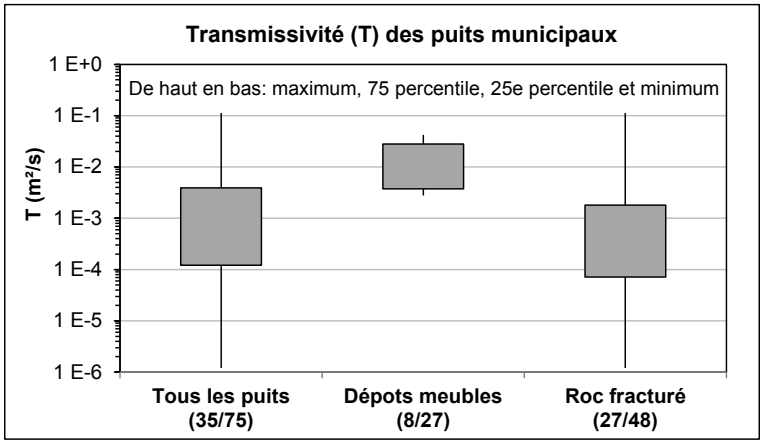


Figure 5.6 : Plage de valeurs de transmissivité (*T*) pour les aquifères exploités par les puits municipaux

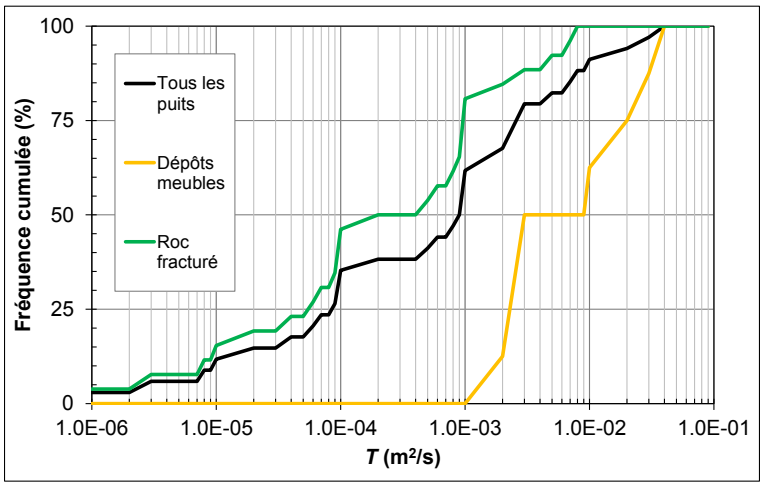


Figure 5.7 : Fréquence cumulée de transmissivité (*T*) des aquifères exploités par les puits municipaux

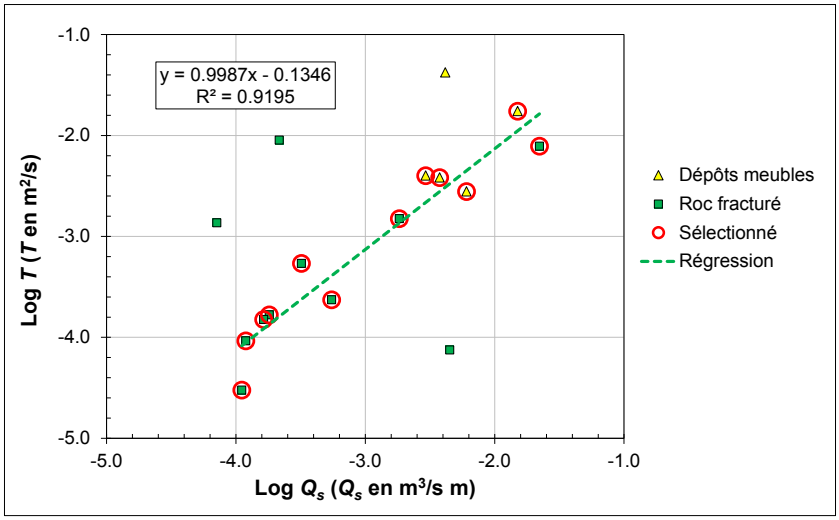


Figure 5.8 : Transmissivité (*T*) en fonction de la capacité spécifique (*CS* ou Q_s) pour les puits municipaux avec données disponibles

5.1.2.4 Données sur les prélèvements et les aires d'alimentation

Cette section dresse un portrait partiel de l'exploitation des ressources en eau souterraine par les puits municipaux à partir des informations obtenues dans le cadre du projet.

Les statistiques sur les prélèvements sont basées sur les données disponibles pour 37 des 75 puits municipaux identifiés sur le territoire à l'étude. Ce portrait ne reflète donc pas l'utilisation actuelle de tous les puits municipaux en Montérégie Est. De plus, les débits présentés, obtenus des municipalités ou du système de gestion des prélèvements d'eau (GPE), représentent parfois le débit maximal des puits et non le débit réel. Enfin, les débits présentés sont rapportés sur une base annuelle et n'apportent donc pas d'information quant aux fluctuations interannuelles de la consommation. Or, ces fluctuations, en période sèche, peuvent avoir des impacts significatifs sur la disponibilité des ressources en eau souterraine.

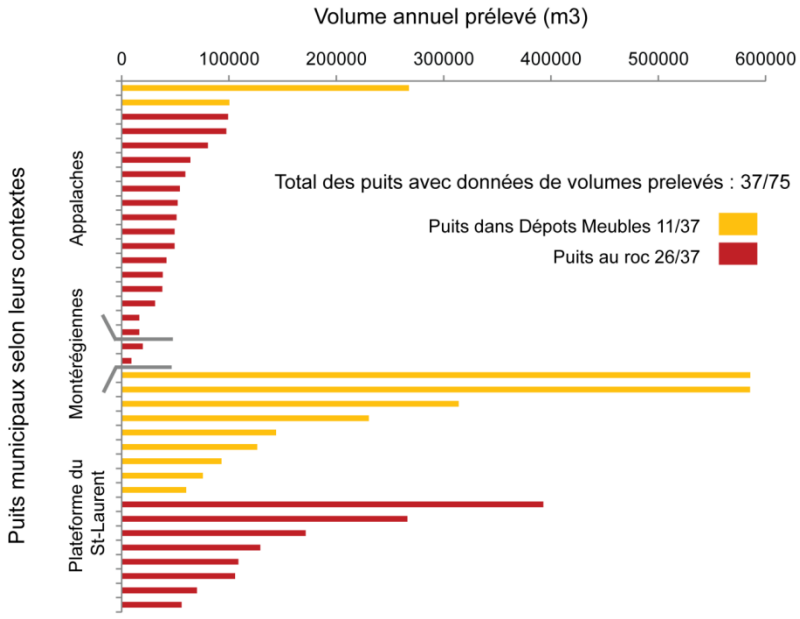


Figure 5.9 : Volumes annuels prélevés (m^3/an) dans les puits municipaux

Les statistiques sur les volumes annuels prélevés ont été produites selon le type d'aquifère exploité et selon des regroupements de contextes hydrogéologiques définis à la section 3.4 (figure 5.9). Ces statistiques montrent que, pour les puits considérés, les prélèvements paraissent plus importants dans le contexte de la Plate-forme du Saint-Laurent que dans les Appalaches. De plus, dans la Plate-forme Saint-Laurent, les aquifères granulaires semblent également être plus sollicités que l'aquifère de roc fracturé.

Par ailleurs, les aires d'alimentation et les périmètres de protection liés à ces prélèvements ont été compilés et numérisés à partir des documents collectés dans le cadre du projet. Les documents disponibles ont permis d'identifier les aires d'alimentation de plus de 30 puits municipaux répartis dans une quinzaine de municipalités. Bien que ces aires d'alimentation soient généralement estimées dans le cadre d'études locales et soient d'étendue limitée lorsque présentées à l'échelle régionale, elles sont illustrées à la figure 5.10 afin de montrer leur distribution et de les mettre en perspective avec la vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional (section 4.5). Les périmètres de protection (rapproché et éloigné) ne sont pas présentés sur cette figure étant donné leur faible superficie à cette échelle.

Dans le contexte des Appalaches (zone interne), les aires d'alimentation disponibles dans la partie sud (ex. : Lac-Brome, Stukely-Sud) sont généralement situées dans les zones peu ou moyennement vulnérables, notamment en raison du couvert de sédiments fins plus épais dans certaines des vallées concernées. Dans la partie nord des Appalaches internes, la seule aire d'alimentation disponible est celle associée au captage municipal de Durham-Sud qui exploite un aquifère granulaire. Bien que la vulnérabilité estimée dans le cadre de ce projet concerne l'aquifère régional de roc fracturé, il peut être présumé que la vulnérabilité de l'aquifère granulaire de ce secteur serait semblable à celle de l'aquifère rocheux, soit élevée compte tenu de la nature des dépôts meubles dans ce secteur (i.e. sédiments fluvioglaciaires). Dans le contexte des Appalaches externes, la partie nord comprend la majorité des puits municipaux pour lesquels les aires d'alimentation étaient disponibles. Ces dernières sont situées dans des zones de vulnérabilité moyenne à élevée, notamment en raison de la présence de zones de recharge (ex. : Saint-Liboire), d'un couvert de dépôts meubles relativement mince et/ou d'une profondeur à la nappe faible (ex. : Saint-Hélène-de-Bagot).

Pour des raisons similaires, les aires d'alimentation des puits municipaux de la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent (ex. : Napierville et Hemmingford) sont situées dans des zones de vulnérabilité moyenne à élevée. Dans la partie centrale de la Plate-forme du Saint-Laurent, au sud des collines montérégiennes (ex. : Rougemont, Saint-Paul-d'Abbotsford), les aires d'alimentation disponibles sont situées dans des zones de vulnérabilité faible à élevée. Certains captages municipaux de ce secteur (ex. : Saint-Césaire et certains puits de Rougemont) exploitent des aquifères granulaires dont la vulnérabilité pourraient être élevée par endroits. Quant à la partie nord de la Plate-forme, elle ne comprend aucun captage municipal étant donné la présence d'une zone d'eau saumâtre.

5.1.3 Portrait des puits d'approvisionnement privés

Les informations sur les approvisionnements privés en Montérégie Est sont relativement peu nombreuses. Certains approvisionnements privés sont répertoriés dans le système de gestion des prélèvements d'eau (GPE) du MDDEFP (2011b). Le GPE n'inclut toutefois que les approvisionnements en eau de plus de 75 000 L/jour (ou 75 m³/jour) et n'est pas exhaustif en raison de la récente création du système en 2010. Par conséquent, un effort significatif a été dédié à la collecte de données supplémentaires sur ce type d'approvisionnement par l'entremise de sondages auprès d'entreprises privées. Le taux de réponse aux sondages a toutefois été faible et, par conséquent, le portrait en découlant, qui est présenté ci-après, n'est que partiel.

Le tableau 5.3 présente le nombre de puits privés répertoriés dans le cadre du projet pour chaque municipalité, soit 51 puits au total. Le tableau ne présente que les puits pour lesquels des données suffisantes étaient disponibles afin de valider l'existence, la localisation et le débit annuel des puits. Les débits individuels des puits, de même que leur localisation, ne peuvent toutefois pas être présentés en raison des restrictions de diffusion, Les débits ont cependant été compilés dans le bilan d'utilisation d'eau présenté à la section 5.2.

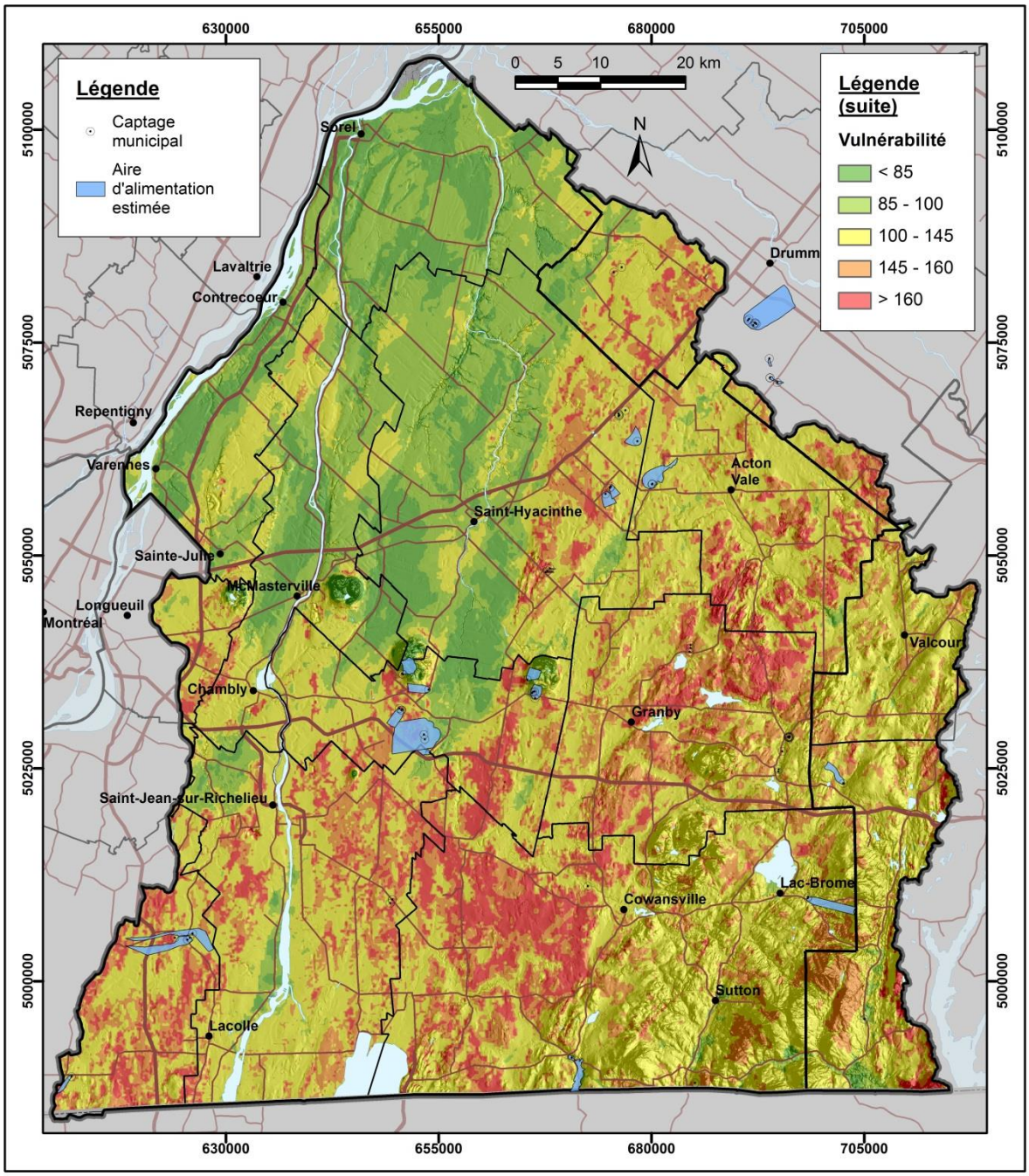


Figure 5.10 : Aires d'alimentation de certains puits municipaux en relation avec la vulnérabilité de l'aquifère régional de roc fracturé

Tableau 5.3 : Tableau synthèse des puits privés selon le secteur d'activité

MRC	Municipalité	Secteur d'activité	Nombre de puits
Acton	Acton Vale	Camping	1
Brome-Missisquoi	Bedford	Extraction de calcaire	1
	Bromont	Camping	1
		Extraction de pierre	1
	Cowansville	Carrière / Sablière	1
	Frelighsburg	Camping	1
	Lac-Brome	Camping	1
		Carrière / Sablière	1
		Extraction de pierre	1
	Saint-Armand	Extraction de minerai non métallique	1
	St-Pierre-de-Véronne-à-Pike-River	Extraction de minerai non métallique	1
Drummond	Saint-Eugène	Camping	1
	Saint-Majorique-de-Grantham	Golf	1
	Wickham	Camping	1
		Extraction de pierre	1
La Haute-Yamaska	Granby	Réseau d'aqueduc & syst. d'irrigation	1
	Roxton Pond	Camping	1
		Extraction de pierre	1
	Saint-Alphonse-de-Granby	Extraction de pierre	2
		Fab. de tuyaux & courroies	4
	Saint-Joachim-de-Shefford	Camping	1
La Vallée-du-Richelieu	Mont-Saint-Grégoire	Pisciculture	1
	Saint-Jean-Baptiste	Transformation de la volaille	1
Le Haut-Richelieu	Lacolle	Carrière / Sablière	1
		Camping	2
	Mont-Saint-Grégoire	Golf	1
	Saint-Georges-de-Clarenceville	Carrière / Sablière	1
		Extraction de pierre	1
	Saint-Jean-sur-Richelieu	Embouteillage d'eau	1
	Venise-en-Québec	Camping	1
Les Jardins-de-Napierville	Hemmingford	Réseau d'aqueduc & syst. d'irrigation	1
	Napierville	Fab. de produits du pétrole / charbon	2
	Saint-Bernard-de-Lacolle	Camping	1
Les Maskoutains	Saint-Damase	Transformation de la volaille	4
	Saint-Valérien-de-Milton	Camping	1
Marguerite-D'Youville	Saint-Amable	Fabrication de béton préparé	2
	Saint-Étienne-de-Bolton	Camping	1
	Varennes	Carrière / Sablière	1
Rouville	Marieville	Camping	1
		Laminage & étirage d'acier acheté	1
	Saint-Paul-d'Abbotsford	Culture de fruits & de noix	1
Total			**51**

Les caractéristiques des puits, de même que l'information sur l'aquifère exploité par ces puits, n'étaient pas disponibles dans la majorité des cas. Les informations sur le secteur d'activité des organisations ou entreprises propriétaires de ces puits ont toutefois été obtenues et sont présentées au tableau 5.3. Parmi les secteurs d'activité prélevant des volumes annuels de plus de 50 000 m³/an, on compte des carrières et sablières, un embouteilleur, des usines de transformation de la volaille, une pisciculture et une usine de fabrication de câbles d'acier (laminage et étirage d'acier).

5.2 Usage des ressources en eau souterraine

Comme mentionné dans la section précédente, les besoins en eau pour différents usages peuvent être comblés par différentes sources d'approvisionnement, dépendamment de la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. Les utilisateurs s'alimentent généralement en eau de surface ou en eau souterraine par l'intermédiaire des systèmes publics (ex. : réseaux de distribution d'eau ou aqueducs) ou de systèmes privés (ex. : puits tubulaires ou puits de surface). Dans certains secteurs, plusieurs types d'approvisionnement peuvent être mis à contribution pour répondre à la demande.

5.2.1 Collecte des données et estimation des prélèvements

Au Québec, il n'y a pas de source d'information unique qui permette d'obtenir directement les données concernant l'utilisation de l'eau et les sources d'approvisionnement. Les informations disponibles, provenant de sources publiques (ex. : ministères provinciaux, municipalités, MRC, régies intermunicipales, etc.) ou privées (ex. : sondages ou entrevues auprès d'entreprises), sont souvent incomplètes, lorsque considérées seules, ou peuvent s'avérer contradictoires entre elles. Toutefois, en intégrant et en comparant toutes les informations disponibles, il est possible d'évaluer l'utilisation d'eau souterraine à l'échelle municipale. La méthodologie utilisée pour évaluer l''utilisation d'eau et les sources d'approvisionnement en eau en Montérégie Est est résumée ci-dessous et présentée plus en détail à l'annexe 3 de ce rapport.

Différentes sources de données ont été utilisées pour estimer les volumes d'eau annuels utilisés pour les 3 usages suivants : résidentiel, agricole et industriel/commercial/institutionnel (ICI). L'organigramme de la figure 5.11 donne un aperçu de l'organisation des données disponibles pour l'estimation de l'utilisation d'eau pour chaque type d'usage. Plusieurs informations ont été obtenues ou validées par l'OBV Yamaska lors de sondages ou de communications directes avec les responsables de l'approvisionnement en eau des municipalités. Parmi les données collectées, les débits des réseaux de distribution d'eau fournis par les municipalités ont été essentiels puisqu'ils ont servis de base pour valider les volumes d'eau estimés pour chaque usage provenant de ces réseaux. Les calculs ont été faits par municipalité et agréger par MRC. L'information a initialement été regroupée par municipalité puisque la majorité des données sont compilées à l'échelle municipale (ex. : débits des réseaux de distribution d'eau, populations desservies, …). Le regroupement des données par MRC permet quant à lui de produire des statistiques basées sur un plus grand nombre de données et qui sont moins sujettes à des effets de limites affectant surtout l'usage agricole de l'eau souterraine.

L'**utilisation d'eau à des fins résidentielles** a été comptabilisée pour chaque municipalité à partir des données de recensement du MAMROT (2010a) et des données sur les populations desservies par un réseau obtenues du MDDEFP (2011c) ainsi que du sondage réalisé auprès des municipalités. L'utilisation d'eau à des fins résidentielles pour les personnes desservies et non desservies par un réseau a été calculée à partir des estimés de population (desservie et non desservie), multiplié par une consommation moyenne journalière (250 L/personne/jour) (MDDEFP, 2006) qui s'applique aux usages résidentiels en région rurale.

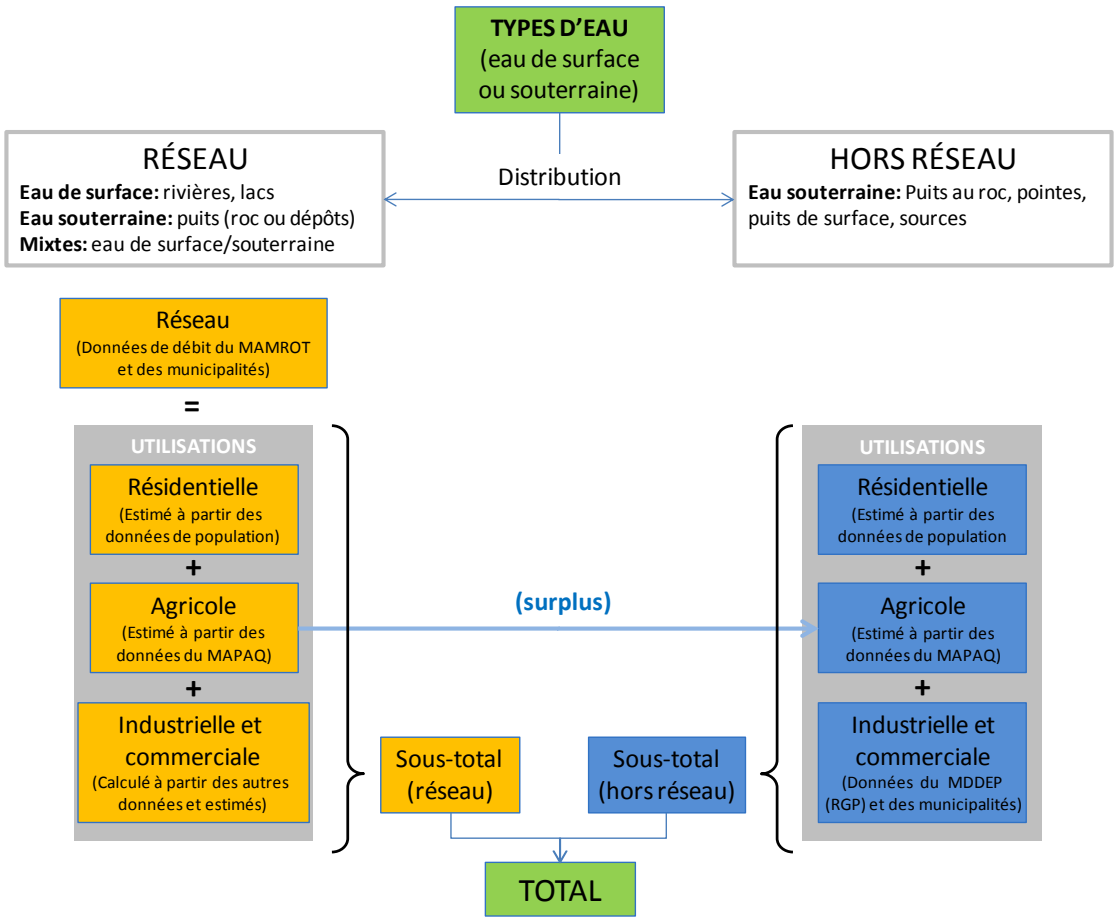


Figure 5.11 : Types d'utilisation d'eau considérés

L'**utilisation d'eau à des fins agricoles** a été plus complexe à estimer, notamment parce qu'il est difficile d'identifier la source d'approvisionnement en eau utilisée par les productions agricoles. Les calculs nécessaires ont été faits à partir des données sur les types de production agricole, auxquelles a été associée une consommation moyenne estimée à partir de chartes de consommation. Les informations sur les types de productions agricoles végétales et animales ont été obtenues du MAPAQ (2011a). Les quantités d'eau consommée ont été estimées 1) en additionnant les productions agricoles (ex. nombre de têtes de bétail ou superficies cultivées par type de production) et 2) en multipliant ces productions par la consommation moyenne estimée à partir de la charte. Il a aussi été nécessaire de faire des approximations quant à la source d'approvisionnement en eau utilisée. Pour ce faire, des facteurs de distribution de l'eau utilisée à des fins agricoles obtenus d'études antérieures ont été utilisés.

Pour les **utilisateurs industriels, commerciaux et institutionnels** (ICI) desservis par un réseau, peu de données ont pu être collectées. Par conséquent, l'approche a consisté à calculer le débit restant non utilisé par les autres usages (i.e. résidentiel et agricole) en soustrayant du volume d'eau total utilisé par les réseaux les volumes d'eau utilisés pour les usages résidentiels et agricoles. Cet estimé de l'utilisation d'eau à des fins ICI inclut donc aussi toutes les autres utilisations possibles d'eau du réseau qui ne sont pas considérées par les utilisations résidentielles et agricoles. Pour les utilisateurs ICI hors réseau, les volumes d'eau utilisés ont été estimés à partir des données du système de gestion des prélèvements d'eau (GPE) (MDDEFP, 2011b) et, lorsque possible, complétés avec les informations provenant des registres municipaux ou obtenus auprès des entreprises par un sondage.

5.2.2 Bilan de l'utilisation d'eau

Le tableau 5.4 résume les résultats de l'estimation de l'utilisation d'eau en Montérégie Est ainsi que des sources d'approvisionnement en eau. Dans ce tableau, l'utilisation totale en eau indiquée correspond à l'utilisation d'eau estimée pour la proportion de la MRC à l'intérieur de la région d'étude. Les valeurs indiquées pour les portions des MRC Nicolet-Yamaska et Roussillon sont donc très faibles et probablement peu représentatives de l'ensemble de ces MRC qui sont principalement situées à l'extérieur de la zone d'étude. Le tableau indique également la proportion de cette utilisation associée à l'eau souterraine ou à l'eau de surface, ainsi que la proportion associée aux usages agricole, ICI ou résidentiel. Ces résultats sont aussi illustrés sur la carte du livrable 26 dans les encadrés situés dans le haut de la carte. Un des encadrés, celui de droite, montre l'utilisation totale d'eau par MRC ainsi que les sources d'approvisionnement pour cette utilisation totale (i.e. eau de surface ou souterraine). L'autre encadré du livrable 26, celui de gauche, présente l'utilisation d'eau souterraine selon les différents usages considérés. Ces cartes sont aussi présentées dans l'atlas hydrogéologique (annexe 1).

Dans le tableau, de même que sur le livrable 26 (encadré de droite), on peut noter une importante utilisation d'eau de surface dans la MRC Pierre-De Saurel, principalement associée à une utilisation à des fins industrielles. Les municipalités de cette MRC, de même que celles de la MRC de Marguerite-d'Youville, s'alimentent presqu'exclusivement à partir d'eau de surface, étant donné la mauvaise qualité de l'eau souterraine (i.e. présence d'eau saumâtre). Pour la même raison, d'autres MRC du nord de la région ont aussi une importante utilisation en eau de surface (ex. : MRC Les Maskoutains et La Vallée-du-Richelieu). Quant à Longueuil, l'utilisation de l'eau de surface comme source d'approvisionnement principale est expliquée en partie par sa localisation (près du fleuve) et par sa population importante. Par ailleurs, une proportion significative d'eau souterraine (près de ou plus de 50 %) serait utilisée dans les MRC d'Acton et de Rouville, ainsi que dans les portions des MRC de Drummond, Les Jardins-de-Napierville et Memphrémagog faisant partie de la région d'étude. Pour l'ensemble de la zone d'étude, l'eau souterraine représente un peu plus de 7 % de l'utilisation totale d'eau. Lorsqu'on considère seulement l'eau utilisée à des fins résidentielles (i.e. excluant les usages ICI et agricole), cette proportion s'élève à environ 20 % pour toutes les municipalités et à plus de 55 % pour les municipalités de moins de 5000 personnes.

L'autre encadré du livrable 26 présente l'utilisation d'eau souterraine selon les différents usages considérés. Les MRC avec les plus fortes utilisations d'eau souterraine sont les MRC Les Maskoutains, Acton, Rouville, La Haute-Yamaska, Le Haut-Richelieu, Les Jardins-de-Napierville (pour la portion de la MRC dans la zone d'étude seulement) et Brome-Missisquoi. Pour les MRC Pierre-De Saurel et Marguerite-d'Youville, où les réseaux sont approvisionnés par de l'eau de surface, une faible utilisation d'eau souterraine a tout de même été estimée et représenterait les usages hors réseau dans ces MRC. De façon générale, l'eau souterraine est utilisée principalement à des fins résidentielles. Cependant, dans quelques MRC, l'utilisation d'eau souterraine à des fins agricole ou ICI prédomine ou représente une proportion importante. Pour les MRC où l'utilisation d'eau souterraine à des fins agricoles est importante (ex. : MRC d'Acton et Les Maskoutains), on remarque une densité de productions agricoles plus élevée mais également une prédominance de productions agricoles animales. Dans le cas des MRC avec une utilisation significative d'eau souterraine à des fins ICI (ex. : MRC de Rouville, Brome-Missisquoi et Les Jardins-de-Napierville), on note généralement la présence d'industries de transformation (s'approvisionnant ou non par le réseau) ou de carrières (hors réseau). Dans le cas de la MRC Jardins-de-Napierville, l'importance de la portion ICI provient en partie de la présence d'un piège hydraulique opéré par une industrie. Par ailleurs, à l'exception de la MRC Les Maskoutains, les MRC présentant une utilisation importante d'eau souterraine sont généralement situées dans des contextes hydrogéologiques où la vulnérabilité est relativement élevée (section 4.5).

Finalement, il importe de mentionner que les variations saisonnières d'utilisation d'eau ne sont pas abordées ici faute de données suffisantes. Toutefois, comme plusieurs problèmes de disponibilité d'eau souterraine surviennent seulement de façon saisonnière (ex. : endroits où l'usage est surtout estival comme pour l'irrigation ou l'alimentation en eau à fins récréo-touristiques), il serait important de dédier des efforts à la collecte de données à long terme sur les fluctuations saisonnières d'utilisation d'eau. La collecte de données mensuelles ou quotidiennes de volumes prélevés provenant directement des propriétaires de puits (municipaux ou privés) permettrait d'évaluer, et possiblement de prédire, les tendances dans l'utilisation d'eau souterraine afin de mieux en planifier la gestion et le développement.

Tableau 5.4 : Bilan d'utilisation d'eau par MRC dans la région d'étude

MRC	Superficie (km^2)	Population totale	Utilisation totale d'eau				Source d'approvisionnement	
			Totale (Mm^3/an)	Agricole (%)	ICI (%)	Résidentielle (%)	Eau de surface	Eau souterraine
Acton	582.2	15 282	4.21	26.1 %	40.7 %	33.2 %	55 %	45 %
Brome-Missisquoi	1 700.6	55 228	14.59	9.2 %	56.3 %	34.6 %	66.6 %	33.4 %
Drummond	1 626.5	98 041	1.11	31.8 %	7.8 %	60.4 %	8.5 %	91.5 %
La Haute-Yamaska	648.8	84 134	17.87	5.1 %	51.9 %	43 %	70.7 %	29.3 %
Marguerite-D'Youville	405.3	72 714	49.66	0.5 %	86.1 %	13.4 %	99.7 %	0.3 %
La Vallée-du-Richelieu	604.4	123 036	18.04	2.3 %	40.1 %	57.6 %	97.5 %	2.5 %
Le Haut-Richelieu	996	114 137	21.28	7.6 %	43.4 %	49 %	80.4 %	19.6 %
Les Jardins-de-Napierville	804.1	25 984	3.18	45.5 %	23.9 %	30.6 %	30.7 %	69.3 %
Les Maskoutains	1 312	83 146	18.73	16.8 %	42.7 %	40.5 %	82.7 %	17.3 %
Le Val-Saint-François	1 426.9	41 404	1.32	15.5 %	42.8 %	41.7 %	75.5 %	24.5 %
Memphrémagog	1 444.5	49 488	1.46	2.7 %	65.6 %	31.7 %	64.1 %	35.9 %
Nicolet-Yamaska	1 188.6	25 182	0.002	0.2 %	25.8 %	74.1 %	99.9 %	0.1 %
Pierre-De Saurel	639.2	50 352	179.81	0.3 %	97.1 %	2.6 %	99.9 %	0.1 %
Roussillon	492.3	203 344	0.32	0 %	45.7 %	54.3 %	99.8 %	0.2 %
Rouville	488.7	35 892	6.7	22.7 %	30.8 %	46.5 %	47.4 %	52.6 %
Longueuil	308.8	402 953	38.88	0 %	67.9 %	32.1 %	100 %	0 %
Total	**14 669**	**1 480 317**	**377.16**	**3.4 %**	**77.4 %**	**19.1 %**	**92.6 %**	**7.4 %**

5.2.3 Recommandations pour faciliter l'estimation de l'utilisation d'eau

La collecte et l'analyse de données pour l'estimation de l'utilisation d'eau en Montérégie Est ont exigé des efforts significatifs afin d'assurer un résultat fiable et cohérent. Considérant l'importance de cet exercice pour assurer la gestion durable des ressources en eau, des recommandations sont faites ci-dessous afin de faciliter l'estimation future de l'utilisation d'eau

Concernant les données sur les réseaux de distribution d'eau, l'information disponible sur leurs débits devrait être précisée afin de distinguer si les données rapportées correspondent aux débits réellement utilisés ou aux débits maximum. Aussi, considérant le peu de données réelles ayant été obtenues sur la répartition de l'utilisation d'eau distribuée par les réseaux municipaux, les informations complémentaires sur ces réseaux devraient aussi comprendre le nombre et le type d'utilisateurs desservis (ex. : personnes ou résidences, industries, commerces, agriculteurs, …). Les permis municipaux attribués pour le forage de puits (résidentiels, commerciaux, industriels ou autres), de même que les comptes de taxes municipales, pourraient constituer des moyens pour les municipalités de collecter ce type d'information. Toutes ces données, particulièrement celles sur les réseaux, devraient être validées et mises à jour régulièrement avec les municipalités puisque plusieurs incohérences ont été notées entre les registres provinciaux et les données obtenues directement des municipalités.

Par ailleurs, il serait utile, voire essentiel, de collecter les informations relatives aux sources d'approvisionnement en eau utilisées par les agriculteurs (i.e. eau souterraine ou eau de surface) pour l'abreuvement du bétail, l'irrigation ou autres usages. Différents outils de collecte de données sont déjà en place (ex. : plan d'accompagnement environnemental du MAPAQ) mais des efforts supplémentaires seraient requis afin d'informer les agriculteurs de l'importance des données liées à la consommation d'eau. Il faudrait aussi mieux faire circuler les informations collectées.

Finalement, plusieurs données collectées au niveau provincial sont complémentaires entre elles mais présentent des redondances ou des incohérences (ex. : données collectées par le système de gestion des prélèvements d'eau (GPE) en comparaison aux données collectées dans le cadre du Règlement sur la qualité de l'eau potable ou du Règlement sur le captage des eaux souterraines). Une utilisation efficace de ces données nécessiterait donc la mise en place d'une base de données gouvernementale unique intégrant toutes ces informations.

5.3 Potentiel d'exploitation

Tel que mentionné précédemment, le roc fracturé constitue dans la majorité des contextes de la Montérégie Est l'aquifère régional principalement exploité. La section 4.1 a démontré que la conductivité hydraulique du roc fracturé diminue significativement avec la profondeur et que, bien qu'elle varie d'un contexte hydrogéologique à l'autre, cette variation ne serait pas significative en comparaison des variations associées à la profondeur. La conductivité hydraulique, à elle seule, ne permet donc pas de caractériser en détail le potentiel d'exploitation de l'aquifère régional de roc fracturé. Cependant, la combinaison de plusieurs informations telles la vulnérabilité (livrable 22), la qualité relative de l'eau souterraine (livrables 24 et 25) et la sensibilité au pompage pourrait servir d'indicateur pour le potentiel d'exploitation (Nastev et al., 2006). Ce type d'exercice n'a toutefois pas pu être complété dans le cadre de ce projet puisque les informations spatialisées sur la sensibilité au pompage ne peuvent être générées qu'à l'aide d'un modèle numérique d'écoulement d'eau souterraine, dont le développement était en cours au moment de la rédaction (Laurencelle et al., 2013 ; section 6.4).

En ce qui concerne le potentiel d'exploitation des aquifères granulaires, il n'a pas été caractérisé en détail dans le cadre de ce projet étant donné l'étendue limitée des aquifères granulaires en

comparaison de la superficie de la région d'étude. Un sommaire des endroits à plus fort potentiel dans les dépôts meubles est toutefois présenté plus loin puisque les sections précédentes ont montré que la capacité des puits municipaux dans les dépôts meubles serait plus importante que celle des puits municipaux installés dans l'aquifère de roc fracturé (section 5.1, figures 5.4 et 5.6). La recherche en eau visant l'identification du potentiel aquifère dans les dépôts meubles devrait aussi considérer la qualité naturelle de l'eau souterraine (discutée à la section 5.4) en plus de la présence de fortes épaisseurs de sédiments potentiellement perméables ou semi-perméables au-dessus du roc. Même si la section 5.4 concerne la qualité de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux, la qualité de l'eau souterraine dans les dépôts meubles pourrait présenter des caractéristiques similaires à celles de l'aquifère rocheux dans les zones de résurgence de l'eau souterraine (section 4.4, livrable 28a).

Dans le contexte hydrogéologique de la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent, des secteurs avec d'importantes épaisseurs estimées de sédiments indifférenciés sous les sédiments argileux ont été identifiées (> 10 m par endroits). Certaines de ces accumulations de sédiments ont été identifiées par sismique réflexion et la granulométrie plus grossière de ces sédiments, qui pourraient constituer des sables d'épandage proglaciaire sous-aquatique a été confirmée par forages (section 3.2). Cependant, pratiquement tout ce contexte hydrogéologique est caractérisé par une zone d'eau souterraine saumâtre (sections 4.6 et 5.4). Le potentiel aquifère de ce contexte est donc limité principalement par la piètre qualité d'eau.

Pour le contexte hydrogéologique de la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent, l'épaisseur interpolée de sédiments sous l'argile varie de moins de 1 m à plus de 25 m. Dans plusieurs secteurs, ces sédiments pourraient toutefois être constitués de till présentant un potentiel aquifère faible à moyen. En combinant les informations provenant de l'interpolation des épaisseurs de sédiments et de la cartographie des formations superficielles, on peut toutefois identifier des zones qui pourraient représenter des aquifères granulaires potentiels (ex. : la limite entre Saint-Cyprien–de-Napierville et Saint-Jacques-le-Mineur où des sédiments fluvioglaciaires relativement épais (> 10 m) ont été identifiés, certaines portions de la vallée de la rivière L'Acadie comprenant des sédiments alluviaux et littoraux (marins) qui semblent relativement épais, …) et des zones qui correspondent à des aquifères granulaires exploités (ex : sud du Mont Rougemont, certaines portions de la vallée de la rivière Richelieu, …).

Le potentiel aquifère dans les dépôts granulaires dans ou près du contexte hydrogéologique des intrusions montérégiennes serait intéressant. On retrouve du côté sud des Montérégiennes, en surface ou enfouis sous des sédiments argileux, des accumulations importantes de matériaux granulaires indifférenciés (> 15 m) qui, dans certains cas, a été identifié comme des sables et graviers perméables. Au pourtour des montérégiennes, des dépôts granulaires potentiellement perméables pourraient également être en contact hydraulique avec le roc fracturé des intrusifs, et possiblement des dykes, qui pourraient offrir un potentiel aquifère important. Le potentiel aquifère de ce contexte est d'autant plus intéressant puisqu'il constitue une importante zone de recharge au niveau régional (section 4.3, livrable 28a). Comme mentionné précédemment, les dépôts meubles au pourtour de certaines collines montérégiennes de la région sont d'ailleurs déjà exploités, notamment au sud du Mont Rougemont. Bien que la qualité de l'eau souterraine de l'aquifère rocheux régional dans ce contexte soit jugée « passable » (section 5.4, livrables 24 et 25), la qualité d'eau dans les dépôts meubles pourrait être meilleure, notamment en raison d'un temps de résidence moins élevé.

Dans le contexte hydrogéologique de la zone externe des Appalaches (Piedmont), le potentiel aquifère dans les dépôts meubles serait surtout restreint aux vallées où il est possible de retrouver localement des accumulations significatives de sédiments fluvioglaciaires perméables (~ 10-15 m) (ex. : vallée de la rivière Noire). En dehors des vallées, on retrouve généralement moins de 5 m de dépôts meubles, essentiellement constitués de till peu perméable.

Enfin, dans le contexte hydrogéologique de la zone interne des Appalaches (Hautes-terres), il y a un potentiel aquifère important mais encore une fois restreint aux vallées car l'épaisseur de dépôts meubles est faible en dehors des vallées où on ne retrouve généralement que du till. Ce potentiel aquifère est d'ailleurs exploité dans plusieurs vallées (ex. : vallées des rivières Sutton, aux Brochets, Yamaska Nord et Missisquoi). Spatialement, ces sédiments sont limités aux vallées et peuvent être discontinus, ce qui peut poser des défis pour la recherche en eau. Ce contexte est malgré tout favorable car ces aquifères granulaires sont généralement protégés par des sédiments relativement fins et peu perméables en surface, ce qui diminue leur vulnérabilité à la contamination. De plus, les vallées représentent des zones de résurgence de l'eau souterraine (section 4.4, livrable 28a) dont la recharge est généralement importante sur les hauts topographiques entourant les vallées (section 4.3, livrable 28b). Enfin, la qualité de l'eau souterraine dans les Appalaches est la meilleure de la région (section 5.4, livrables 24 et 25).

Les modèles conceptuels du système aquifère de la Montérégie Est (section 4.7) et leurs implications sur le potentiel aquifère dans les dépôts meubles, ainsi que la carte de l'épaisseur de sédiments granulaires au-dessus du roc (voir figure 3.6 ou l'atlas hydrogéologique à l'annexe 1) et la cartographie des formations superficielles (livrable 12), pourront orienter la recherche en eau pour les aquifères dans les dépôts meubles en Montérégie Est.

5.4 Qualité de l'eau souterraine

5.4.1 Qualité naturelle

La définition de la qualité naturelle de l'eau souterraine dans la région d'étude s'appuie sur les résultats de l'étude géochimique présentés à la section 4.6. Les principales étapes dans la définition de la qualité de l'eau comprennent :

- Comparer les résultats analytiques obtenus pour chacun des puits aux critères de qualité applicables, afin d'identifier les valeurs qui ne respectent pas ces critères
- Décrire et expliquer la qualité des eaux de chacun des huit groupes d'eau souterraine définis dans l'étude hydrogéochimique régionale (section 4.6), en spécifiant, lorsque possible, l'origine et la cause des caractéristiques spécifiques à ces groupes
- Délimiter des zones de qualité relative d'eau souterraine

Les critères de qualité d'eau applicables aux différents paramètres chimiques analysés dans le cadre de ce projet sont :

- Les concentrations maximales acceptables (CMA) définies par le *Règlement sur la qualité de l'eau potable* (MDDEFP, 2012) *;* ces concentrations permettent d'évaluer le risque pour la santé humaine reliée à la consommation d'eau
- Les objectifs esthétiques définis par les *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada* (Santé Canada, 2012) ; ces objectifs sont reliés à des critères qui peuvent limiter l'usage de l'eau, mais n'ont pas d'incidence sur la santé

Le tableau 5.5 résume les dépassements des critères (CMA et objectifs esthétiques) dans la région d'étude, en nombre et en pourcentage, en fonction du type d'aquifère exploité par chacun des puits (roc fracturé ou dépôts meubles) et des critères applicables. La répartition spatiale de l'ensemble des dépassements est illustrée sur les cartes des livrables 24 et 25. Seuls les 237 échantillons prélevés dans le cadre du projet PACES ont été considérés pour la préparation du tableau 5.5 et des cartes des livrables 24 et 25. La comparaison des résultats analytiques obtenus et les concentrations maximales acceptables (CMA) (MDDEFP, 2012) a permis d'identifier, pour l'ensemble de la région, des dépassements pour 5 composés inorganiques : l'arsenic (As), le baryum (Ba), le fluor (F), les nitrites et nitrates ($N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$) et l'uranium

(U). Pour les puits présentant des dépassements par rapport aux critères de qualité d'eau potable, un avis a été envoyé au Bureau régional de la Santé publique du Québec ainsi qu'aux propriétaires des puits échantillonnés. Peu de dépassements ont été observés pour les nitrites-nitrates (NO_2-NO_3) et l'uranium (U), autant pour les puits aménagés dans le roc que ceux dans les dépôts meubles. En dehors de la zone d'eau saumâtre, les dépassements pour l'arsenic (As) sont surtout limités aux puits aménagés dans les dépôts meubles situés dans le Piedmont (zone externe des Appalaches). Les dépassements les plus fréquents sont reliés au baryum (Ba) et au fluor (F) et sont surtout retrouvés dans la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres), particulièrement en périphérie de la zone d'eau saumâtre.

La comparaison des résultats analytiques avec les objectifs d'ordre esthétiques (Santé Canada, 2012) indique des dépassements pour les paramètres : les chlorures (Cl), le sodium (Na), les sulfates (SO_4), la dureté, les sulfures, l'aluminium (Al), les matières dissoutes totales (MDT), le manganèse (Mn), le pH et le fer (Fe). Des dépassements pour certains paramètres esthétiques sont rencontrés sur presque toute la zone d'étude, particulièrement pour le manganèse (Mn) et, dans une moindre mesure, le fer (Fe). Les dépassements pour les matières dissoutes totales (MDT) sont très fréquents dans les Basses-terres, alors que les dépassements pour la dureté sont fréquents à la fois pour les Basses-terres et le Piedmont. Les dépassements pour les sulfures sont moins fréquents mais présents dans une grande partie de la région. Enfin, les dépassements pour les chlorures (Cl), le sodium (Na) et les sulfates (SO_4) sont présents surtout à l'intérieur et au pourtour de la zone d'eau saumâtre. Quant au pH, il présente des dépassements vers le bas (pH acide) dans les Appalaches (particulièrement dans la zone interne) et des dépassements vers le haut (pH alcalin) dans les Basses-terres principalement, en dehors de la zone d'eau saumâtre.

5.4.1.1 Description de la qualité de l'eau par groupe géochimique

Le tableau 5.6 présente les concentrations moyennes ainsi que le pourcentage de puits dépassant les critères applicables, pour chacun des paramètres normés, en fonction des huit groupes d'eau définis à la section 4.6. Le tableau présente aussi les groupes selon l'ordre relatif de qualité de l'eau : non potable, passable et acceptable.

Les groupes MC et M3 représentent généralement des eaux jugées non potables. Bien qu'il y ait peu d'échantillons caractérisant le groupe MC, tous les échantillons disponibles présentent des dépassements significatifs pour la majorité des critères esthétiques et un dépassement (25%) pour l'arsenic, le seul critère pour la santé avec un dépassement. Dans le cas du groupe M3, il y a une grande proportion de dépassements de critères pour la santé (29% pour Ba et 33 % pour F) et de dépassements de critères esthétiques, particulièrement pour le sodium (Na) et les matières dissoutes totales (MDT), en plus de problèmes ponctuels reliés au pH, à la dureté, au fer (Fe), au manganèse (Mn) et aux sulfures (S).

Les groupes d'eau M1, M2, BT et A2 ont une qualité d'eau jugée passable. Pour le groupe M1, près du tiers des puits analysés dépassent le critère pour les fluorures (F). Au niveau des critères esthétiques, le pH des eaux du groupe M1 est élevé (moyenne de 8.7), ce qui dépasse légèrement le critère fixé à 8.5. Aussi, plus de la moitié des puits du groupe M1 dépasse l'objectif esthétique en matières dissoutes totales (MDT). On y retrouve également des concentrations importantes en sulfures (S) et en sodium (Na). Le groupe M2 est caractérisé par la plus grande proportion de dépassements pour le baryum (Ba), soit 42%. Au niveau des critères esthétiques, le groupe M2 présente des dépassements en MDT pour plus de 60 % des puits, ainsi que des dépassements pour la dureté, le fer (Fe) (16 %), le manganèse (Mn) (32 %) et les sulfures (S) (26 %).

Tableau 5.5 : Statistiques sur les dépassements de critères pour la santé et d'objectifs d'ordre esthétique pour l'eau souterraine des puits échantillonnés

Paramètres	Unités	Critères	Dépassements (basés sur 237 échantillons)					
			Puits - Aquifère au roc		Puits - Aquifère granulaire		Tous les puits	
			Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
Préoccupation pour la santé [(1)] : Règlement sur la qualité de l'eau potable (MDDEFP, 2012)								
Arsenic (As)	mg/L	0.01	4	2 %	4	13 %	8	3 %
Baryum (Ba)	mg/L	1	17	8 %	-	0 %	17	7 %
Fluorures (F)	mg/L	1.5	19	9 %	-	0 %	19	8 %
Nitrites - Nitrates (NO_2-NO_3)	mg N/L	10	-	0 %	1	3 %	1	< 1 %
Uranium (U)	mg/L	0.02	1	< 1 %	1	3 %	2	< 1 %
Préoccupation d'ordre esthétique : Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2012)								
Aluminium (Al)	mg/L	0.1	1	< 1 %	1	3 %	2	<1%
Chlorures (Cl)	mg/L	250	16	8 %	3	10 %	19	8%
Dureté totale	mg $CaCO_3$/L	médiocre > 200	40	21 %	13	46 %	53	24 %
		intolerable > 500	14	7 %	2	7 %	16	7 %
Fer (Fe)	mg/L	0.3	47	23 %	8	26 %	55	23 %
Manganèse (Mn)	mg/L	0.05	78	38 %	22	71 %	100	42 %
Matières dissoutes tot. (MDT)	mg/L	500	80	42 %	14	50 %	94	43 %
Sodium (Na)	mg/L	200	28	14 %	3	10 %	31	13 %
Sulfures (exprimé en H_2S)	mg/L	0.05	23	11 %	-	0 %	23	10 %
Sulfates (SO_4)	mg/L	500	4	2 %	1	3 %	5	2 %
pH	-	6.5-8.5	41	20 %	6	21 %	47	20 %

Note :

[(1)] : Il existe d'autres paramètres auxquels s'appliquent un critère pour la santé (Sb, B, Cd, Cr, Cu, Pb, Se) ou pour lesquels des recommandations d'ordre esthétique sont émises (Zn). Ceux-ci n'apparaissent pas au tableau puisqu'aucun dépassement n'a été noté parmi les puits échantillonnés

Tableau 5.6 : Concentrations moyennes et proportion de dépassements des critères applicables pour chaque groupe d'eau

Paramètres	Unités	Critères	Qualité relative															
			Non potable				Passable								Acceptable			
			MC (N = 4) [1]		M3 (N = 24)		M1 (N = 22)		M2 (N = 19)		BT (N = 62)		A2 (N = 27)		A3 (N = 45)		A1 (N = 33)	
			Valeur moy.	% dépass.	Valeur moy.	% dépass.	Valeur moy.	% dépass.	Valeur moy.	% dépass.	Valeur moy.	% dépass.	Valeur moy.	% dépass.	Valeur moy.	% dépass.	Valeur moy.	% dépass.
Préoccupation pour la santé [1] : Règlement sur la qualité de l'eau potable (MDDEFP, 2012)																		
Arsenic (As)	mg/L	0.01	0.008	**25%**	0.002	4%	0.001	0%	0.001	0%	0.002	5%	0.002	0%	0.002	4%	0.001	0%
Baryum (Ba)	mg/L	1	0.020	0%	1.384	**29%**	0.150	0%	0.871	**42%**	0.249	3%	0.051	0%	0.106	0%	0.027	0%
Fluorures (F)	mg/L	1.5	0.53	0%	1.34	**33%**	1.48	**32%**	0.61	5%	0.18	0%	0.65	11%	0.20	0%	0.08	0%
Nitrites - Nitrates	mg N/L	10	0.13	0%	0.11	0%	0.05	0%	0.08	0%	0.18	0%	0.08	0%	0.12	0%	1.33	3%
Uranium (U)	mg/L	0.02	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.002	2%	0.003	4%	0.002	0%	0.001	0%
Préoccupation d'ordre esthétique : Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2012)																		
Chlorures (Cl)	mg/L	250	2 432	**75%**	538.7	**54%**	45.6	0%	28.1	0%	82.9	5%	30.5	0%	14.4	0%	17.8	0%
Dureté totale	mg $CaCO_3$/L	200	2 032	**100%**	97	9%	22	0%	170	17%	357	**84%**	55	0%	147	14%	126	**23%**
Fer (Fe)	mg/L	0.3	4.515	**100%**	0.276	17%	0.068	5%	0.157	16%	1.392	**53%**	0.059	0%	0.223	18%	0.122	3%
Manganèse (Mn)	mg/L	0.05	0.738	**100%**	0.032	17%	0.012	5%	0.044	**32%**	0.359	**69%**	0.041	**22%**	0.754	**62%**	0.093	**21%**
Mat. diss. tot. (MDT)	mg/L	500	7 280	**100%**	1956	**100%**	685	**67%**	570	**67%**	734	**63%**	363	19%	301	5%	227	0%
Sodium (Na)	mg/L	200	1 778	**100%**	556	**75%**	173	**32%**	74	0%	52	3%	77	0%	15	0%	8	0%
Sulfures H_2S	mg/L	0.05	2.18	**25%**	0.02	4%	0.38	**25%**	0.65	**26%**	0.03	5%	0.03	15%	0.02	9%	0.01	0%
Sulfates (SO_4)	mg/L	500	1 890	**100%**	18	0%	34	0%	13	0%	79	2%	43	0%	24	0%	17	0%
pH	-	6.5-8.5	7.5	0%	8.2	**26%**	8.7	**64%**	7.9	0%	7.3	0%	8.0	**30%**	7.7	2%	6.6	**55%**

Notes :

[1] : « N » représente le nombre d'échantillon de référence.

[2] : Les proportions de dépassements supérieures à 10 % sont soulignées, celles supérieures à 20 % sont en caratères gras et celles supérieures à 50 % sont surlignées)

Au niveau des critères pour la santé, le groupe BT présente peu de dépassements (1.6 % pour l'arsenic (As), 3 % pour le baryum (Ba); 1.6 % pour l'uranium (U)). Par contre, de nombreux dépassements de critères esthétiques sont observés pour le groupe BT : dureté (76 %), fer (Fe) (53 %), manganèse (Mn) (19 %) et les MDT (57 %). Enfin, au niveau des critères pour la santé, le groupe A2 présente des dépassements en fluorures (F) (11%) et un dépassement en uranium (U). Au niveau esthétique, le groupe A2 affiche des dépassements de critères esthétiques associés aux sulfures (S), aux MDT et au manganèse (Mn) pour 15 à 22% des puits.

Les groupes d'eau A3 et A1 ont une qualité d'eau jugée acceptable. Le groupe A3 n'a aucun dépassement de critère pour la santé, mais, au niveau des critères esthétiques, de nombreux dépassements sont notés pour le manganèse (Mn) (60 %), et quelques-uns pour la dureté totale (13 %), le fer (Fe) (18 %), les MDT (4 %) et les sulfures (S) (9 %). Le groupe d'eau A1 n'a qu'un seul dépassement pour les nitrites (N) et nitrates (N) ($N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$) dans un puits d'observation aménagé dans les dépôts meubles. Au niveau des critères esthétiques, plus de 50 % des puits du groupe A1 présentent un pH relativement acide, sous l'objectif fixé à un pH de 6.5. La dureté et le manganèse (Mn) (21 %) ainsi que le fer (Fe) (3 %) comptent parmi les dépassements esthétiques pour le groupe A1.

5.4.1.2 Origine des composés affectant la qualité de l'eau souterraine

Plusieurs dépassements indiqués à la section précédente peuvent être associés aux contextes géologiques de la zone d'étude ainsi qu'à l'histoire géologique. L'invasion du territoire par la mer de Champlain, suite au retrait des glaciers, a notamment affecté de façon significative les aquifères de la Montérégie Est jusqu'au pied des Hautes-terres appalachiennes (zone interne des Appalaches), épargnant le sommet de quelques collines montérégiennes. Les aquifères de la zone externe des Appalaches (Piedmont) et de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres) ont donc été affectés par :

- des eaux marines résiduelles en concentrations variables selon l'endroit
- des composés chimiques d'origine marine adsorbés dans les aquifères, principalement sur les minéraux argileux des roches ou des sédiments de surface à grains fins
- des dépôts silto-argileux marins d'épaisseurs variables, venant confiner les aquifères et ainsi limiter leur recharge et le mélange de l'eau marine avec l'eau douce des précipitations (lessivage), principalement dans le nord des Basses-terres (Plate-forme du Saint-Laurent nord)

Selon l'interprétation proposée par Beaudry (2013), cet événement marin explique la plupart des dépassements observés pour les critères d'ordre esthétique en chlorures, sodium et MDT. Les eaux des groupes M3 et MC situées à l'intérieur de la zone d'eau saumâtre présentent des concentrations en MDT qui sont, en moyenne, supérieures à 1000 mg/L. Selon la définition proposée dans la littérature (Freeze et Cherry, 1979), une eau dont les MDT se situent entre 1000 et 10 000 mg/L est dite saumâtre. Selon l'étude réalisée sur le territoire des Basses-Laurentides (Cloutier et al., 2010), au nord-ouest de Montréal, la mer de Champlain n'avait pas la composition normale d'une eau de mer (Hem, 1985), mais plutôt d'une eau de mer diluée par 66% d'eau douce provenant de la fonte des glaciers et des précipitations. Quant aux chlorures (Cl) et au sodium (Na), ils se retrouvent aussi en grandes concentrations dans l'eau de mer. Étant peu réactifs, les chlorures demeurent présents en solution et seule leur dilution par de l'eau douce permet de diminuer leur concentration. Le sodium réagit cependant différemment. Contrairement aux chlorures, sa concentration varie non seulement par dilution, mais aussi par les phénomènes d'échanges ioniques avec les minéraux argileux des aquifères.

Ainsi, selon l'interprétation proposée par Beaudry (2013), les dépassements en sodium (Na), tout comme les dépassements en baryum (Ba) et fluorures (F) s'expliqueraient principalement par

les propriétés du milieu, liées à la présence de minéraux argileux dans le roc. La présence des minéraux argileux favorise le phénomène d'adsorption selon lequel certains ions se fixent à une paroi solide (ex. : particules argileuses présentes dans les shales). Les ions Na^+, F^- et Ba^{2+}, qui sont des ions présents dans l'eau de mer en différentes proportions, possèdent tous des affinités avec les argiles (Hounslow, 1995). Ils peuvent donc se retrouver adsorbés et stockés dans l'aquifère, et peuvent y demeurer malgré la dilution d'autres composés marins en solution par de l'eau douce. Cependant, lorsque survient un changement de pH ou une variation importante dans la composition de l'eau, ceux-ci peuvent être libérés (désorption) et se retrouver en solution, pouvant ainsi modifier la qualité de l'eau. C'est le cas pour les eaux de type M1 et M2 notamment.

Quant aux dépassements en arsenic (As), uranium (U), sulfures (H_2S), sulfates (SO_4), fer (Fe) et manganèse (Mn), ils semblent davantage être reliés à la minéralogie du socle rocheux. Mentionnons comme exemple la pyrolusite (MnO_2), un minéral qui, dès qu'il se retrouve en conditions légèrement réductrices, se dissout (Hounslow, 1995). Lorsque présent en trop grande quantité, il vient altérer la qualité de l'eau en augmentant la quantité de manganèse (Mn) en solution. Les sulfates en solution (SO_4) sont couramment associés aux aquifères rocheux constitués de shales. Les shales peuvent notamment contenir des minéraux tels la pyrite (FeS_2) qui, lorsqu'ils sont oxydés, contribuent à l'augmentation des sulfates, mais également du fer, en solution (Hem, 1985).

5.4.1.3 Zones de qualité relative d'eau souterraine

Afin de définir la distribution spatiale de la qualité de l'eau souterraine en Montérégie Est, les huit groupes d'eau ont été classifiés en trois catégories de qualité afin de définir des secteurs aux caractéristiques similaires au niveau des critères de qualité d'eau. Les trois catégories identifiées sont : non potable, passable et acceptable (tableau 5.6). Les zones de qualité d'eau ainsi obtenues sont présentées en arrière-plan des cartes des livrables 24 et 25.

La zone d'eau « non potable » identifiée sur ces cartes correspond plus ou moins à la zone d'eau saumâtre ayant été documentée antérieurement (Beaudry et al., 2011; MEQ, 1981). Elle comprend les groupes M3 et MC et occupe tout le nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres) ainsi qu'un petit territoire situé au nord de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu, dans le sud des Basses-terres. Les principales caractéristiques des eaux de cette zone sont les concentrations très élevées en chlorures, en sodium et en MDT, dépassant de plusieurs fois les critères applicables. Cette zone est principalement caractérisée par des conditions captives pour l'aquifère rocheux régional et, par conséquent, par une faible recharge et une faible vulnérabilité également.

La zone d'eau de qualité d'eau « passable » comprend 4 groupes d'eau (M1, M2, BT et A2), tous situés en zone affectée par l'invasion marine de la mer de Champlain. La géochimie de ces groupes résulte de divers mécanismes de lessivage des eaux marines par les eaux douces, contrairement à la zone non potable (qui est peu ou pas lessivée). Ainsi, la zone de qualité passable présente localement des concentrations en baryum et fluorures excédant les critères pour la santé. Au niveau esthétique, les MDT sont en concentrations dépassant les recommandations un peu partout. Le pH est particulièrement alcalin, sauf dans les secteurs à nappe libre. Il est également fréquent d'y retrouver des concentrations dépassant les recommandations d'ordre esthétique pour plusieurs autres paramètres, de façon dispersée. En somme, il est possible de rencontrer des secteurs où la qualité de l'eau est acceptable (bonne), mais en règle générale, l'eau y est de qualité passable. Les zones associées aux groupes M1 et M2 sont généralement peu vulnérables compte tenu des conditions captives à semi-captives. Toutefois, les zones associées aux groupes BT et A2 seraient plus vulnérables à la contamination étant considérées libres à semi-captives.

Finalement, les eaux souterraines des groupes A1 et A3 ont été regroupées sous la catégorie « acceptable ». À l'exception d'un dépassement en nitrites et nitrates, tous les résultats obtenus respectent les concentrations maximales acceptables pour la santé. La qualité esthétique de l'eau est cependant souvent altérée par des concentrations élevées en manganèse. Le fer, la dureté et les sulfures sont également problématiques par endroit. Le pH est également acide dans les zones où des conditions libres prédominent. La meilleure qualité d'eau souterraine en Montérégie Est se trouve dans cette zone qui est toutefois jugée vulnérable à la contamination puisque le niveau de confinement varie généralement de libre à semi-captif.

5.4.1.4 Bilan régional de la qualité d'eau souterraine naturelle

En considérant l'ensemble des normes de potabilité (MDDEFP, 2012) et des recommandations pour la qualité de l'eau potable (Santé Canada, 2012), sans égard aux propriétés hydrauliques des aquifères, la qualité de l'eau souterraine en Montérégie Est présente des problèmes dans plusieurs secteurs. Les eaux souterraines y sont classifiées de « non potables » sur environ 2 200 km^2 et de « passables » au pourtour de cette zone, totalisant plus de la moitié des 9 000 km² composant le territoire. La qualité d'eau n'est qualifiée d'« acceptable » que dans les Appalaches (Hautes-terres et Piedmont). Soulignons que ce bilan a été réalisé à l'échelle régionale et qu'il ne tient donc pas compte des particularités locales et que la plupart des puits échantillonnés exploitent l'aquifère rocheux régional.

L'ensemble de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres) et de la zone externe des Appalaches (Piedmont) est caractérisé par des eaux riches en matières dissoutes totales (MDT), notamment en raison de l'invasion de la mer de Champlain à la fin de dernière période glaciaire. Plus spécifiquement, dans la partie nord des Basses-terres, l'eau est saumâtre et impropre à la consommation sur une superficie d'environ 2 200 km². Le pourtour de la zone saumâtre est affecté par des dépassements typiques en fluorures et baryum. Bien que la qualité des eaux souterraines s'améliore dans les Hautes-terres appalachiennes (zone interne des Appalaches), des concentrations significatives de manganèse y sont présentes. La présence de fer, de sulfures ainsi que l'acidité de l'eau peuvent également être problématiques localement.

5.4.1.5 Travaux supplémentaires sur les concentrations en nitrites et nitrates

Bien que certaines concentrations non négligeables en azote sous forme de nitrites et nitrates ($N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$) aient été mesurées au niveau de l'aquifère rocheux régional dans le cadre du projet, aucun dépassement des normes relatif à ce paramètre n'a été identifié, et ce malgré le caractère agricole de la région. Cette problématique a été abordée par des travaux spécifiques (Thériault, 2013) portant sur de petits sous-bassins agricoles situés dans le centre-sud de la région (ruisseaux Ewing et Walbridge) (section 6.5). Cette étude démontre que les nitrates provenant de la fertilisation des terres agricoles de ce territoire seraient surtout transférés aux eaux de surface, via les drains agricoles et l'écoulement hypodermique, préservant ainsi la qualité des eaux souterraines de l'aquifère rocheux.

Par ailleurs, une compilation historique des concentrations en nitrites et nitrates a été réalisée afin de présenter un portrait plus complet en termes de couverture spatiale. Cette compilation a été faite pour les puits aménagés au roc (figure 5.12) de même que ceux aménagés dans les dépôts meubles (figure 5.13).

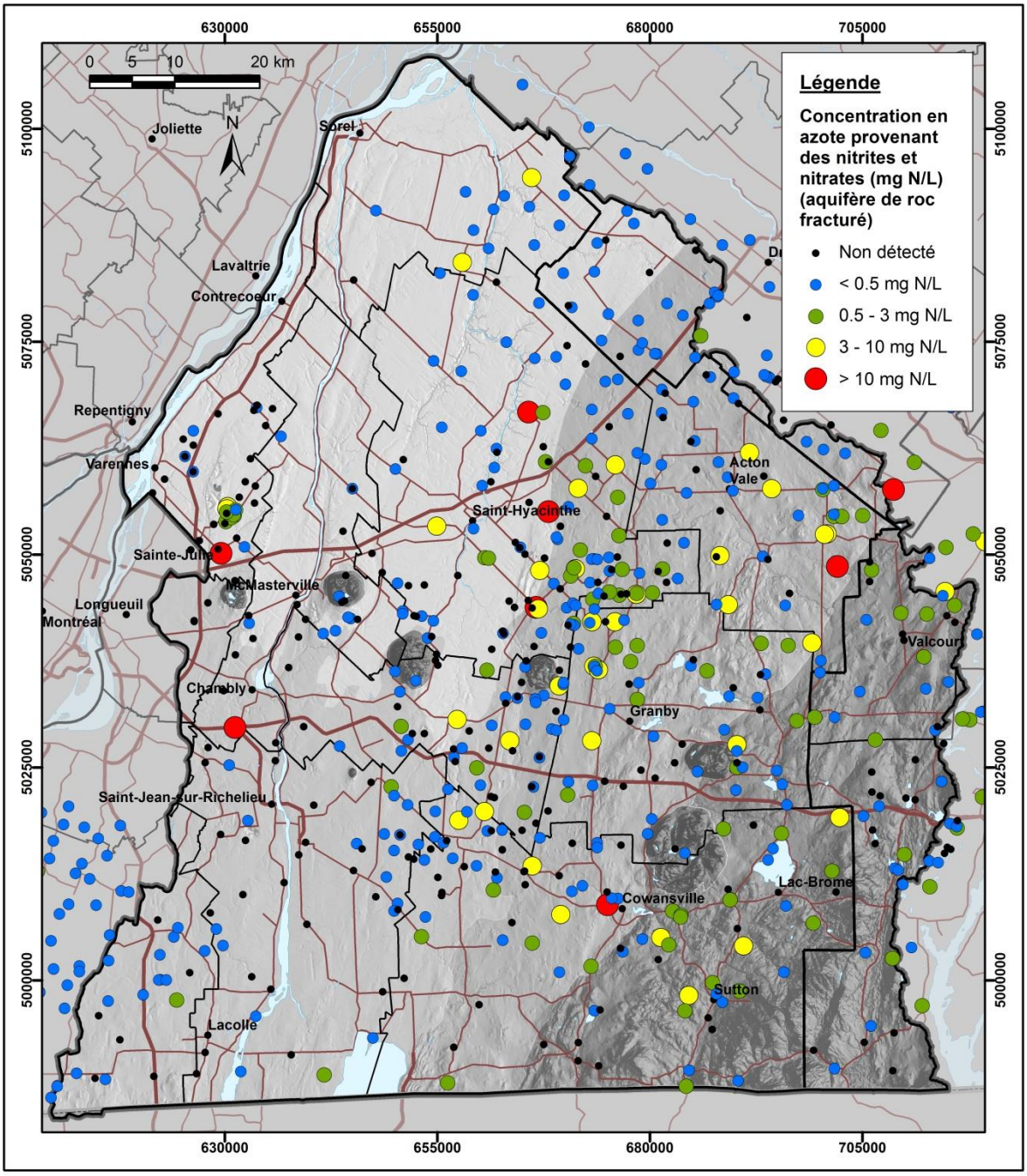


Figure 5.12 : Compilation historique des concentrations en azote (N) associées aux nitrites (NO_2) et nitrates (NO_3) pour les puits aménagés dans le roc

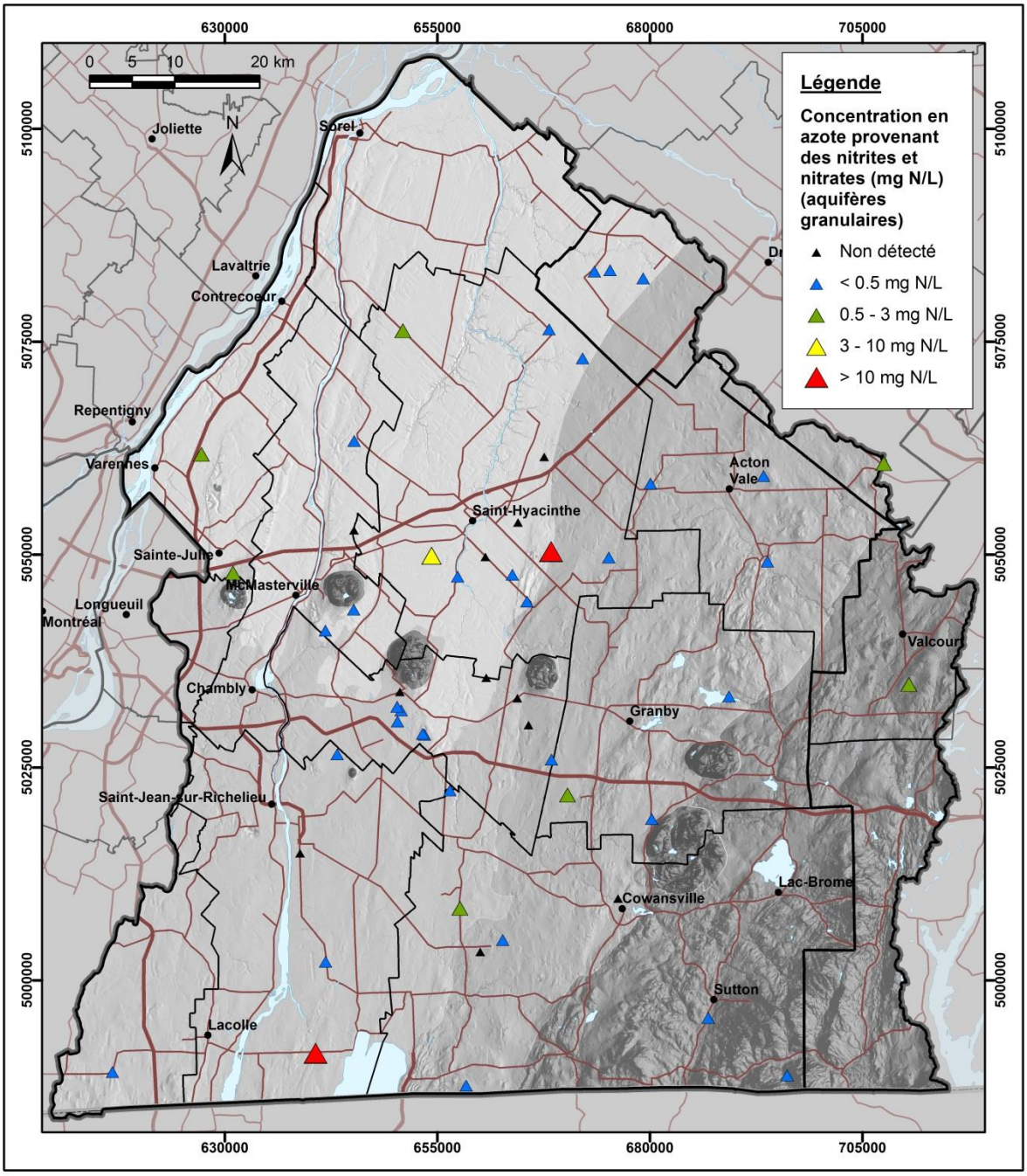


Figure 5.13 : Compilation historique des concentrations en azote (N) associées aux nitrites (NO_2) et nitrates (NO_3) pour les puits aménagés dans les dépôts meubles

Les données utilisées pour l'élaboration de ces figures regroupent les résultats compilés par Beaudry (2013) (sections 2.2.4 et 4.6), ceux du Système d'information hydrogéologique (MDDEFP, 2009) ainsi que les résultats issus de plusieurs études antérieures (datant des années 1960 à aujourd'hui) collectées dans le cadre du projet. Sur ces figures, les échantillons présentant une concentration supérieure à 10 mg N/L sont identifiés en rouge compte tenu qu'ils dépassent la concentration maximale acceptable (CMA) définie par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (MDDEFP, 2012). Quant aux échantillons en jaune (3 à 10 mg N/L), ils respectent la CMA du règlement, mais sont à un niveau exigeant la prise d'actions pour éviter

l'augmentation de la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Les résultats en vert (0.5 à 3 mg N/L) représentent des concentrations significatives qui dépassent les valeurs naturelles et impliquent probablement des apports anthropiques d'azote. Finalement, les résultats en bleu (< 0.5 mg N/L) et en noir (non détecté) représentent des concentrations faibles ou nulles qui sont non significatives.

Les concentrations en $N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$ retrouvées dans l'aquifère rocheux (figure 5.12) présentent quelques dépassements dans la Plate-forme du Saint-Laurent et dans la zone externe des Appalaches. Malgré cela, les concentrations en nitrites et nitrates répertoriées dans la Plate-forme du Saint-Laurent (nord et sud) sont généralement plus faibles que celles dans les zones externe et interne des Appalaches, ce qui reflète la plus faible vulnérabilité du contexte de la Plate-forme du Saint-Laurent en comparaison de la vulnérabilité moyenne à élevée associée aux Appalaches (zones interne et externe). Plusieurs puits présentent des concentrations excédant 3 mg N/L, qui exigeraient une évaluation plus détaillée de la situation. Il faut toutefois garder en tête que les données historiques compilées pour préparer ces cartes n'ont été validées que sommairement et qu'elles couvrent une période s'étendant sur plusieurs années.

La figure 5.13 montre quant à elle que peu de données sont disponibles pour les puits aménagés dans les dépôts meubles, même en compilant les données historiques. Par conséquent, la faible densité de données ne permet pas d'identifier des tendances claires pour ces puits. Toutefois, ces puits sont plus à risque d'avoir des concentrations en nitrites et nitrates excédant les normes de potabilité (10 mg N/L) ou exigeant des actions correctrices (3 mg N/L). Les puits approvisionnés par les dépôts meubles devraient donc être vérifiés systématiquement pour les concentrations en azote (nitrite et nitrate), même si on observe que dans plusieurs cas ces puits ne sont pas affectés par des concentrations significatives en nitrates.

5.4.2 Qualité de l'eau de surface

Le portrait géochimique des ressources en eau souterraine de la Montérégie Est montre que l'impact des activités agricoles sur la qualité de l'eau, particulièrement la présence de nitrites et de nitrates, n'est pas encore bien défini. Les concentrations mesurées dans l'aquifère rocheux régional sont généralement faibles, mais elles excèdent significativement les concentrations naturelles dans certains contextes hydrogéologiques et présentent quelques dépassements de la norme applicable. Tel que décrit dans Thériault (2013), les fertilisants agricoles semblent davantage transférés dans l'eau de surface, plutôt que dans l'eau souterraine, via les drains agricoles ou un écoulement hypodermique, pour atteindre éventuellement les cours d'eau (section 6.5).

Afin de dresser un portrait plus complet de la qualité des ressources en eau en Montérégie Est, la présente section fait la synthèse de certaines données existantes sur la qualité de l'eau de surface. Les données utilisées proviennent principalement de la *Banque de données sur la qualité du milieu aquatique* (BQMA) (MDDEFP, 2011d). Celle-ci a été utilisée afin d'illustrer les fluctuations dans le temps de la présence de nitrites et nitrates ($N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$) et de phosphore total dissous dans l'eau de surface. L'indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQBP) (Hébert, 1997) a également été calculé à l'aide des données disponibles afin de suivre l'évolution de la qualité générale de l'eau de surface à certaines stations. Seules les données provenant des stations d'échantillonnage des rivières Richelieu (4 stations) et Yamaska (5 stations) ont été compilées (figure 5.14). Les 4 stations d'échantillonnage de la rivières Richelieu se situent entre Lacolle et Sorel et les 5 stations de la rivière Yamaska sont situées entre l'exutoire du lac Brome et la municipalité de Yamaska. Les concentrations en nitrites-nitrates et en phosphore sont représentées pour les années 1979 à 2011, tandis que l'indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQBP) a été calculé pour les années 1990 à 2008.

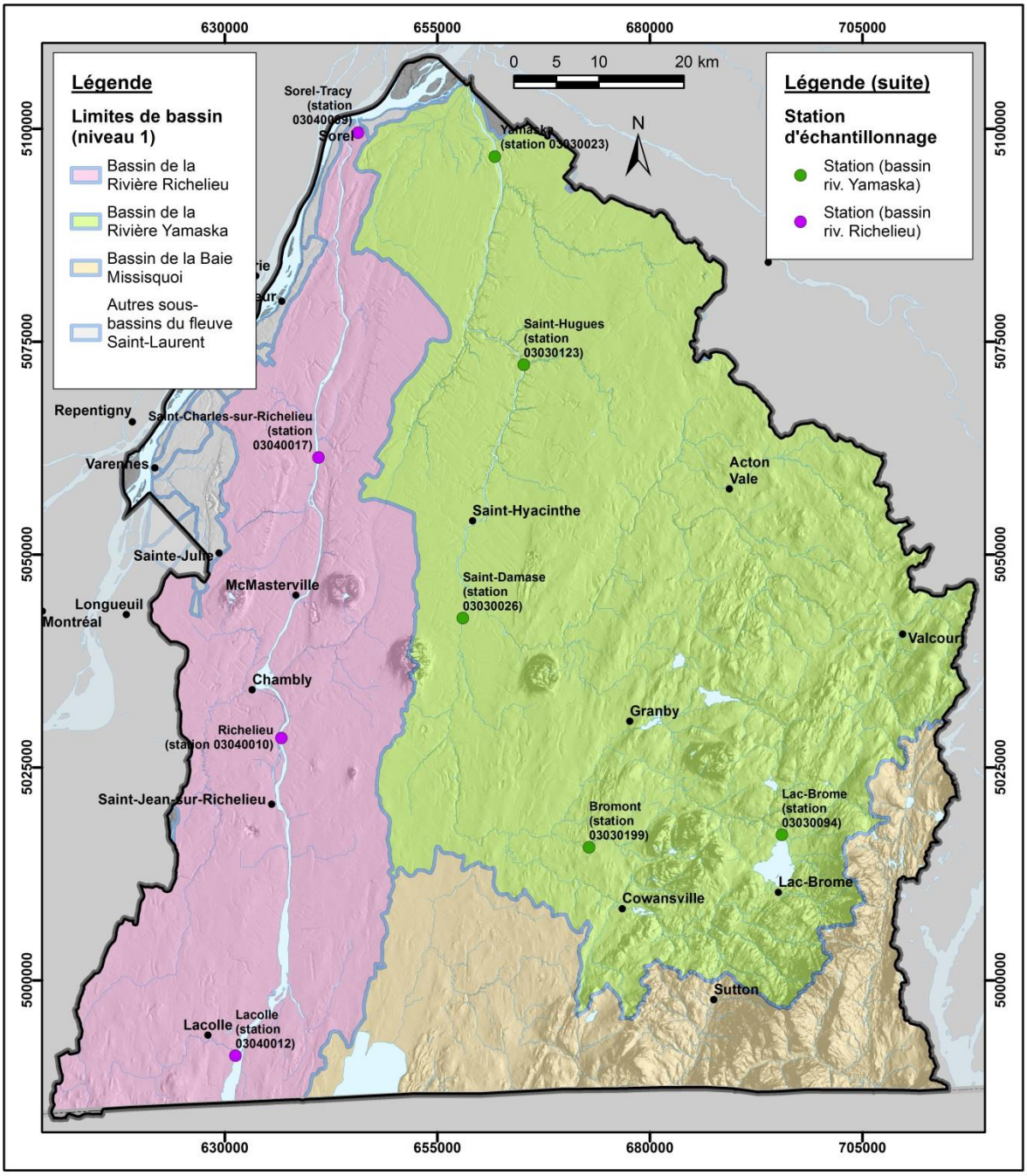


Figure 5.14 : Stations de suivi et d'échantillonnage pour les rivières Richelieu et Yamaska

5.4.2.1 Nitrites, nitrates et phosphore

Les figures 5.15 et 5.16 illustrent l'évolution des concentrations moyennes annuelles en nitrites et nitrates ainsi qu'en phosphore total dissous pour les stations des rivières Richelieu et Yamaska entre les années 1979 et 2011. Il y a une augmentation des concentrations, pour chacun des paramètres, de l'amont vers l'aval. De 1979 à 2011, il y a aussi une tendance générale à la hausse pour les nitrites-nitrates de la Richelieu, mais elle est moins marquée pour la rivière Yamaska, où les concentrations sont plus élevées. À l'inverse, les concentrations en phosphore total présentent une tendance à la baisse entre 1979 et 2011 pour les deux rivières.

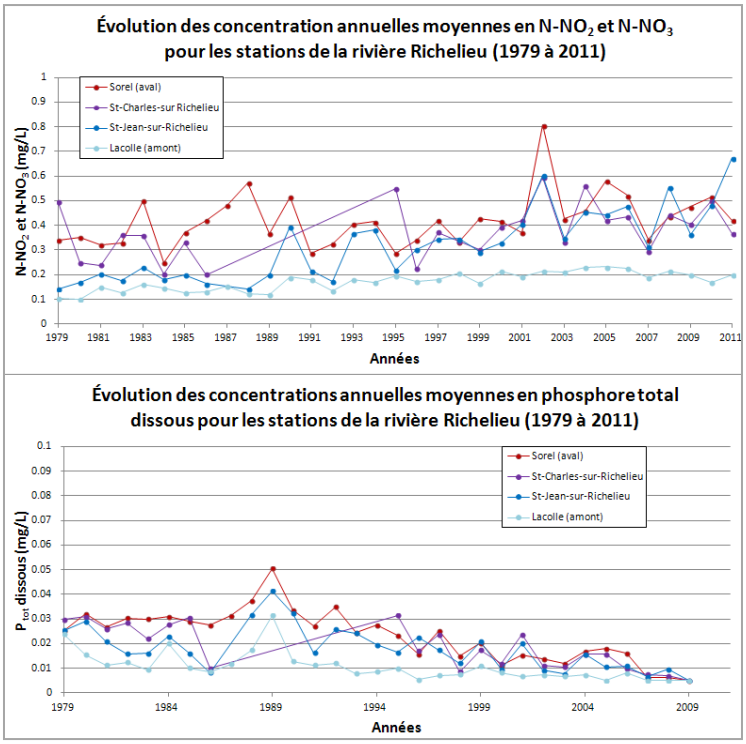


Figure 5.15 : Évolution des concentrations en nitrites et nitrates (N-NO_2 et N-NO_3) et en phosphore total dissous (Ptot dissous), entre les années 1979 et 2011, pour la rivière Richelieu

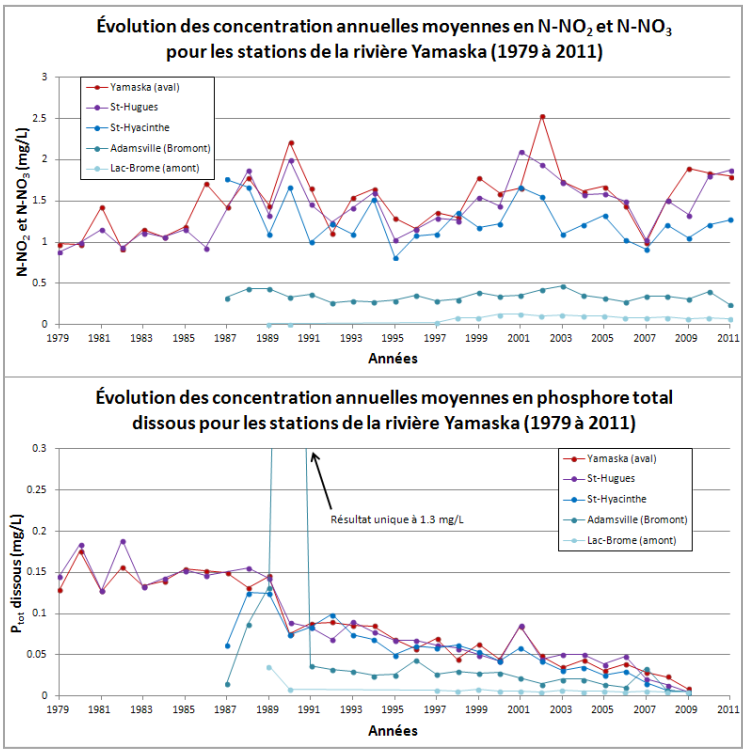


Figure 5.16 : Évolution des concentrations en nitrites et nitrates (N-NO_2 et N-NO_3) et en phosphore total dissous (Ptot dissous), entre les années 1979 et 2011, pour la rivière Yamaska

La comparaison des résultats pour les deux rivières montre que les concentrations moyennes en nitrite-nitrate et en phosphore total dissous sont trois fois plus élevées dans la rivière Yamaska que dans la rivière Richelieu. Les concentrations moyennes annuelles pour l'ensemble des stations de la rivière Richelieu varient autour de 0.3 mg N/L pour les nitrites-nitrates et de 0.02 mg/L pour le phosphore total dissous. Pour la rivière Yamaska, les moyennes en nitrites-nitrates sont de l'ordre de 1.0 mg N/L et les moyennes en phosphore total dissous de l'ordre de 0.07 mg/L.

Par ailleurs, la qualité générale de l'eau de surface peut être classée à l'aide de l'IQBP. Ce système de classification réfère à un contexte d'utilisation de l'eau lié à la baignade, aux activités nautiques, à l'approvisionnement en eau à des fins de consommation, à la protection de la vie aquatique et à la protection du plan d'eau contre l'eutrophisation. Dix (10) descripteurs sont utilisés dans le calcul de l'IQBP : phosphore total, coliformes fécaux, demande biochimique en oxygène (DBO5), saturation en oxygène (O_2), azote ammoniacal, nitrites-nitrates, chlorophylle-a-totale, pH, turbidité et matières en suspension. Le descripteur responsable du sous-indice de qualité le plus bas (de plus faible qualité), sera considéré comme le descripteur limitant et son sous-indice deviendra l'IQBP.

La figure 5.17 illustre l'évolution des IQBP pour les stations des rivières Richelieu et Yamaska entre les années 1990 et 2008. On note une dégradation de la qualité de l'eau de l'amont jusqu'à l'aval des deux cours d'eau.

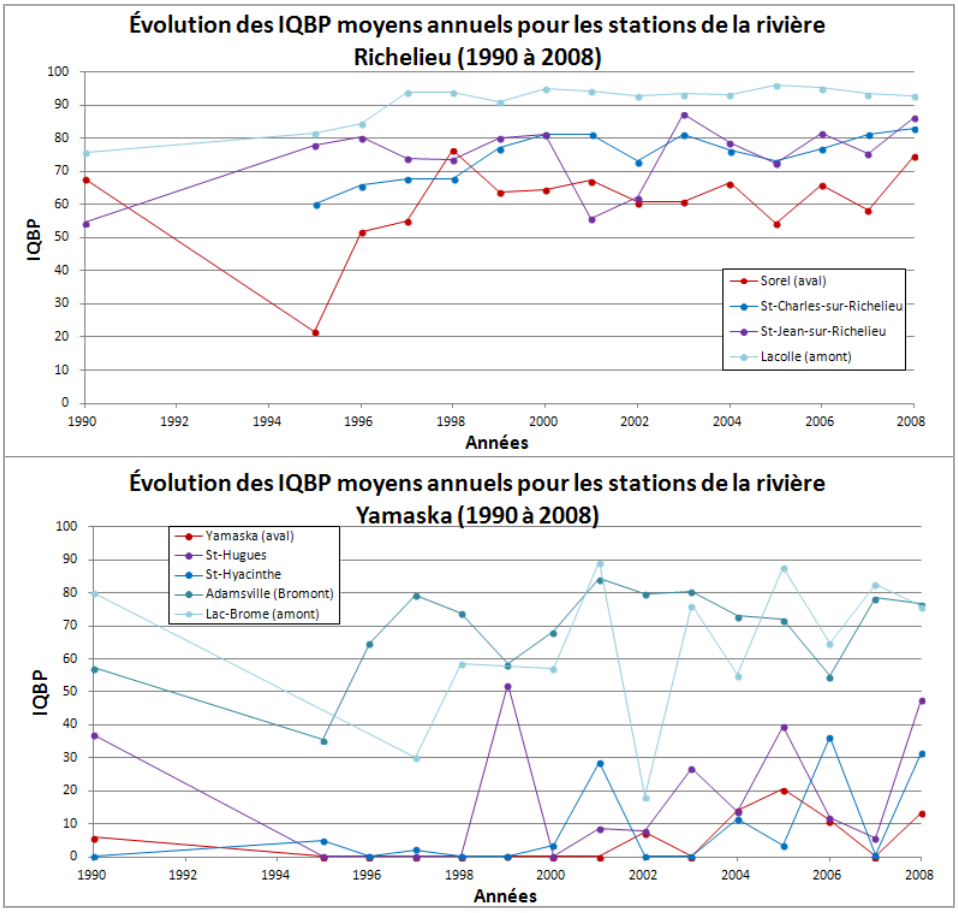


Figure 5.17 : Évolution de l'IQBP annuel moyen pour les stations des rivières Richelieu (haut) et Yamaska (bas), de l'année 1990 à l'année 2008

La rivière Richelieu présente des IQBP annuels moyens variant généralement entre 95 (amont) et 55 (aval), soit une qualité variant de « bonne » à « douteuse » selon la classification du MDDEFP. Les IQBP annuels moyens pour la rivière Yamaska varient généralement entre 90 et 50 pour les deux stations en amont (qualité « bonne » à « douteuse »), mais entre 40 et 0 pour les stations plus en aval (qualité « mauvaise » à « très mauvaise »). En termes d'IQBP, les eaux de la rivière Yamaska sont donc de moindre qualité que celles de la rivière Richelieu.

Les « descripteurs limitants » caractérisant la qualité des eaux de la rivière Richelieu sont principalement les matières en suspension (dans 41% des cas, surtout pour les 2 stations en aval), la chlorophylle-a-totale (dans 27% des cas, surtout pour la station la plus en amont à Lacolle) ainsi que les coliformes fécaux (dans 25% des cas, surtout à proximité de St-Jean-sur-Richelieu). Les nitrites et nitrates ainsi que le phosphore total ont également été identifiés comme descripteur limitant à quelques reprises seulement. Le descripteur limitant le plus fréquent pour la rivière Yamaska est la chlorophylle-a-totale (88% des cas). On retrouve occasionnellement le phosphore total, les coliformes fécaux, les solides en suspension ainsi que les nitrites et nitrates à titre de descripteur limitant, sans égard à la station.

5.4.2.2 Conclusions sur la qualité des eaux de surface

Sur la base des concentrations annuelles moyennes calculées pour quelques stations d'échantillonnage de l'eau de surface localisées sur les rivières Richelieu et Yamaska au cours des 32 dernières années, ainsi que sur la base des indices de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQBP) moyens calculés pour ces mêmes stations sur une période de 18 ans, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- La qualité des eaux se dégrade de l'amont vers l'aval des deux cours d'eau
- Les concentrations moyennes en nitrites-nitrates ont eu une tendance à la hausse au cours des 30 dernières années, tandis que les concentrations en phosphore total dissous sont plutôt à la baisse
- Les concentrations moyennes en nitrites-nitrates ainsi qu'en phosphore total dissous mesurés dans les stations de la rivière Yamaska sont généralement 3 fois plus élevées que celles mesurées dans la Richelieu
- Selon l'IQBP, la qualité des eaux de la Richelieu varie de « bonne » en amont à « douteuse » en aval tandis que la qualité des eaux de la Yamaska varie de « satisfaisante » en amont à « très mauvaise » en aval

5.5 Activités anthropiques et risques pour l'eau souterraine

Le livrable 23 présente une carte de l'indice de densité des activités anthropiques qui vise à évaluer l'impact potentiel des activités anthropiques sur la qualité des ressources en eau souterraine. Ce livrable cartographique vise principalement à faire ressortir les tendances régionales en termes de pression des activités anthropiques sur la qualité des ressources en eau souterraine. Une représentation de la densité d'activités pondérée a été préférée à une représentation des activités individuelles, notamment afin de respecter les contraintes de confidentialité sur les données ponctuelles, mais aussi parce qu'il y a des incertitudes sur les données ainsi que sur le processus d'évaluation du risque relatif des différents types d'activités. Une validation de la nature des activités dans un secteur à fort indice de densité des activités anthropiques sera nécessaire avant d'entreprendre des actions visant à réduire les pressions sur la qualité de l'eau souterraine. Tel que discuté à la section 5.6, il est aussi nécessaire de considérer la vulnérabilité de l'aquifère pour juger du potentiel de dégradation de la qualité de l'eau souterraine. La méthodologie utilisée pour la préparation du livrable 23 est résumée ci-dessous et présentée à l'annexe 3.

5.5.1 Sources et traitement des données

Les données utilisées pour la préparation du livrable 23 proviennent en partie du système de classification des codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF) (MAMROT, 2010c). La classification des CUBF se prête facilement au traitement et au tri des données permettant de leur attribuer un niveau de risque potentiel selon le type d'activité. Dans le but de faciliter l'utilisation des données, les activités anthropiques répertoriées ont aussi été classifiées selon le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN). D'autres données ont aussi été utilisées pour compléter l'information provenant du système de classification des CUBF, notamment la base de données sur les sites d'exploitation minière et de substances minérales (SIGEOM) (MRN, 2008a), le répertoire des dépôts de sols et de résidus industriels (MDDEFP, 2011e) ainsi que les données provenant d'organismes régionaux, notamment les MRC et les directions régionales du MDDEFP.

Les données compilées ont par la suite été analysées afin de sélectionner les activités jugées pertinentes dans le cadre de la préparation du livrable 23 du PACES. La sélection a été faite en se basant sur différents documents, notamment l'annexe 4 du Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains du Gouvernement du Québec (Publications du Québec, 2003) et l'annexe 5 du rapport sur la gouvernance des eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (SESAT, 2010). La liste complète des activités sélectionnées est présentée à l'annexe 7. Afin de simplifier leur présentation, ces activités ont été regroupées par type d'activité :

- Activité récréative (golf)
- Agriculture, exploitation forestière, et services connexes
- Assainissement et gestion des déchets
- Autoroute et route
- Base d'entraînement militaire
- Extraction de substances minérales métalliques et non métalliques
- Fabrication de produits minéraux non métalliques
- Fabrication, réparation et maintenance du matériel de transport
- Industrie chimique
- Industrie de la transformation et utilisation des métaux
- Industrie électrique et électronique
- Industries du bois, pâte à papier et produits du papier
- Industrie de produits alimentaires
- Installation septique
- Production et distribution d'électricité et de gaz
- Production et distribution d'électricité et de produits pétroliers
- Raffinage et transformation de sous-produits pétroliers
- Transport, entreposage ou utilisation de produits pétroliers, chimiques ou toxiques

Certains des groupes d'activités anthropiques, notamment les activités liées à l'agriculture, à l'exploitation forestière, au système routier et aux installations septiques, n'ont toutefois pas été considérés directement pour le livrable 23 étant donné la nature de leur impact potentiel (ex. : impact diffus pour l'agriculture et les routes, impact généralement très local pour les installations septique). Toutefois, l'impact potentiel de ces activités devrait être considéré lors d'études locales puisqu'il peut grandement varier selon la densité et l'intensité de ces activités.

Pour les activités anthropiques considérées, la méthode d'évaluation de leur impact potentiel sur la qualité de l'eau souterraine a été adaptée de méthodologies développées et utilisées dans le cadre de projets similaires (Foster et Hirata, 1988; SESAT, 2010; US EPA, 1991; UNESCO, 2002). Pour chacune des activités considérées, quatre paramètres sont évalués de manière

qualitative : la toxicité du ou des produits présents, la quantité potentielle de produits manipulés, la superficie approximative exploitée par l'activité et la récurrence des rejets possibles vers l'environnement, c'est-à-dire accidentels (ex. : un déversement accidentel) ou fréquents (ex. : rejets industriels contrôlés ou application de pesticides). Ces paramètres ont été sélectionnés en se référant à divers rapports concernant la détermination de l'impact potentiel des activités sur l'eau souterraine. Les activités ont ainsi été regroupées en termes d'impact potentiel en quatre classes : faible, modéré, élevé et très élevé. Cette évaluation vise à attribuer à chaque activité un poids relatif afin de fournir un portrait régional de la pression des activités anthropiques, en termes de risque appréhendé, sur la qualité des ressources en eau souterraine.

5.5.2 Densité des activités anthropiques en Montérégie Est

Le format cartographique du livrable 23 représente la densité des activités pondérée par le poids de l'impact des activités anthropiques la région d'étude donnée. Ce format permet une représentation régionale de la pression potentielle des activités anthropiques sur la qualité de l'eau souterraine sans avoir à identifier celles-ci ponctuellement. La carte montre cinq (5) classes de densité ainsi que le contour représentant le 75^{e} percentile de la densité pondérée. Naturellement, l'indice de densité des activités anthropiques reflète la présence de centres urbains ainsi que de fortes activités industrielles. Les plus fortes valeurs étant estimées dans les secteurs de Sorel, Saint-Hyacinthe, Chambly, Granby et Saint-Jean-sur-Richelieu. Tel que discuté à la section 5.6, en plus de la densité des activités anthropiques, il faut aussi considérer la vulnérabilité de l'aquifère et l'importance de son exploitation pour cibler les secteurs prioritaires pour la protection de la qualité de l'eau souterraine.

5.6 Gestion durable des ressources en eau souterraine

Un projet pilote a été supporté par le MDDEFP pour produire et évaluer des indicateurs de gestion durable des ressources en eau souterraine à partir des données issues du projet réalisé en Montérégie Est dans le cadre du *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines* (PACES) (Martin et al., 2012). Ces travaux font suite au rapport du *Conseil des académies canadiennes* (CAC, 2009) qui avait défini cinq objectifs à atteindre pour permettre une gestion durable des ressources en eau souterraine. Le CAC avait aussi recommandé le développement d'indicateurs appropriés qui permettraient d'évaluer l'atteinte des objectifs de gestion durable. Dans cette perspective, le *Conseil canadien des ministres de l'environnement* (CCME, 2011) a développé un projet pilote pour évaluer des indicateurs qui pourraient être appropriés pour la variété de contextes hydrogéologiques rencontrés au Canada. Le projet pilote et les indicateurs ont été définis par Gordon (2011) sur la base, entre autre, d'un rapport issu des travaux d'un comité conjoint UNESCO-IAEA-IAH (Vrba et Lipponen, 2007).

5.6.1 Principes de gestion durable

Le CCME a adopté les 5 objectifs de gestion durable proposés par le CAC : 1) Protéger la quantité d'eau souterraine; 2) Protéger la qualité de l'eau souterraine; 3) Préserver la santé des écosystèmes; 4) Assurer le bien-être socio-économique; et 5) Appliquer les principes de bonne gouvernance. De plus, le CCME a intégré les indicateurs de gestion durable non seulement en lien avec ces objectifs, mais aussi en relation avec leur fonction dans le modèle *DPSIR*. La gestion durable des eaux souterraines est ainsi représentée dans le modèle *DPSIR* par rapport aux « forces motrices » (*Driver*), aux « pressions » naturelles ou humaines (*Pressure*), à son « état » (*State*), aux « impacts » socioéconomiques et sur les écosystèmes (*Impact*), ainsi que sur les réponses (*Response*) qui peuvent être apportées par les gestionnaires de la ressource en relation avec l'un ou l'autre des aspects du modèle *DPSIR* concernant les ressources en eau souterraine.

5.6.2 Indicateurs

Un ensemble d'indicateurs d'intérêt pour les partenaires régionaux de la Montérégie Est (Martin et al., 2012) ont été dérivés à partir des données PACES en relation avec les objectifs de gestion durable. Comme le montre la figure 5.18, l'ensemble de ces indicateurs permettrait aux gestionnaires régionaux 1) de mieux saisir l'état de la ressource, 2) d'identifier les problématiques pertinentes à leur région, et 3) de cibler les secteurs prioritaires d'intervention.

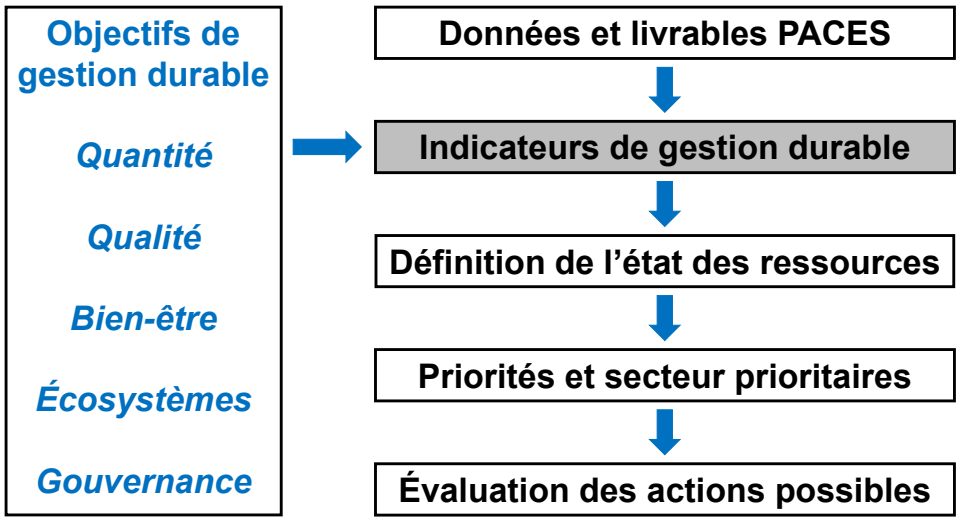


Figure 5.18 : Indicateurs de gestion durable suggérés par le CCME

Le tableau 5.7 représente l'ébauche d'un cadre qui a pour but de faciliter le transfert de l'information concernant l'état des ressources en eau souterraine, ainsi que de guider les actions par rapport aux problématiques et aux régions prioritaires. Ce tableau met en relation les objectifs de gestion durable, les enjeux reliés à ces objectifs, les données PACES d'intérêt par rapport à ces enjeux et les indicateurs pouvant être dérivés de ces données, regroupés selon qu'ils reflètent une pression/force motrice ou une état/impact. Enfin, les réponses potentielles qui pourraient être apportées par les gestionnaires régionaux par rapport à des problématiques soulevées par les indicateurs sont aussi présentées dans le tableau.

Les figures 5.19 à 5.24 montrent des exemples de cartes d'indicateurs dérivées des résultats du projet PACES. Certaines des cartes sont également présentées dans l'atlas hydrogéologique du projet (annexe 1). Ces indicateurs, dérivés à l'échelle des municipalités, montrent qu'il est possible de transmettre l'information sur l'état des ressources de façon relativement simple.

Au niveau des indicateurs de quantité (ou disponibilité) de la ressources, les statistiques sur le rapport entre l'utilisation d'eau et la recharge à l'échelle municipale (figure 5.19) permet d'établir si l'exploitation de l'eau souterraine se fait à un niveau soutenable. De façon générale, la proportion de la recharge qui est consommée est inférieure à 10 %, indiquant que le niveau d'exploitation est soutenable. Toutefois, dans certaines municipalités la proportion de la recharge qui est utilisée dépasse 100 %. Ce sont des situations où une forte utilisation locale est alimentée par la recharge de la nappe se faisant sur un plus grand territoire, à l'extérieur de la municipalité. Cela n'implique toutefois pas que le niveau d'exploitation ne soit pas soutenable. Par exemple, à Napierville, un piège hydraulique contrôlant un site contaminé extrait une quantité significative d'eau souterraine, ce qui mène à un rapport consommation/recharge excédant 300 % pour le territoire de cette municipalité.

Le tableau 5.7 résume les actions envisageables en cas de problème de quantité disponible ou de surexploitation : rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement au niveau local; mettre en place un programme d'économie d'eau; développer un règlement spécifiant les usages prioritaires pour éviter les conflits d'usage; faire un suivi périodique des niveaux d'eau pour les zones de forte utilisation (ex. : secteurs avec puits municipaux ou secteurs à forte densité de puits résidentiels), définir des zones de conservation ou à protéger.

Les figures 5.20 et 5.21 montrent des indicateurs permettant d'évaluer les risques de dégradation de la qualité de l'eau souterraine en relation avec les activités anthropiques. La figure 5.20 présente la vulnérabilité de l'aquifère rocheux (livrable 22) ainsi que l'indice de densité des activités anthropiques (livrable 23). Le risque de dégradation de la qualité de l'eau souterraine causé par les activités anthropiques sera plus élevé si, pour un endroit donné, la vulnérabilité de l'aquifère et la densité d'activités anthropiques potentiellement polluantes sont élevées. Afin de faciliter l'évaluation du risque de dégradation de la qualité de l'eau souterraine à l'échelle municipale, des cartes d'indicateurs montrant la proportion de zones vulnérables ainsi que la densité d'activités anthropiques à l'échelle des municipalités sont montrées à la figure 5.21. Les secteurs où de fortes densités d'activités anthropiques sont situées dans des municipalités où la proportion de zones vulnérables est faible indiquent un risque modéré de dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Par contre, les secteurs qui sont caractérisés à la fois par une forte densité d'activités et une forte proportion de zones vulnérables présentent un risque plus élevé de dégradation de la qualité de l'eau souterraine. De plus, la figure 5.22 montre que certains secteurs ont également une forte densité de puits résidentiels, montrant que l'eau souterraine est une importante source d'approvisionnement en eau. Ce recoupement d'indicateurs (i.e. vulnérabilité, activités anthropiques, utilisation d'eau) permet de prioriser les secteurs les plus importants pour la protection de l'eau souterraine contre la dégradation de la qualité pouvant être causée par les activités anthropiques.

Le tableau 5.7 résume les actions envisageables en cas de situations actuelles de dégradation de la qualité de l'eau souterraine : traitement de l'eau souterraine; élimination de la source de contamination; recherche de nouvelles sources d'approvisionnement; ou suivi périodique de qualité pour les secteurs à forte densité de puits privés où des problématiques anthropiques ont été identifiées. Toutes ces actions sont relativement coûteuses et la prévention de la dégradation représente une approche beaucoup plus efficace et économique de manière générale. En cas de situations potentielles (appréhendées) de dégradation de la qualité, les actions suivantes peuvent être envisagées (tableau 5.7) : vérification des sources potentielles de contamination car le risque réel relié aux activités pourraient être moindre que présumé sur la base des indicateurs; plan de suivi de la qualité de l'eau souterraine pour les activités présentant des risques significatifs et situées dans des zones d'utilisation significative d'eau souterraine jugées vulnérables; changement des pratiques pour réduire le risque relié aux activités ayant le plus de potentiel de contamination; changement de vocation ou d'affectation du territoire pour réduire la densité des activités anthropiques; élimination des sources présentant un risque élevé; recherche de sources d'approvisionnement moins à risque.

La figure 5.22 met en relation la carte de densité des puits résidentiels avec les zones de qualité relative de l'eau souterraine. Le livrable 24, décrit à la section 5.4, a montré que la qualité naturelle de l'eau souterraine en Montérégie Est pouvait présenter des problèmes et même être « non potable » sur une grande partie de la région. Dans les zones de qualité « passable » de l'eau souterraine, la proportion de dépassements des critères de potabilité pour certains composés chimiques peut être élevée (tableau 5.5). La reconnaissance des groupes d'eau permet d'évaluer la possibilité de dépassement de certains composés : par exemple, pour les eaux de qualité jugée « passable », 42% des échantillons du groupe M2 ont des dépassements en baryum (Ba) et 11% des échantillons ont des dépassements en fluor (F) pour le groupe A2 (tableau 5.5). Le recoupement des zones des différents groupes d'eau présentant des

proportions importantes de dépassements de critères de qualité avec la carte de densité de puits résidentiels permet d'identifier les secteurs prioritaires où une vérification de la potabilité de l'eau souterraine pourrait être faite de façon à protéger la santé publique.

Le tableau 5.7 résume les actions envisageables pour des cas de problèmes de qualité naturelle de l'eau souterraine : analyser les paramètres chimiques susceptibles d'avoir des dépassements de qualité, de façon à identifier les puits résidentiels ou municipaux affectés; réaliser un suivi de la qualité de l'eau (ou mettre en place des mesures incitatives afin de supporter les utilisateurs à le faire) pour les secteurs à forte densité de puits privés où des problématiques ont été identifiées dans des contextes similaires sur la base des groupes d'eau (ex. : dépassements d'origine naturelle); utilisation de systèmes de traitement de l'eau appropriés pour les cas avérés de dépassements des critères de potabilité; recherche de nouvelles sources d'approvisionnement, dans le cas de systèmes alimentant un réseau, si les coûts de traitement sont trop élevés par rapport à l'aménagement d'un nouveau captage.

Les figures 5.23 et 5.24 montrent, respectivement, des indicateurs permettant d'évaluer l'importance de l'approvisionnement en eau souterraine résidentiel et agricole. À la figure 5.23, on voit que les secteurs avec de grandes densités de puits correspondent aussi à des municipalités à forte proportion d'utilisation d'eau souterraine à des fins résidentielles. La figure 5.24 montre la proportion des zones agricoles par municipalité ainsi que la proportion d'eau souterraine qui est utilisée à des fins agricoles. Ces indicateurs permettent d'identifier où l'usage agricole de l'eau souterraine est important. Cependant, pour la partie nord-ouest de la région d'étude, les résultats sont faussés par le fait que l'approvisionnement en eau se fait via des réseaux de distribution et que la faible utilisation de l'eau souterraine dans ces secteurs est uniquement à des fins agricoles. Ces cartes permettent d'identifier des secteurs où des conflits d'usage pourraient survenir, mais il faut aussi considérer les cartes de la figure 5.19 montrant des indicateurs de la consommation d'eau souterraine par rapport à la recharge pour déterminer s'il y a, ou non, une pression importante dans une municipalité de la consommation par rapport au renouvellement de l'eau souterraine par sa recharge. Le tableau 5.7 résume les actions envisageables pour assurer l'apport socioéconomique de l'eau souterraine pour les différents usages en cas de limitation des ressources par rapport à la consommation actuelle ou aux besoins futurs : changement des pratiques; nouvelles sources d'approvisionnement.

Enfin, bien que peu d'indicateurs soient pertinents pour juger de la bonne gouvernance de la ressource en eau souterraine, le tableau 5.7 résume les actions envisageables pour assurer la bonne gouvernance à l'échelle régionale : faire le transfert de l'information aux organismes concernés et à la population; faire la formation du personnel impliqué dans l'aménagement du territoire et la gouvernance de l'eau; faire le développement d'outils permettant d'exploiter l'information issue des projets PACES et d'autres sources pour orienter la prise de décision; faire l'accompagnement des organismes impliqués dans la gouvernance et la gestion de la ressource; assurer la synthèse et la mise à jour des informations pertinentes sur la ressource et son utilisation. Le développement d'une bonne gouvernance de la ressource à l'échelle régionale devra être appuyé par les agences gouvernementales ainsi que par le milieu scientifique puisque beaucoup reste à faire pour développer la bonne gouvernance des ressources en eau souterraine. Les organismes régionaux qui reçoivent la multitude d'information produite par les projets PACES vont devoir apprendre à utiliser ces informations en plus de développer les mécanismes consultatifs et décisionnels reliés à la gouvernance de l'eau souterraine. Les indicateurs d'exploitation durable de la ressource en eau souterraine peuvent jouer un rôle important pour faciliter le transfert de l'information en « traduisant » les livrables spécialisés produits par les projets PACES sous une forme facilitant l'identification des problématiques importantes et des secteurs d'intervention prioritaires.

Tableau 5.7 : Indicateurs de développement durable pouvant être dérivés des données des projets PACES

Objectif de gestion durable et lien avec le projet pilote	Enjeux	Données PACES reliées à l'objectif	Indicateurs (Force motrice - Pression)	Indicateurs (État – Impact)	Réponses potentielles
Quantité d'eau souterraine Les taux de recharge et de pompage varient grandement dans la vaste région d'étude. Certaines municipalités sont au prise avec des conflits d'usage, alors que d'autres considèrent l'utilisation d'eau souterraine alors que la pression sur l'eau de surface augmente, tant au niveau de sa quantité que de sa qualité.	Utilisation	- Population - Usage total d'eau (L26) - Usage total d'eau souterraine (ES) - Usage ES résidentiel - Usage ES agricole - Usage ES industriel - Puits municipaux - Puits résidentiels (SIH)	- Population (Mu) - Densité de population (nb/km^2) - Population utilisant l'eau souterraine (Mu) - % de consommation en eau souterraine (Mu & MRC) - Usage résidentiel/ total (Mu) - Densité de puits résidentiels (nb/km^2) *	- Eau souterraine consommée / Recharge (Mu) * - Problèmes municipaux d'approvisionnement (MRC) *	- Nouvelles sources d'approvisionnement - Économie d'eau - Règlement de conflits d'usage - Suivi périodique des niveaux d'eau pour les zones de forte utilisation (ex. : secteur avec puits municipaux ou à forte densité de puits résidentiels)
	Disponibilité et Accessibilité	- Recharge - Suivi des niveaux d'eau (L27) - Occupation du sol (L7) - Contextes des puits municipaux - Épaisseur des dépôts granulaires grossiers (≈ L15) - Paramètres hydrogéologiques (L21)	- % de milieux urbanisés - Superficie drainée (ou densité de drainage agricole) - Densité de puits résidentiels (/km^2) dans les zones vulnérables (ou de recharge) (Mu)	- Recharge (Mu) - Tendance des niveaux d'eau (local) - Recharge / Population (Mu)* - Capacités typiques et capacités spécifiques des puits (résidentiels et municipaux) (Mu) - Zones de dépôts meubles grossiers épais (>10 m)	- Définition de zones de conservation ou zones à protéger - Recherche en eau / travaux locaux
Qualité d'eau souterraine Plusieurs secteurs où l'utilisation de l'eau souterraine est importante ou dont la qualité naturelle est bonne sont vulnérables à la contamination. De l'eau saumâtre occupe 2 200 km^2 au nord-ouest de la région. Le gouvernement provincial veut	Dégradation actuelle	- Sites contaminés - Dépassements de normes de composés d'origine anthropique (L24 L25)	-	- Problèmes municipaux de qualité (MRC) * - Nombre de sites contaminés (Mu) *	- Traitement de l'eau - Élimination de la source - Nouvelles sources d'approvisionnement - Suivi périodique de qualité pour secteurs à forte densité de puits privés où problématiques anthropiques ont été identifiées

mettre en œuvre une stratégie de protection des sources d'approvisionnement en eau et l'approche proposée par le projet pilote devrait faciliter la mise en œuvre de la stratégie aux niveaux local et régional.	Dégradation potentielle	- Vulnérabilité (L22) - Activités anthropiques (L23) - Zones de recharge (L28) - Puits résidentiels - Puits municipaux - Aires d'alimentation des puits municipaux	- Activités anthropiques pondérées par niveau de risque relatif de l'activité (/km^2) - % des aires d'alimentation dans des zones vulnérables régionalement (ou de recharge) (Mu) - Densité des activités anthropiques dans les zones vulnérables (ou de recharge) (Mu) *	- Proportion de zones de vulnérabilité élevée (Mu) *	- Vérification des sources potentielles - Plan de suivi de qualité de l'eau souterraine pour les activités présentant des risques significatifs et situées dans des zones d'utilisation significative d'eau souterraine jugées vulnérables - Changement des pratiques pour réduire le risque - Changement de vocation ou d'affectation du territoire - Élimination des sources présentant un risque élevé - Nouvelles sources d'approv. moins à risque
	Qualité naturelle	- Zones de qualité avec % de dépassements de normes - Dépassements de normes de composés d'origine naturelle (L24 L25)	- Puits municipaux dans les zones de faible qualité (Mu) - Densité de puits résidentiels (/km^2) dans les zones de faible qualité (Mu) - Carte de zones de qualité	- Problèmes municipaux de qualité (MRC)	- Analyser les paramètres chimiques susceptibles d'avoir des dépassements de qualité - Suivi ponctuel de qualité (ou mise en place de mesures incitatives afin de supporter les utilisateurs à le faire) pour les secteurs à forte densité de puits privés où des problématiques ont été identifiées dans des contextes similaires (ex. : dépassements d'origine naturelle) - Traitement de l'eau - Nouvelles sources d'approvisionnement

Écosystèmes Des modèles numériques d'écoulement de l'eau souterraine et de surface ont été développés dans le cadre de ce projet. Les données à la base de ces modèles définissent les zones de résurgence d'eau souterraine et indiquent les relations potentielles entre les eaux souterraines et de surface, ainsi que parfois les liens avec les milieux humides. L'usage d'indicateurs reliés à cet objectif comporte des défis puisqu'il est difficile d'évaluer les débits requis pour supporter la santé des écosystèmes et que l'évaluation des changements dans les débits de base est difficile.	Évaluer les débits requis pour atteindre cet objectif pour toute la région	- Débit total (L27) - Débit de base (L27)	-	- Débit de base / débit total (par sous bassin jaugé) *	- Définition des zones de conservation
	Considérer l'eau souterraine dans les modèles hydrologiques, intégrant l'eau de surface, la consommation d'eau et le ruissellement	- Zones de résurgence (L28) - Lien entre aquifères et cours d'eau - Milieux humides (L9)	-	- Relations entre zones de recharge et de résurgence et milieux humides	- Définition des zones de conservation
Socioéconomique Plus de la moitié de la région est dédiée à l'agriculture, et presque tous les agriculteurs en dehors de la zone d'eau saumâtre dépendent de l'eau souterraine. L'eau souterraine est aussi très utilisée dans la transformation alimentaire et l'industrie touristique, et elle est aussi la principale source d'eau potable pour 58% des municipalités avec moins de 5 000 habitants.	Assurer l'usage agricole	- Usage agricole de l'eau souterraine- Territoire agricole (L7, L10) - Valeur de la production agricole[d]	-Usage agricole / usage total (Mu) % * - % de territoire agricole (Mu) *	- Conflits d'usage agricole (MRC) *	- Changement des pratiques - Nouvelles sources d'approvisionnement
	Assurer l'usage industriel	- Usage industriel de l'eau souterraine - Valeur de la production industrielle[d]	- Usage industriel / usage total (Mu) % * - Nombre d'industries avec réseau privé	- Conflits d'usage industriel (MRC) *	- Changement des pratiques - Nouvelles sources d'approvisionnement
	Assurer l'usage résidentiel	- Population - Usage ES résidentiel - Puits municipaux - Puits résidentiels (SIH)	- Usage résidentiel / usage total (Mu) % * - Approvisionnement municipal souterrain	- Conflits d'usage résidentiel (MRC) *	- Changement des pratiques - Nouvelles sources d'approvisionnement

Bonne gouvernance La gestion de l'eau souterraine est une responsabilité partagée entre les niveaux locaux, régionaux et provinciaux. Jusqu'à récemment, la faible connaissance sur l'eau souterraine ne permettait pas de considérer la gestion de la ressource dans la planification du développement régional durable. Il est souhaité que le projet PACES ME et le projet pilote du CCME vont créer des opportunités pour des campagnes de sensibilisation et d'éducation, le transfert d'outils d'aide à la décision, et une plus grande collaboration entre chercheurs, gestionnaires et usagers.	Assurer que l'information et les outils requis pour des politiques publiques basées sur des données probantes circulent librement entre les chercheurs, les gestionnaires du territoire et de la ressource, les élus et les citoyens.	-	-	- Organisme régional coordonnant la gouvernance de l'eau souterraine *	- Transfert - Formation - Développement d'outils - Accompagnement - Synthèse/Mise à jour des informations

Notes :

Les indicateurs suivis d'une astérisque (*) correspondent aux indicateurs suggérés par le CCME.

Les numéros précédés du préfixe « L » (Lxx) correspondent aux livrables PACES.

L'échelle municipale (Mu) ou de la MRC (MRC) pour la production des indicateurs est indiquée.

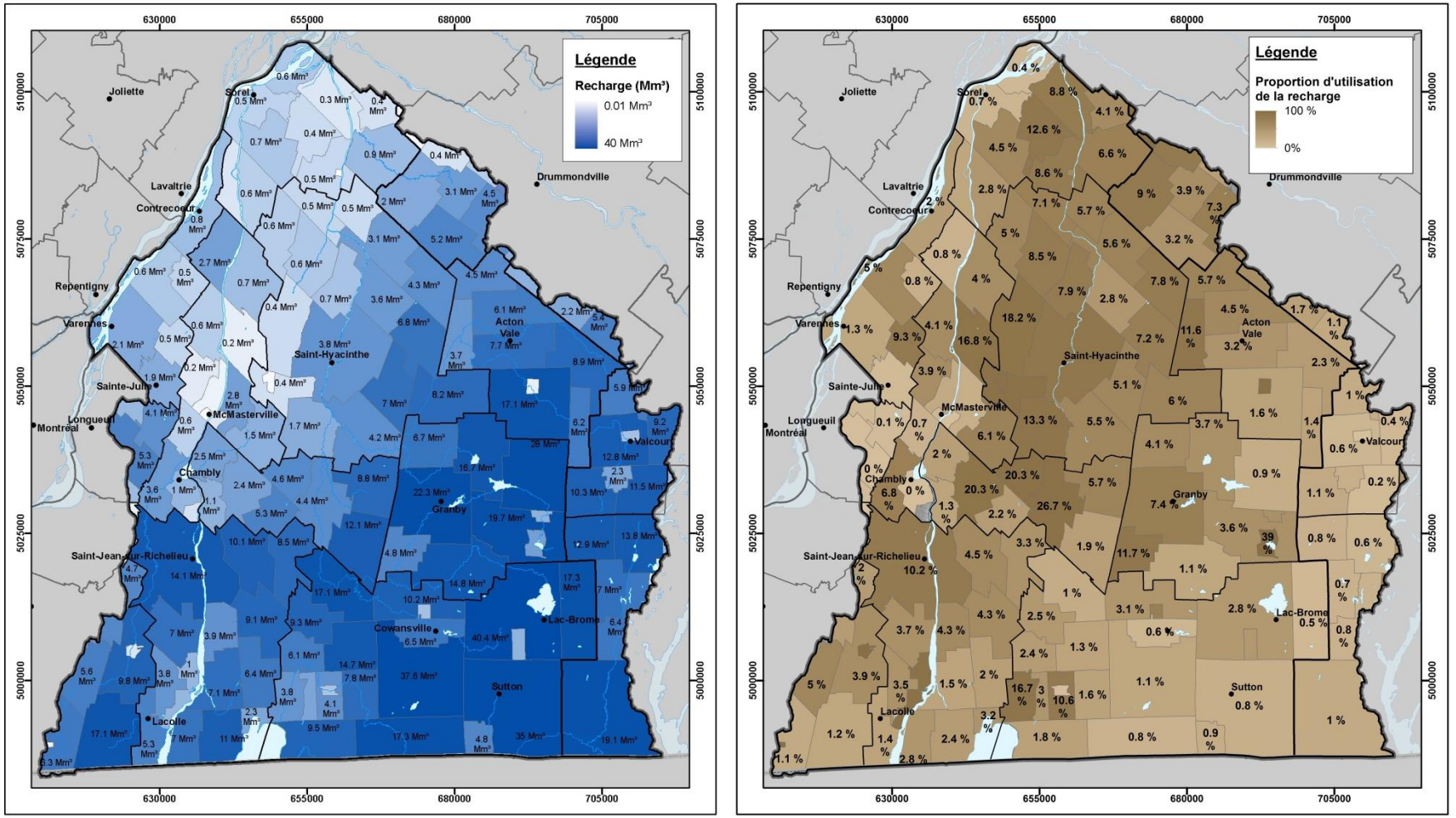


Figure 5.19 : Indicateurs permettant d'évaluer la consommation d'eau souterraine par rapport à sa disponibilité (recharge)

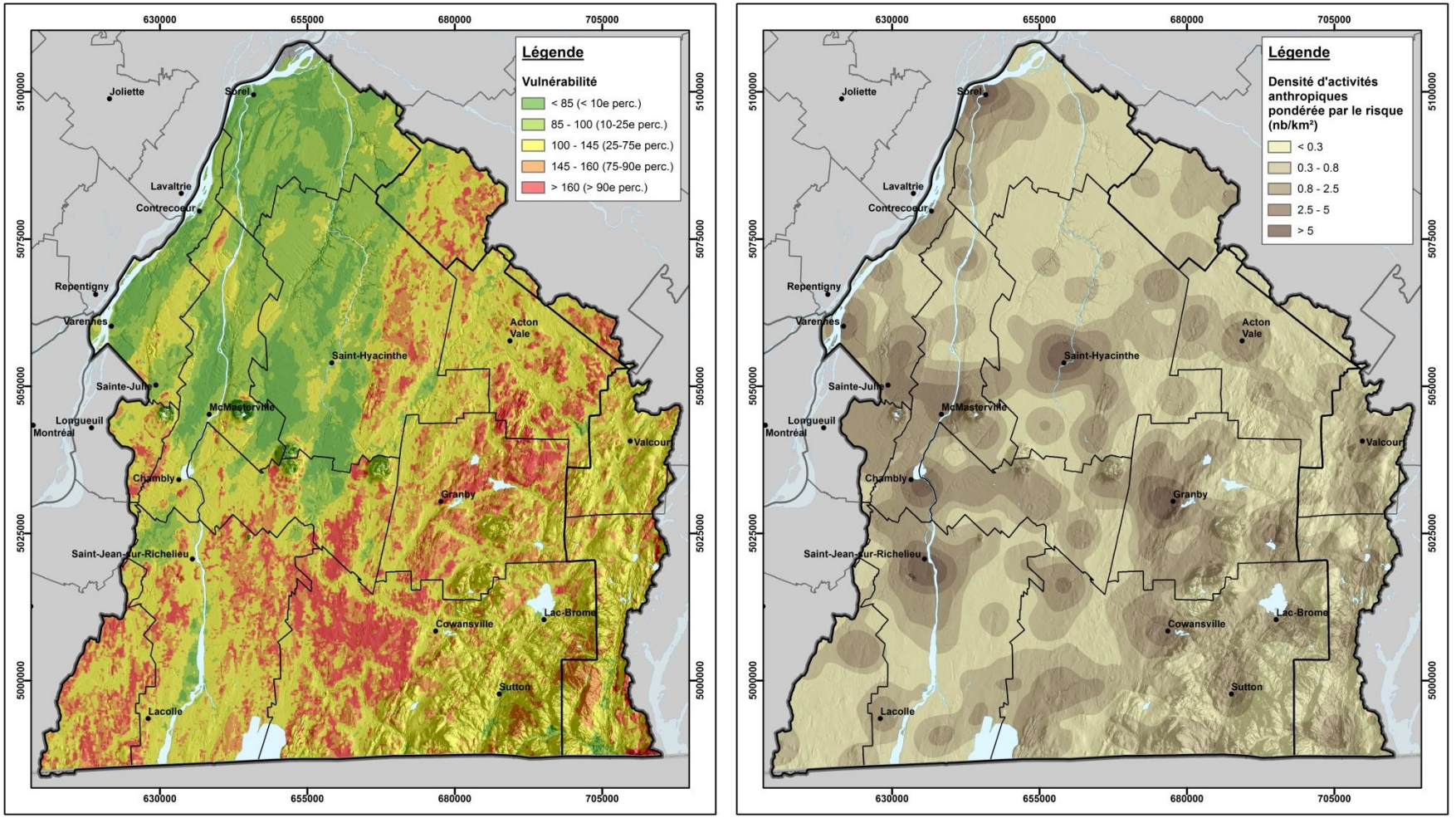


Figure 5.20 : Indicateurs de la vulnérabilité en relation avec la densité des activités anthropiques

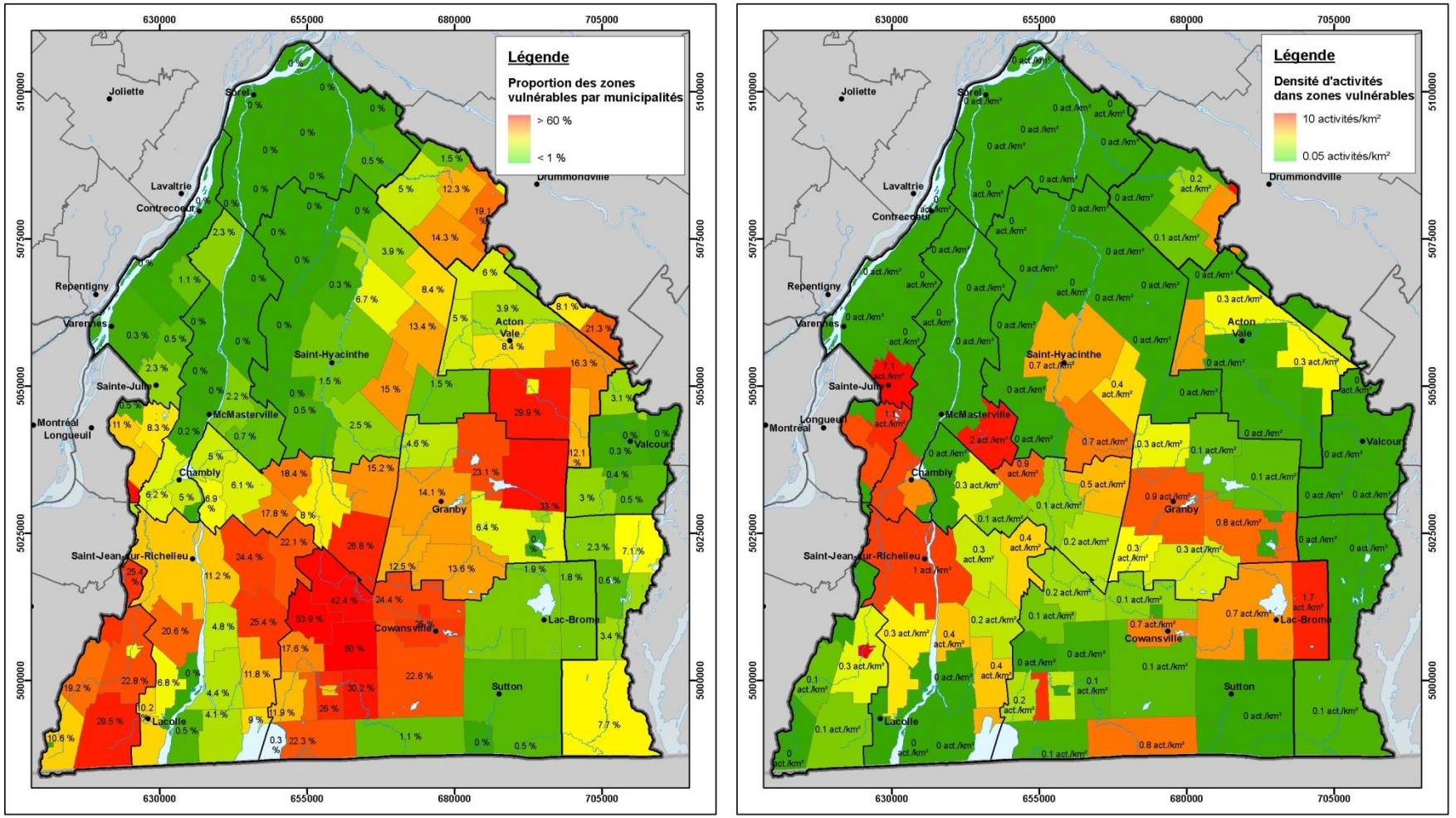


Figure 5.21 : Indicateurs de la proportion de municipalités vulnérables en relation avec la densité des activités anthropiques

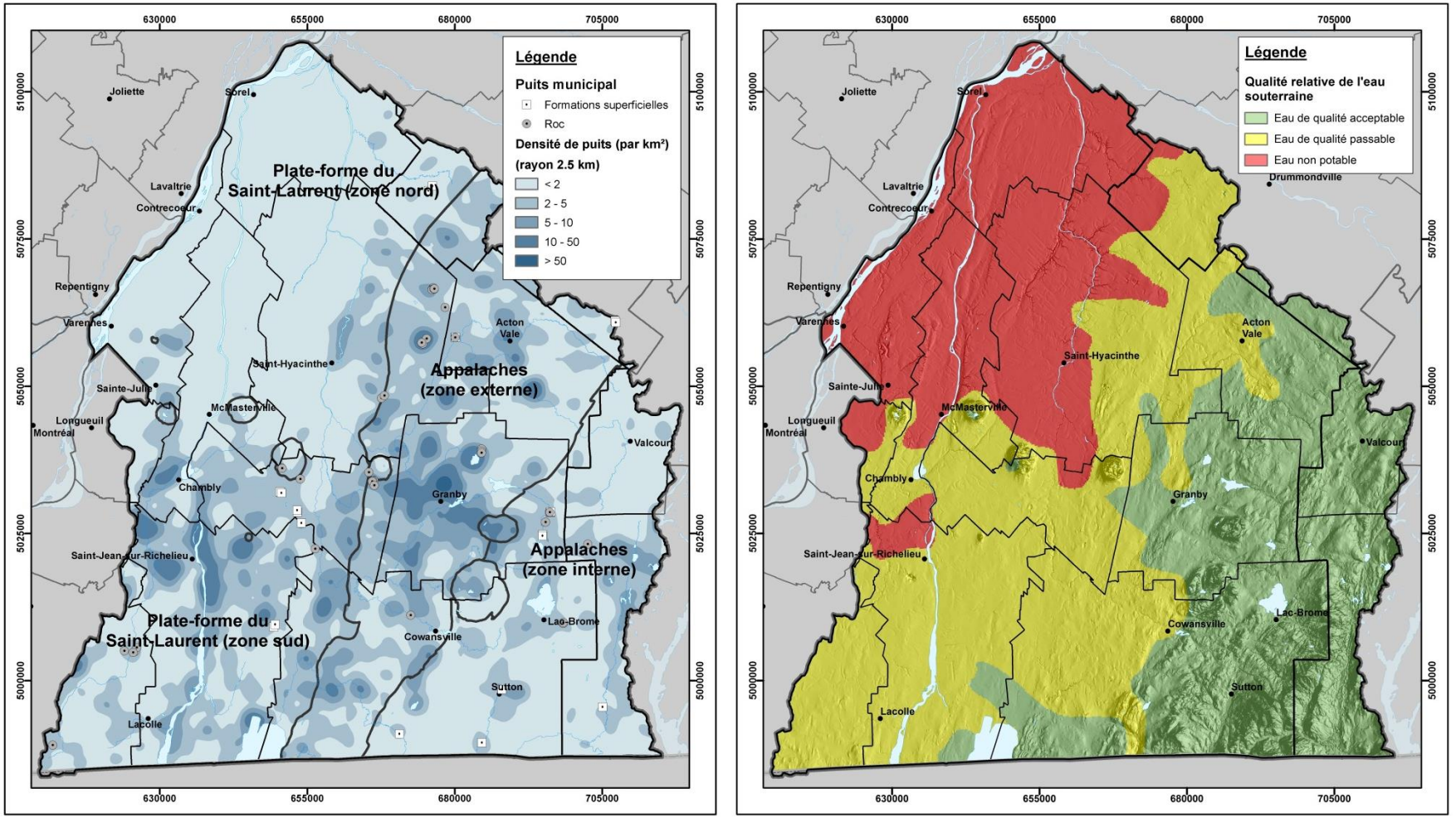


Figure 5.22 : Indicateurs de la qualité naturelle de l'eau souterraine en relation avec l'usage résidentiel

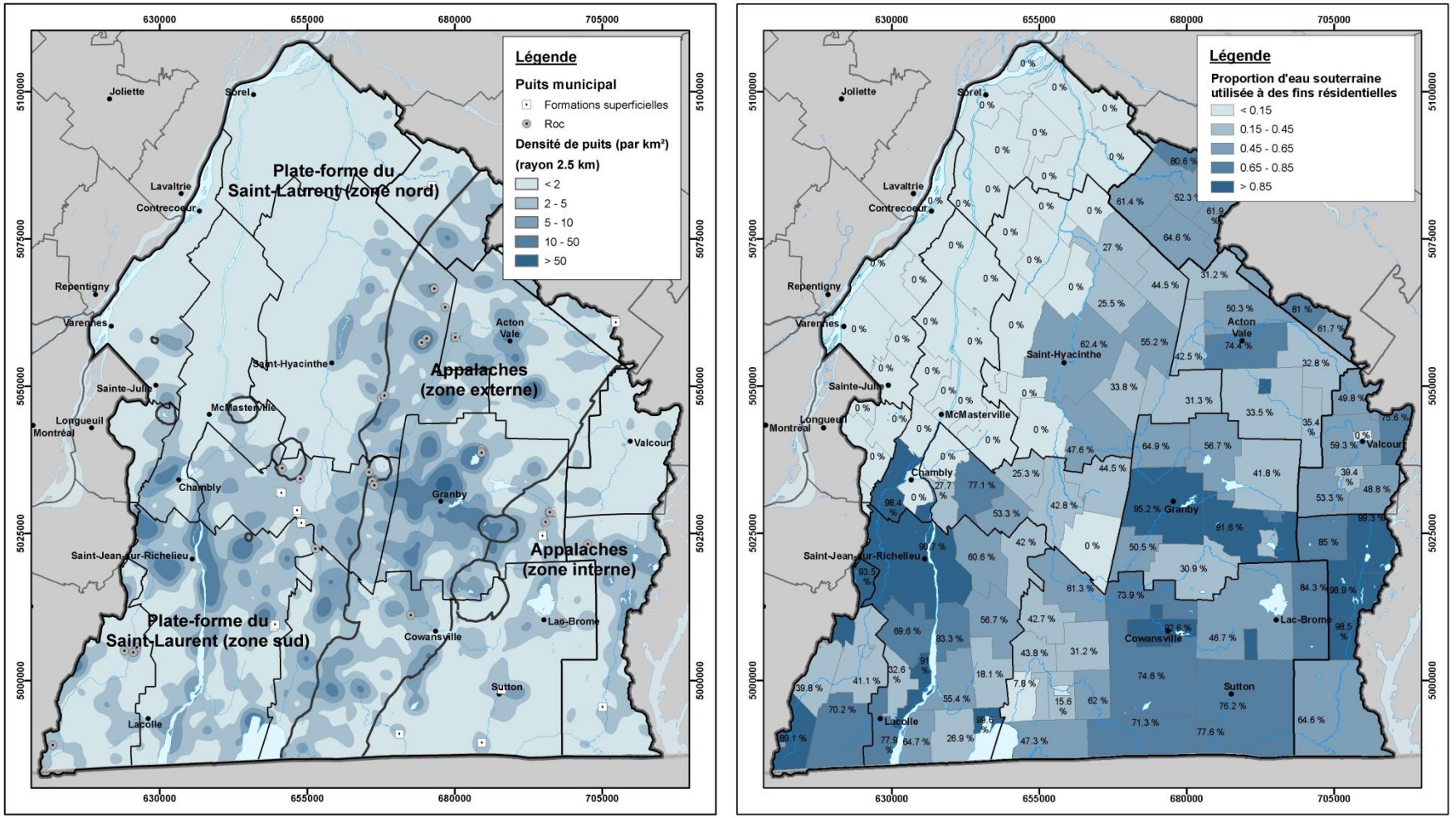


Figure 5.23 : Indicateurs permettant d'évaluer l'importance de l'usage résidentiel de l'eau souterraine

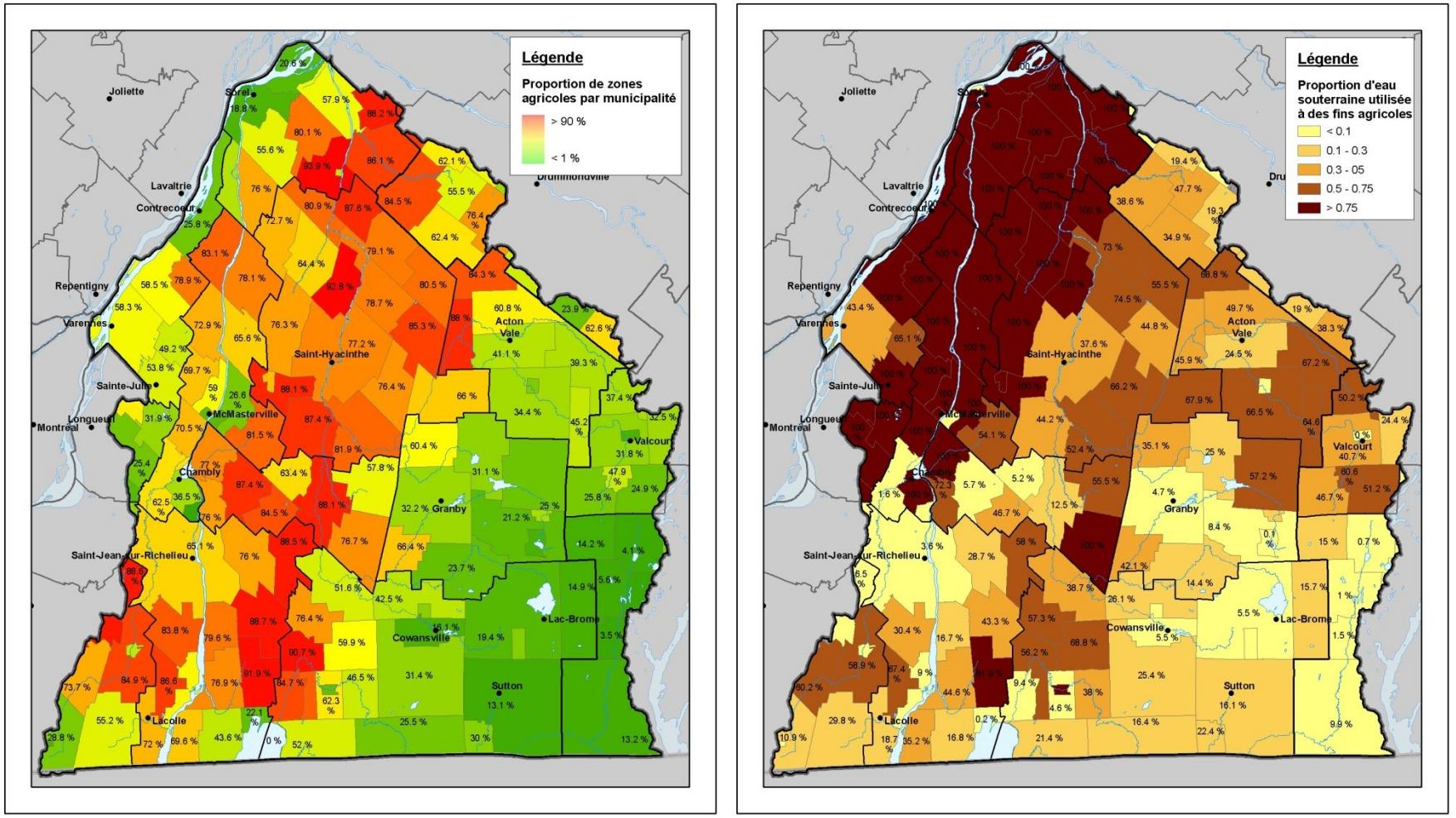


Figure 5.24 : Indicateurs permettant d'évaluer l'importance de l'usage agricole de l'eau souterraine par municipalité

5.6.3 Priorités régionales

Cette section a pour but de souligner certaines caractéristiques des ressources en eau souterraine en Montérégie Est qui pourraient être considérées par les organismes régionaux afin d'établir les priorités d'action permettant une gestion durable de la ressource sur leur territoire. À cette fin, cette section est organisée en fonction des objectifs de gestion durable énoncés à la section précédente. Cependant, les réponses envisageables par rapport aux problématiques reliées aux objectifs de gestion durable qui ont été décrites à la section précédente (tableau 5.7) ne sont pas reprises dans la présente section.

Au niveau de la préservation de la quantité d'eau souterraine exploitable, la situation est très variable dans la région d'étude. Sur une étendue de 2 200 km^2 dans la partie nord de la région, il n'y a pratiquement pas de ressources en eau souterraine utilisables à cause de la présence d'eau saumâtre non potable dans l'aquifère rocheux régional. L'approvisionnement en eau dans les MRC Pierre-De Saurel, Marguerite-d'Youville et La Vallée-du-Richelieu est essentiellement assuré par des réseaux d'aqueduc alimentés par de l'eau de surface. Dans ces MRC, les ressources marginales en eau souterraine retrouvées dans les dépôts meubles superficiels sont tout de même utilisées par endroits à des fins agricoles. Dans la MRC Les Maskoutains, aussi située en majeure partie dans le secteur où se trouve l'eau saumâtre, il y a tout de même une utilisation importante d'eau souterraine, surtout à des fins agricoles. Dans toutes les autres MRC de la Montérégie Est, l'eau souterraine représente une proportion importante de l'utilisation d'eau totale, particulièrement pour des usages résidentiels. Dans ces secteurs où l'eau souterraine est importante pour l'approvisionnement en eau, il n'y a pas de problème de disponibilité puisque la consommation d'eau souterraine représente généralement une proportion de la recharge inférieure à 10 %. De façon générale, la recharge est cependant plus importante dans le Piedmont et les Appalaches que dans la partie sud des Basses-terres. Si la disponibilité ne pose pas de problème, l'exploitabilité de l'eau souterraine présente des défis parce que la productivité des puits installés dans l'aquifère rocheux fracturé est relativement limitée, alors que les aquifères granulaires pouvant être exploités sont d'étendue plus restreinte et peuvent être difficiles à localiser. Les sections 5.1 et 5.3 ont présenté des pistes pour faciliter la recherche en eau dans les aquifères granulaires dans lesquels les puits peuvent avoir une capacité de production plus importante que les puits installés au roc. Il sera important de garder à jour les données concernant le niveau d'exploitation des eaux souterraines dans la région car il y a une augmentation de l'utilisation de l'eau souterraine au niveau municipal. D'autant plus que certaines municipalités sont déjà au prise avec des conflits d'usage, alors que d'autres considèrent l'utilisation d'eau souterraine alors que la pression sur l'eau de surface augmente, tant au niveau de sa quantité que de sa qualité.

Au niveau de la préservation de la qualité de l'eau souterraine, les priorités de protection pourraient tenir compte des secteurs avec forte densité de puits résidentiels où la vulnérabilité est élevée et où la densité d'activités anthropiques est importante. Quant aux puits municipaux, les données produites par le projet PACES pourraient aider à définir le cadre hydrogéologique de ces approvisionnements, mais des études locales sont susceptibles d'être requises pour rencontrer les exigences de la stratégie de protection des sources en élaboration par le MDDEFP. Au niveau des nitrites et nitrates qui sont associés à la fertilisation des cultures, des dépassements du critère de potabilité ne sont pas observés dans les puits au roc échantillonnés dans le cadre du projet. Les faibles concentrations dans l'aquifère au roc dans les Basses-terres reflètent la plus faible vulnérabilité dans ce contexte. Toutefois, des concentrations significatives sont observées au roc dans le Piedmont et les Appalaches où la vulnérabilité est plus grande. Bien que cette situation ne soit pas à un niveau préoccupant présentement, il sera important d'assurer un suivi de l'évolution des concentrations en nitrites et nitrates dans les puits au roc dans les secteurs à forte activité agricole, où la vulnérabilité est élevée et où la densité des puits résidentiels est importante. Quant aux puits résidentiels exploitant les aquifères granulaires, ils

devraient faire systématiquement l'objet d'analyses pour les nitrites et nitrates, considérant leur plus grande vulnérabilité à la contamination. Au niveau de la qualité naturelle de l'eau souterraine, cette étude a identifié des zones de qualité d'eau ainsi que des types d'eau pour lesquels une proportion significative de puits avaient des dépassements des critères de potabilité (livrable 24, section 5.4 et tableau 5.6). Dans les zones où on retrouve des types d'eau avec des proportions importantes de dépassements de critères de potabilité, particulièrement où une densité de puits résidentiels est importante, une vérification de la potabilité de l'eau souterraine pour des paramètres susceptibles d'avoir des dépassements pourrait contribuer à protéger la santé publique.

Dans le cadre de travaux réalisés à l'échelle régionale, comme les projets PACES, il est difficile d'apporter des précisions concernant l'importance de l'eau souterraine en relation avec les écosystèmes. Cependant, le livrable 28a qui délimite les zones préférentielles de recharge ainsi que les zones de résurgence des eaux souterraines pourrait être combiné avec la cartographie des milieux sensibles pour avoir un aperçu initial du rôle de l'eau souterraine par rapport à ces milieux au niveau régional. Des études plus détaillées au niveau local pourraient toutefois être requises pour supporter des actions par rapport à la protection des écosystèmes. L'évaluation des apports d'eau souterraine requis pour assurer le maintien de la santé d'un écosystème représente toutefois un défi scientifique.

Même si la disponibilité de l'eau souterraine ne pose généralement pas problème en Montérégie Est, cette ressource est importante pour assurer de nombreux usages. Plus de la moitié de la région est dédiée à l'agriculture, et une portion significative d'agriculteurs en dehors de la zone d'eau saumâtre dépend de l'eau souterraine. L'eau souterraine est aussi très utilisée dans la transformation alimentaire et l'industrie touristique, et elle est aussi la principale source d'eau potable pour environ 57 % des municipalités avec moins de 5 000 habitants. Au niveau local, des conflits d'usages pourraient toutefois survenir par rapport à une ressource qui pourrait être limitée. C'est pourquoi les statistiques et indicateurs des usages à l'échelle municipale donnent un aperçu initial des endroits où la gestion des usages pourraient être nécessaire pour assurer la durabilité de l'approvisionnement en eau souterraine.

Enfin, au niveau de la bonne gouvernance de l'eau souterraine, la responsabilité est partagée entre les niveaux locaux, régionaux et provinciaux. Jusqu'à récemment, la faible connaissance sur l'eau souterraine ne permettait pas de considérer la gestion des ressources en eau souterraine dans la planification du développement régional durable. Il est souhaité que le projet PACES en Montérégie Est crée des opportunités pour des campagnes de sensibilisation et d'éducation, le transfert d'outils d'aide à la décision, et une plus grande collaboration entre chercheurs, gestionnaires et usagers. La concertation régionale au niveau des organismes intéressés à la gouvernance ou à la gestion de la ressource pourrait aussi assurer une cohérence dans les approches et les critères d'actions visant à assurer une bonne gouvernance de la ressource.

5.7 Réseau de surveillance et programme de suivi

Le livrable 27 présente la répartition spatiale des stations météorologiques, des stations hydrométriques ainsi que des puits d'observation de l'eau souterraine en Montérégie Est. La région est relativement bien pourvue en stations météorologiques avec 25 stations actives (30 stations sont inactives) et avec 21 stations hydrométriques actives (28 stations sont inactives). Avant le projet PACES, seulement quatre (4) puits d'observation (dont un inactif) du réseau de suivi du MDDEFP étaient présents en Montérégie Est. Suite aux forages réalisés dans le cadre du projet PACES et avec un support additionnel du MDDEFP, il y a maintenant 37 puits d'observation dans la région d'étude (N.B. : le nombre de puits inclus ceux au roc et ceux dans

les dépôts meubles), dont 34 ont été légués au MDDEFP et intégrés dans son réseau de suivi. Ces puits étant récents, la séquence de mesure de niveau d'eau en continu est de l'ordre de deux années. Cependant, ces mesures donnent déjà des informations importantes sur la recharge et les conditions de confinement de l'aquifère rocheux régional (discuté à la section 6.3). Il faudra revisiter régulièrement (au 5 ou 10 ans) les données de niveau d'eau produites par ces puits d'observation pour être en mesure d'évaluer s'il y a des tendances temporelles indiquant une augmentation ou une réduction de la quantité d'eau souterraine. Ces données vont être particulièrement importantes pour évaluer si les changements climatiques ont un effet significatif sur la quantité d'eau souterraine disponible. Les données de niveau d'eau seront disponibles et mises à jour régulièrement sur le site Internet du MDDEFP. Ces puits d'observation pourront aussi être utilisés pour évaluer des changements potentiels dans la composition chimique de l'eau souterraine. Il serait particulièrement important d'évaluer si des tendances sont observées au niveau des nitrates dont les concentrations sont mineures présentement, mais qui indiquent qu'il y a tout de même des apports reliés aux activités de fertilisation.

6 TRAVAUX SPECIFIQUES

Plusieurs travaux spécifiques ont été réalisés dans le cadre de ce projet afin d'améliorer la compréhension de l'hydrogéologie régionale en Montérégie Est. Des travaux de modélisation hydrologique ont été réalisé par l'IRDA à l'aide du logiciel SWAT (section 6.1), notamment pour fournir un estimé additionnel de la recharge distribuée spatialement pour fins de comparaison avec l'estimé obtenu avec HELP (section 4.3). Par ailleurs, des travaux universitaires ont également été réaliséspar des étudiants de 2e et 3e cycles : 1) caractérisation de la fracturation de l'aquifère rocheux régional (section 6.2) ; 2) évaluation de la recharge à l'aide de méthodes variées, dont l'analyse des hydrogrammes de puits (section 6.3) ; 3) modélisation numérique du système d'écoulement régional de l'eau souterraine (section 6.4) et 4) étude à une échelle locale du cycle de l'azote dans un secteur à vocation principalement rurale (section 6.5).

6.1 Modélisation hydrologique

Cette section décrit les méthodes, données et résultats de la modélisation hydrologique appliquée à l'évaluation de la recharge de l'aquifère régional de roc fracturé en Montérégie Est. Elle inclut également une brève évaluation comparative des résultats avec ceux obtenus à l'aide de HELP (section 4.3). La modélisation hydrologique a été réalisée avec le modèle SWAT (« Soil Water Assessment Tool »), version SWAT2009-ArcSWAT adaptée pour le Québec et intégrée au système d'information géographique (SIG) ArcGIS 9.3.

6.1.1 Description du modèle SWAT

SWAT (Arnold et al., 2005) est un modèle déterministe, semi-distribué, destiné à simuler les effets de différents scénarios de gestion du territoire sur les transferts hydriques et la mobilité des sédiments et des éléments nutritifs à l'échelle de grands bassins versants hétérogènes et sur de longues périodes. Développé conjointement par le USDA Agricultural Research Service (USDA-ARS) et le Texas A&M Agrilife Research (A&M University), il s'agit d'un modèle largement utilisé en Amérique du Nord et en Europe pour prédire les transferts diffus de sédiments, de nutriments et de pesticides (Arnold et al., 2005; Neitsch et al., 2002a; Srinivasan, 2000; Santhi et al., 2001). Il emprunte d'ailleurs les bases conceptuelles de différents outils de modélisation agroenvironnementale développés antérieurement, notamment les modèles SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Bassins; Williams et al., 1985), EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator; Williams et al., 1984), CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems; Knisel, 1980) et GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems; Leonard et al., 1987).

De façon sommaire, une simulation dans SWAT est composée de deux phases : une phase terrestre et une phase aquatique. Dans la phase terrestre, SWAT simule de façon continue l'évolution des stocks terrestres de nutriments, la croissance et les prélèvements des plantes, de même que les transferts d'eau, de sédiments et nutriments vers le réseau hydrographique et vers les aquifères. La simulation du bilan hydrique est tributaire des conditions climatiques, de la gestion et des particularités physiques du territoire. Tous les processus sont simulés de façon quotidienne à l'échelle de petites unités de territoire appelées « unités de réponse hydrologique » (URH) (figure 6.1). Celles-ci représentent une combinaison unique de propriétés pédologiques et d'utilisation du sol à l'intérieur d'un sous-bassin. L'activité hydrologique modélisée au sein de chacune des URH est cumulée à l'échelle du sous-bassin versant. Dans la phase aquatique du modèle, les exportations d'eau, en provenance des sous-bassins, sont prises en charge par des routines qui transportent l'eau d'un tronçon de sous-bassin aux autres, jusqu'à l'exutoire principal.

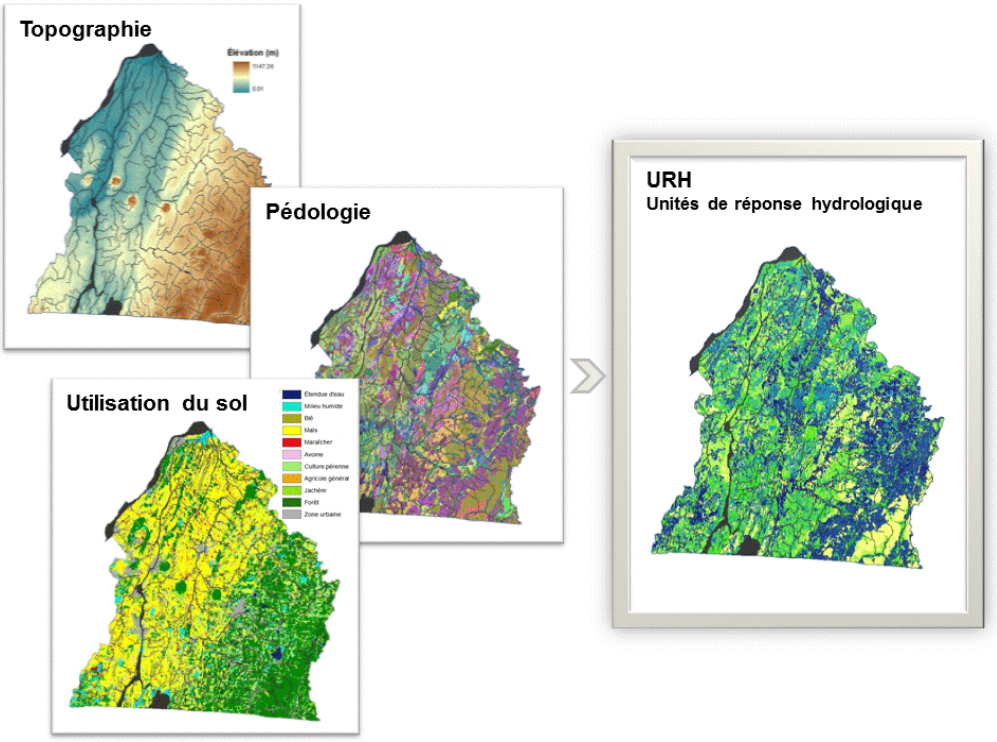


Figure 6.1 : Représentation spatiale des unités de réponse hydrologiques (URH)

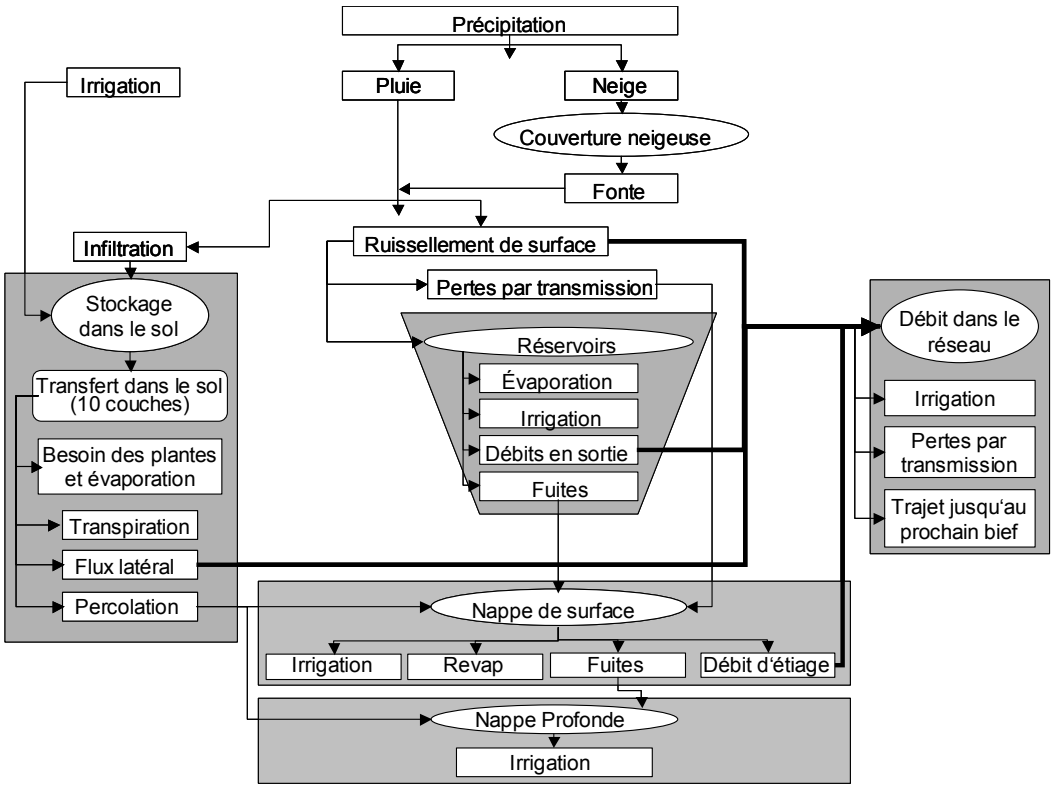


Figure 6.2 : Composantes hydrologiques du modèle SWAT (adapté d'Eckhardt et Arnold, 2001)

Dans SWAT, les précipitations fournissent l'énergie nécessaire aux mouvements de l'eau en surface et dans le sol ainsi qu'au transport des sédiments et nutriments (figure 6.2). Les précipitations sous forme liquide et la fonte de neige sont d'abord séparées entre ruissellement et infiltration dans le sol à l'aide de la méthode du numéro de courbe du Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1972). Cette méthode attribue un numéro de courbe (« Curve Number » ou CN) à chacune des URH selon le groupe hydrologique du sol, l'utilisation du sol ainsi que les pratiques agricoles. Les numéros de courbe sont ensuite ajustés de façon journalière en fonction du CN de la journée précédente et du contenu en eau du sol.

Le cycle de l'eau journalier est calculé pour chacune des URH selon l'équation 6.1. L'eau qui s'infiltre dans le sol percole d'une couche à l'autre lorsque la capacité au champ de la couche est atteinte. Seule l'eau dans le sol est disponible pour répondre aux besoins des plantes. L'accumulation d'unités de chaleur ainsi que les besoins et prélèvements en eau, en azote et en phosphore régissent la croissance de ces dernières. SWAT modélise également l'évapotranspiration du sol et des plantes.

$$SW_t = SW + \sum_{t=1}^{t} (R_i - Q_i - ET_i - P_i - Qr_i) \qquad \text{(mm)} \tag{6.1}$$

où : SW_t est le contenu final en eau disponible pour les plantes dans le sol (mm);
SW est le contenu en eau disponible pour les plantes (mm);
R_i est la pluviométrie (mm);
Q_i est le ruissellement (mm);
E_{ti} est l'évapotranspiration (mm);
P_i est la percolation dans la zone vadose (mm);
Qr_i est l'écoulement de base de l'aquifère peu profond (mm);
t est la durée en jours.

L'eau qui percole au-delà de la dernière couche de sol entre dans la zone vadose avant de devenir recharge de l'aquifère. SWAT utilise une fonction exponentielle de décroissance (Sangrey et al., 1984) pour tenir compte du temps entre le moment où l'eau sort du profil du sol et le moment où elle devient recharge de l'aquifère. Cette fonction tient compte de la quantité d'eau qui sort du profil du sol et d'un délai représentant le temps de drainage de la formation géologique au-dessus de l'aquifère. Ce délai est déterminé par un paramètre de calage (gw_delay) exprimé en jours. Lorsqu'elle devient recharge, l'eau est distribuée entre l'aquifère peu profond et l'aquifère profond (figure 6.3) à l'aide du coefficient de percolation (rchrg_dp). Ce paramètre de calage distribue en proportion les volumes d'eau entre les deux aquifères. SWAT ne modélise donc pas directement les transferts vers l'aquifère peu profond, puis de l'aquifère peu profond vers l'aquifère profond.

Dans l'aquifère peu profond, les mouvements de l'eau ne sont pas simulés en se basant sur les propriétés physiques du milieu, mais plutôt de manière empirique. La figure 6.3 illustre plus en détails les transferts d'eau entre le sol et les aquifères. L'eau arrive à l'aquifère peu profond en provenance de la zone vadose ou de la percolation des plans d'eau. L'eau peut ensuite ressortir de l'aquifère peu profond de trois manières : 1) résurgence dans les cours d'eau (débit de base), 2) pompage et 3) extraction par les plantes. La plus importante est le débit de base, calculé en fonction du volume de recharge journalier et de la constante de récession du débit de base. L'eau peut également être virtuellement pompée de l'aquifère pour l'irrigation ou pour le transfert vers un autre bassin versant. Finalement, les plantes ayant de longues racines peuvent accéder directement à l'eau de l'aquifère peu profond. Aux fins de modélisation, l'eau qui atteint l'aquifère profond n'est plus comptabilisée dans le bilan hydrique de surface, à l'exception de l'eau pompée de cet aquifère.

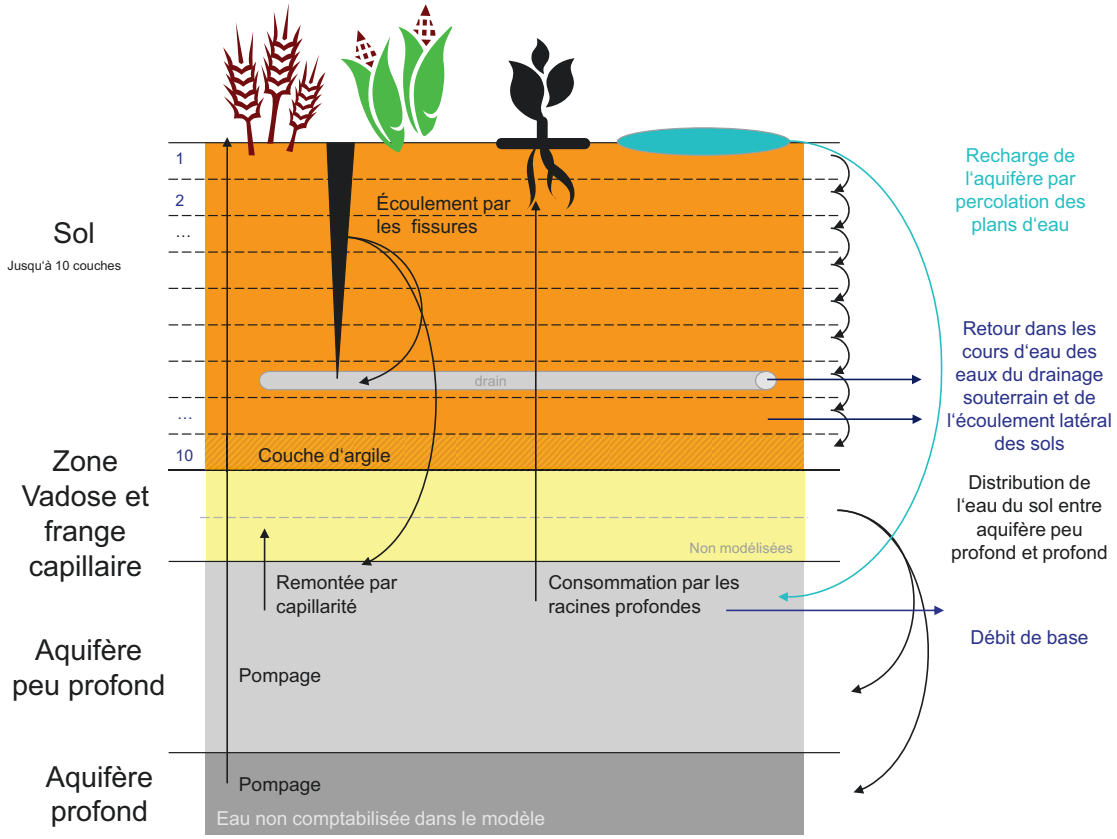


Figure 6.3 : Schéma du fonctionnement souterrain de SWAT

Sur une base annuelle ou saisonnière, la recharge est définie de la manière suivante:

$$R = R_{ap} + R_{app} - Q_{base} - P - C_p - rc \qquad \text{(mm)} \qquad 6.2$$

où : R est la recharge des aquifère (mm) (gw_rchg);
R_{ap} est la recharge de l'aquifère profond (da_rchg)
R_{app} est la recharge de l'aquifère peu profond (gw_rchg - da_rchg)
Q_{base} est la contribution de l'écoulement souterrain au débit des cours d'eau (gw_q)
P est le pompage dans les aquifères (sa_irr + da_irr)
C_p est la consommation d'eau par les plantes à profondes racines (revap)
rc est la remontée capillaire

Sur de courtes périodes, la valeur de R_{app} est différente de la somme des termes Q_{base}, C_p et rc. Cependant, à toutes fins utiles, à long terme R_{app} = Q_{base} et P, C_p et rc sont presque nuls puisqu'aucun pompage n'a été simulé dans le cadre du projet, que peu de plantes simulées ont des racines assez profondes pour atteindre l'aquifère et que la remontée capillaire est négligeable. La recharge devient alors équivalente à la recharge de l'aquifère profond, qui représente, dans ce projet, la recharge de l'aquifère régional rocheux.

6.1.2 Zone d'étude

L'exercice de modélisation de la recharge de l'aquifère régional à l'aide de SWAT couvre les bassins versants de la baie Missisquoi et des rivières Yamaska et Richelieu en territoire canadien, ainsi que de petits bassins à proximité du fleuve St-Laurent. Une zone d'environ 13 km au sud de la frontière américaine a également été incluse (figure 6.4). Les caractéristiques de la zone d'étude sont présentées plus en détail à la section 1.5.

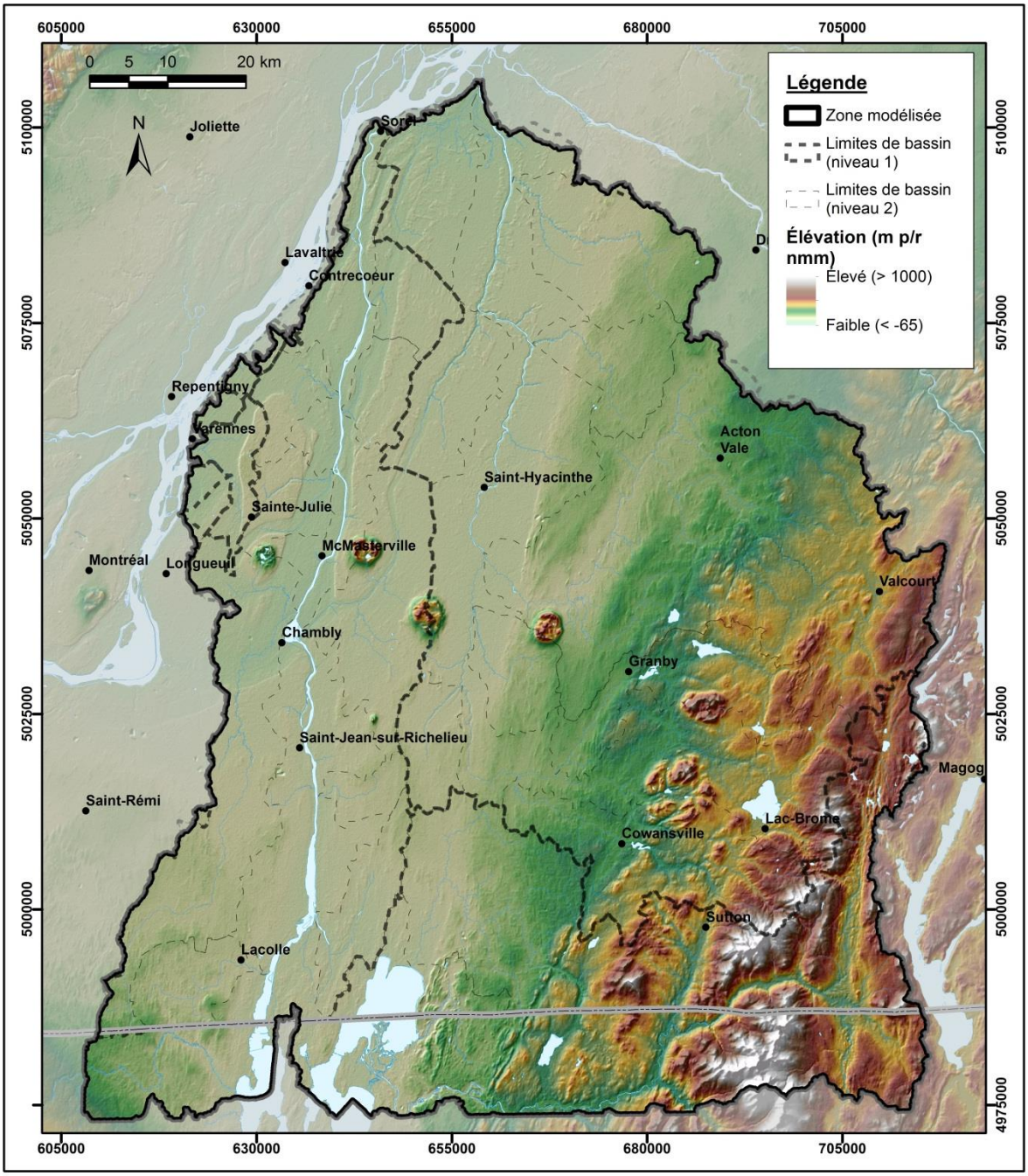


Figure 6.4 : Zone de modélisation hydrologique avec SWAT

6.1.3 Paramétrage de SWAT

SWAT est un modèle complexe qui requiert la mise en forme et l'intégration d'une multitude de paramètres biophysiques, climatiques et de gestion des cultures et du territoire. La section qui suit décrit brièvement le paramétrage des différentes composantes du modèle.

6.1.3.1 Modèle altimétrique numérique

Le modèle altimétrique numérique (MAN) sert à déterminer le parcours de l'eau en surface. L'algorithme D-8 est utilisé dans l'interface d'ArcGIS à cette fin. Le MAN utilisé pour la modélisation hydrologique a été créé en utilisant deux sources de données. Dans la portion québécoise, le MAN a été développé à partir des courbes topographiques 1/20 000 de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ). Les pixels ont une résolution spatiale et une précision sur l'élévation de l'ordre de 10 m. Du côté des États-Unis, le MAN provient du United States Geological Survey (USGS) et possède également une résolution de 10 m.

Ces MAN ont été combinés, puis ré-échantillonnés à une résolution de 60 m. Afin d'assurer un parcours de l'eau (« flowpath ») représentant bien les cours d'eau réels, les valeurs de certains pixels du MAN résultant ont dû être modifiées manuellement, particulièrement dans la zone très plane en amont du bassin de baie de Lavallière, ainsi qu'à certains endroits sur les rivières Richelieu et Missisquoi.

6.1.3.2 Localisation des stations hydrométriques et délimitation des sous-bassins

SWAT délimite les sous-bassins à partir du parcours de l'eau défini à l'aide du MAN et de la localisation des stations hydrométriques. Au total, 41 stations hydrométriques (tableau 6.1), dont deux aux États-Unis, ont été utilisées. À ces stations, 18 autres points virtuels ont été ajoutés afin de générer des sous-bassins non desservis par une station hydrométrique et ainsi couvrir l'ensemble des bassins versants de la baie Missisquoi et des rivières Yamaska et Richelieu. Au total, 59 sous-bassins ont ainsi été créés.

6.1.3.3 Délimitation des unités de réponses hydrologiques (URH)

Tel que mentionné précédemment, tous les calculs de la phase terrestre du modèle SWAT sont effectués à l'échelle des URH, à un pas de temps quotidien. Les valeurs calculées sont ensuite sommées par sous-bassin et par bassin, pour des périodes journalières, mensuelles ou annuelles.

Pour créer les URH, SWAT (version ArcSwat) effectue un recoupement entre la délimitation des sous-bassins, l'utilisation du sol et les sols. Le modèle créé pour ce projet comporte 14 199 URH, créées à partir de 59 sous-bassins, 14 classes d'utilisation du sol et 401 types de sols. Toutes les sources de données ont une résolution de 60 m.

Utilisation du sol et bases de données de l'utilisation du sol

La couche matricielle de l'utilisation du sol qui a servi au montage du modèle a été produite à partir de quatre sources de données (tableau 6.2). La carte écoforestière du SIEF (MRN, 2003) en constitue la base, à laquelle ont été ajoutées les données de la carte des milieux humides de Géomont et Canards Illimités (Géomont, 2008), la couche d'hydrographie surfacique du MRN (2012b) et la carte de la base de données des cultures assurées de 2009 de la Financière Agricole du Québec (FADQ, 2009).

Tableau 6.1 : Liste de stations hydrométriques utilisées dans la modélisation hydrologique

Station	Nom	Statut	Début	Fin	Longitude	Latitude	Type
30302	Yamaska	Active	1929-01-01		-350 678.6	153 948.8	Exutoire
30304	Noire	Active	1965-12-12		-344 541.6	177 690.7	Exutoire
30305	Delorme	Fermée	1966-09-29	1978-11-08	-343 827.2	197 528.2	Exutoire
30314	Yamaska Sud-Est	Active	1968-08-16		-334 081.2	144 381.1	Exutoire
30315	Noire	Fermée	1969-05-26	1972-03-27	-323 920.3	192 020.9	Exutoire
30316	David	Active	1969-04-10		-337 680.2	227 931.1	Exutoire
30318	Noire	Fermée	1970-05-21	1978-11-16	-302 958.8	176 641.2	Exutoire
30323	Cours d'eau no 03034015	Fermée	1972-06-15	1980-09-12	-323 902.0	165 023.6	Exutoire
30327	Saint-Louis	Fermée	1972-06-21	1979-11-14	-342 771.7	235 260.6	Exutoire
30328	Salvail	Fermée	1972-07-19	1978-11-08	-349 242.3	208 638.3	Exutoire
30329	Runnels	Fermée	1972-06-29	1986-08-21	-322 446.4	182 297.6	Exutoire
30333	Jaune	Fermée	1978-06-06	1986-08-21	-312 706.9	185 700.2	Exutoire
30335	Yamaska Nord	Fermée	1978-10-01	1997-07-24	-313 610.3	163 007.3	Exutoire
30337	Yamaska Sud-Est	Fermée	1980-10-20	1990-05-08	-347 390.4	152 450.9	Exutoire
30340	Yamaska Nord	Active	1984-01-01		-335 621.2	161 610.8	Exutoire
30341	Yamaska	Fermée	1983-11-04	1994-08-08	-346 713.7	191 398.7	Exutoire
30343	Yamaska Nord	Active	1985-01-01		-314 938.6	159 317.3	Exutoire
30344	Chibouet	Fermée	1988-09-08	1998-04-01	-339 098.3	209 578.7	Exutoire
30345	Yamaska	Active	1995-01-01		-346 255.5	192 184.6	Exutoire
30346	Noire	Fermée	1996-09-05	2003-08-06	-318 541.4	190 380.9	Exutoire
30348	Runnels	Active	2000-06-14		-323 079.7	186 682.2	Exutoire
30349	Sud-Ouest	Active	2000-06-28		-355 139.2	164 627.2	Exutoire
30351	Yamaska	Active	2006-01-01		-314 846.0	151 836.7	Exutoire
0303A0	Yamaska Nord	Fermée	1976-03-16	1983-08-17	-338 329.9	157 781.1	Exutoire
0303BE	Petit Pot au Beurre [(1)]	Active	2010-05-22		-345 845.5	233 730.2	Exutoire
0303PB	Petite Bellevue [(1)]	Active	2010-05-22		-355 655.0	225 661.3	Exutoire
30401	Rivière Richelieu	Active	1905-04-20		-372 821.8	168 240.7	Exutoire
30415	Des Hurons	Active	1974-01-01		-366 410.8	178 120.2	Exutoire
30420	Aux Brochets Amont	Active	1979-09-19		-354 039.1	136 236.3	Exutoire
30421	L'Acadie	Active	1979-08-23		-381 611.9	167 930.6	Exutoire
30422	Castor [(1)]	Active	1997-10-16		-359 768.1	135 613.8	Exutoire
30423	Morpions	Active	1999-07-08		-356 538.6	144 889.9	Exutoire
30424	Aux Brochets Aval	Active	2002-01-01		-358 241.2	140 487.2	Exutoire
30425	De la Roche	Active	2002-01-01		-356 489.4	125 178.2	Exutoire
30426	Ewing [(1)]	Active	2002-01-01		-360 555.9	136 985.5	Exutoire
30427	Walbridge (br. 4) [(1)]	Fermée	2001-11-01	2006-11-30	-349 615.4	143 537.7	Exutoire
30428	Walbridge (br. 25) [(1)]	Fermée	2001-11-01	2006-11-30	-352 865.6	141 117.7	Exutoire
30429	À l'Ours	Fermée	2006-07-25	2008-06-09	-361 312.6	181 233.8	Exutoire
4293500	Missisquoi River (E.B.)	Active	1915-08-01		-331 718.0	116 779.1	Exutoire
4293500	Missisquoi Rive (N. Troy)	Active	1931-08-22		-307 100.9	116 821.7	Source
4293500	Great Chazy River	Fermée	1990-03-01	2011-05-01	-394 803.4	125 238.0	Source

Note:

[(1)] Stations ayant aussi des données provenant des sondes multi-paramètres.

Tableau 6.2 : Sources de données utilisées pour préparer la carte d'utilisation du sol

Nom	Source	Année	Échelle
Base de données des cultures assurées (BDCA)	Financière agricole du Québec	2009	1/50 000
Carte écoforestière	MRNF	2003	1/20 000
Milieux humides	Canards Illimités	2008	1/20 000
Hydrographie surfacique	MDDEFP	2012	1/20 000

Au départ, les données ont été traitées à une résolution de 5 m, puis cette résolution a été ramenée à 30 m pour la cartographie. Cette carte comportait initialement 18 catégories mais, pour la modélisation hydrologique, elle a été d'avantage simplifiée. La couche de données résultante est de 60 m de résolution et comporte 14 catégories, indiquées au tableau 6.3.

ArcSwat lie cette carte d'utilisation du sol à deux bases de données. La première contient les différentes catégories de zones urbaines avec des paramètres descriptifs incluant la fraction des superficies imperméables, leur connectivité, la densité des routes, etc. De la même manière, les superficies agricoles et forestières sont liées à la base de données des cultures qui contient les paramètres qui définissent la croissance, la consommation d'énergie et de CO_2 des plantes ainsi que leur mort et leur décomposition. Une description complète de ces bases de données est disponible dans Neitsch et al. (2002b).

Tableau 6.3 : Catégories d'utilisation du sol pour la modélisation hydrologique

Valeur	Catégorie	Pourcentage d'occupation	Code SWAT
410	Lac et rivière	4.5 %	WATR
420	Milieu humide	3.2 %	WETL
503	Céréales - Blé	1.1 %	SWHT
505	Maïs	21.3 %	CORN
506	Maraîcher	0.8 %	CRRT
520	Céréale - Avoine	0.8 %	OATS
521	Cultures pérennes	10.4 %	PAST
522	Agricole - Général	0.5 %	AGRC
523	Jachère ou herbage	4.8 %	RNGB
524	Soya	12.3 %	SOYB
661	Forêt de conifères	3.0 %	FRSE
810	Forêt de feuillus	30.6 %	FRSD

Sols et base de données des sols

La carte pédologique numérique développée dans le cadre de ce projet a été constituée à partir des différentes études pédologiques de comtés publiées dans les différentes régions au fil des

années, et selon différentes échelles. Une description complète se trouve dans Beaudin et al. (2013) et dans la section 1.5.2.7 du présent rapport.

Les unités cartographiques identifiées sur les cartes numériques se composent souvent d'une seule série de sol. Il arrive toutefois qu'une unité cartographique puisse représenter une combinaison de séries de sol qui sont identifiées suivant leur dominance respective. Dans le cadre de la modélisation hydrologique, seule la série dominante a été retenue et décrite. Il arrive aussi que les polygones de la carte ne représentent pas des séries de sols, mais plutôt des non-sols ou des types de terrain, tels que les polygones représentant les plans d'eau, les escarpements, les zones urbaines ou encore les ravins. Comme SWAT nécessite que chaque polygone possède une description complète, ces derniers se sont vus attribuer des valeurs, soit celles des polygones de sols adjacents ou des valeurs moyennes. La carte pédologique résultante a ensuite été transformée en format matriciel, à une résolution de 60 m, à partir de l'identifiant du sol dominant (code sol1). La carte résultante a été modifiée afin de considérer la présence d'une couche d'argile peu perméable restreignant la recharge sur une grande partie du territoire à l'étude, particulièrement dans le nord (section 3.2). Dans les secteurs où cette couche d'argile fait plus de 3 m, une couche supplémentaire a donc été ajoutée au profil de sol. La carte des sols finale possède 401 types de sols différents, certains ne se différenciant que par la présence d'une couche d'argile en profondeur.

Tout comme la couche d'utilisation du sol, la couche des types de sols est liée à la base de données des sols de SWAT (usersoil.dbf). Celle-ci contient les paramètres nécessaires au modèle pour calculer le bilan hydrique des sols. Afin de rassembler les informations requises, plusieurs sources d'informations ont été utilisées. De la banque de données des sols de l'IRDA (2010), ont été tirés le contenu en sable, limon et argile de chacune des couches de sols ainsi que la conductivité hydraulique et la densité apparente. Les profondeurs des couches de sols ont quant à elles été établies à 30 cm pour la première couche, 40 cm pour la deuxième et 60 cm pour la troisième couche (Tabi et al., 1990). Toutefois, la profondeur maximale du profil du sol a été établi à 200 cm, sauf aux endroits où le roc est présent à moins de 200 cm. En conséquence, la profondeur de la dernière couche de sol a été fixée à 200 cm ou à la profondeur au roc. Cette base de données ne contient cependant pas toutes les séries de sols du Québec. La base nationale de données sur les sols a été utilisée dans un deuxième temps pour compléter les informations sur la profondeur des couches de sol ainsi que le contenu en sable, limon et argile. Pour la Montérégie, elle ne contient que peu de valeurs de conductivité hydraulique ou de densité apparente. Les différents rapports pédologiques ont ensuite servi à compléter les informations texturales et les profondeurs des sols encore manquantes.

La réserve en eau (AWC) utile de la plupart des sols a quant à elle été déterminée à l'aide du triangle des textures (Pedosphere, 2009). Lorsque les pourcentages d'argile et de sable ne permettaient pas d'utiliser le triangle des textures, les valeurs typiques par classe texturale du sol ont été utilisées (NRCS, 2010). Le groupe hydrologique et le facteur d'érodabilité des sols ont été tirés de la base de données de l'ODEP (Michaud et al., 2008a), ces paramètres ayant déjà été calculés pour la majorité des séries de sols du Québec.

6.1.3.4 Données météorologiques

Les données quotidiennes de précipitations totales et de température utilisées en support à la modélisation hydrologique proviennent d'Environnement Canada (section 1.5.2.2). En tout, les données de précipitations et de températures minimales et maximales journalières de 16 stations météorologiques ont été utilisées. Toutes les stations ont au moins 19 ans de données et sont encore actives.

SWAT requiert des séries temporelles complètes de données climatiques. Si ces séries sont incomplètes, le modèle a recours à un simulateur de climat qui génère des données en se basant sur des statistiques climatiques de la station la plus près. Pour les États-Unis, ces statistiques existent pour plusieurs stations météorologiques, la plus près se situant à Plattsburg, NY, à environ 50 km au sud du bassin (http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html). Au Québec, ces statistiques doivent être calculées pour que le modèle puisse générer des données valides. Dans le cadre de ce projet, une autre façon de procéder a été utilisée afin de compléter les données manquantes. La méthodologie retenue est documentée dans Gong (2004) et utilise un programme externe à SWAT afin d'estimer les données manquantes d'une station à partir des moyennes mensuelles des stations avoisinantes.

6.1.3.5 Gestion du territoire

Les fichiers de gestion (*.mgt*) du modèle SWAT contrôlent toutes les activités anthropiques, du balayage des rues, en passant par les semis, épandages et récoltes aux champs. Ces fichiers de gestion sont applicables à la plus petite entité du modèle, soit l'URH. Bien qu'il soit possible d'entrer dans le modèle une gestion complexe et représentative de la réalité pour chacun des URH, particulièrement pour les zones agricoles, les fichiers de gestion comportent un certain niveau d'incertitude. En effet, les données nécessaires pour bien décrire la régie des champs ne sont pas disponibles à cette échelle. Pour les zones en culture, les informations concernant les dates de semis, de fauches du foin et de récoltes sont choisies en fonction des données pluviométriques, tout en tenant compte des informations contenues dans le bulletin *L'état des cultures* (FADQ, 2010). Ainsi, à l'intérieur des fenêtres de temps décrites dans *L'état des cultures,* les dates où il n'y pas de pluie ont été retenues. Si possible, une opération au champ n'est simulée que lorsque les deux jours précédents sont sans pluie. Les dates retenues dans le présent exercice de modélisation sont présentées par type de culture et pour chaque année dans Beaudin et al. (2013). Pour le présent exercice, la fertilisation des cultures a été mise en place de façon automatique afin que les besoins en nutriments des plants soient satisfaits.

C'est aussi dans ces fichiers que la présence de drains agricoles est notée. À cet effet, des informations provenant du Plan d'accompagnement agroenvironnemental du MAPAQ (2011b) ont été mises à profit pour redistribuer les champs ayant un drainage souterrain. Les sols à texture plus lourdes et/ou ayant des cultures annuelles sont privilégiées. Finalement, un des paramètres les plus importants, les numéros de courbes (« curve number »), à la base de la méthode SCS-CN (USDA-SCS, 1972) qui sert à calculer le ruissellement, sont également entrés dans les fichiers de gestion.

6.1.3.6 Données hydrométriques et de qualité de l'eau

Les données hydrométriques et de qualité de l'eau sont évidemment au cœur de toute étude en hydrologie, que ce soit pour comprendre les dynamiques du transport de l'eau, de l'érosion et du transport des nutriments ou pour déterminer la recharge des aquifères.

Dans le cadre de ce projet, des données hydrométriques ont été colligées à plusieurs endroits à l'intérieur des bassins versants de la baie Missisquoi et des rivières Yamaska et Richelieu (section 1.5.2.4). Des 41 stations hydrométriques considérées dans le cadre de la modélisation hydrologique, 10 ont été utilisées pour caler le modèle et 6 pour le valider. Le tableau 6.4 recense pour chacune des stations les périodes utilisées pour le calage et la validation.

Au-delà des données de débits, certaines des stations hydrométriques sont également équipées de sondes multi-paramètres, acquises par l'IRDA dans le cadre de différents projets (Michaud et al., 2008b; Michaud et al., 2009a). Ces sondes mesurent la turbidité, la conductivité électrique de l'eau et le pH à un pas de temps de 15 minutes. Une des applications intéressantes des

données de conductivité électrique de l'eau est la possibilité de séparer les débits totaux entre le ruissellement en surface et le transport de l'eau dans le sol. Considérant que les sols des bassins étudiés sont majoritairement calcaires, l'eau qui s'infiltre dans le sol se charge d'ions et possède une conductivité électrique plus élevée que l'eau de ruissellement. À partir de cette différence de conductivité électrique de l'eau, il est possible de séparer les hydrogrammes. Ce type d'information est particulièrement utile lors du calage de modèles hydrologiques.

Tableau 6.4 : Période de calage et de validation du débit total aux stations retenues

Bassins	Station hydrométrique	Dates	Usage
Bassin 6 (Rivière David)	30316	2001 - 2009	Calage
Bassin 8 (Rivière Pot-au-Beurre) (1)	0303BE	2009 - 2010	Calage
Bassin 9 (Rivière Petite Bellevue) (1)	0303PB	2009 - 2010	Calage
Bassin 25 (Rivière des Hurons)	30415	2001 - 2009	Calage
Bassin 32 (Rivière l'Acadie)	30421	2001 - 2009	Calage
Bassin 34 (Rivière Yamaska Nord)	30340	2001 - 2009	Calage
Bassin 34 (Rivière Yamaska à Farnham)	30440	2001 - 2009	Calage
Bassin 40 (Ruisseau Morpions)	30423	2001 - 2009	Calage
Bassin 42 (Rivière Yamaska Sud-Est)	30337	2001 - 2009	Calage
Bassin 54 (Rivière Missisquoi)	04293500VT	2001 - 2010	Calage
Bassin 19 (Rivière Yamaska à St-Hyacinthe)	30345	2001 - 2009	Validation
Bassins 27 (Rivière Noire)	30346	2001 - 2009-05	Validation
Bassin 29 (Ruisseau Castor) (1)	30422	2001-11 – 2010	Validation
Bassin 43 (Ruisseau Walbridge témoin) (1)	30428	2001-11 – 2006-10	Validation
Bassin 45 (Ruisseau Ewing) (1)	30426	2004-07 - 2010-12	Validation
Bassin 46 (Rivière aux Brochets partie amont)	30420	2001 - 2009-05	Validation

Note:

(1) : Des données physicochimiques de séparation des hydrogrammes sont disponibles à ces stations.

6.1.4 Résultats

Plusieurs paramètres du modèle SWAT peuvent être ajustés afin de caler les résultats aux mesures prises dans les cours d'eau. Généralement, le processus de calage du modèle prend comme point de départ les valeurs par défaut proposées par le modèle. Toutefois, comme plusieurs cycles de modélisation hydrologique avec SWAT ont eu lieu en Montérégie, les valeurs de départ retenues dans le présent exercice ont été tirées des rapports antérieurs (Michaud et al., 2006, 2008a, 2008b). Ces valeurs de départ, ainsi que les valeurs de calage finales sont disponibles dans Beaudin et al. (2013). Ces dernières ont été ajustées en tenant compte, d'une part, de la biomasse des plantes, laquelle a une influence sur l'évapotranspiration, puis à l'aide des mesures de débits totaux dans les cours d'eau.

6.1.4.1 Vérification des biomasses annuelles

Les statistiques de rendements réels ont été extraites des données de la Financière agricole du Québec par culture pour les années 2001 à 2009. Afin d'obtenir les biomasses totales des cultures, les valeurs estimées des biomasses aériennes non récoltées et des biomasses racinaires ont été ajoutées aux rendements. Ces valeurs sont tirées du Guide de référence en fertilisation (CRAAQ, 2010). Ensemble, les biomasses moyennes et les valeurs de rendements servent à vérifier si la croissance des cultures des URH agricoles rejoint les biomasses réelles. Ces biomasses ayant une influence sur l'évapotranspiration, elles ont également une influence importante sur le bilan hydrique (Michaud et al., 2006).

Le tableau 6.5 présente la comparaison, pour chaque type de cultures, des biomasses annuelles moyennes modélisées par SWAT par rapport aux biomasses annuelles moyennes réelles. Pour la majorité des superficies agricoles, les biomasses modélisées représentent bien les biomasses réelles, avec des différences de moins de 10 %. Toutefois, les céréales montrent des biomasses trop élevées. Toutefois, comme les superficies en céréales sont restreintes à 3 % du territoire, l'effet sur le bilan hydrique global est négligeable.

Tableau 6.5 : Comparaison des biomasses annuelles moyennes simulées par SWAT aux biomasses moyennes (rendements et biomasses estimées) annuelles de 2001 à 2009

Culture	Biomasse totale estimée (t/ha)	Biomasse modélisée (t/ha)	Déviation	Proportion de la culture dans le bassin
Maïs	21	20.1	- 4 %	36 %
Soya	9	9.5	+ 5 %	13 %
Prairie	10	9.2	- 8 %	11 %
Avoine	8	9.9	+ 24 %	1 %
Blé	10	15	+ 51 %	2 %

6.1.4.2 Bilan hydrique

Le tableau 6.6 présente la répartition du bilan hydrique annuel moyen simulé entre 2001 et 2010. Considérant les 1 175 mm de précipitations totales tombant en moyenne pour cette période sur l'ensemble des bassins versants à l'étude, environ la moitié part en évapotranspiration (52.5 %). Le débit moyen en rivière (débit total) est quant à lui de 526 mm et comprend le ruissellement de surface annuel moyen estimé à 87 mm ainsi que les flux

souterrains, incluant le ruissellement de sous-surface et les apports d'eau souterraine des aquifères, estimés à 439 mm. Finalement, la recharge moyenne annuelle est estimée à 66 mm.

Dans l'ensemble, la répartition des composantes du bilan hydrique semble représentative des conditions agro-climatiques locales. Ce bilan semble toutefois sous-estimer quelque peu le ruissellement en surface. En effet, les études en bassins-versants agricoles en Montérégie (Michaud et al., 2012 ; Enright, 2006) montrent plutôt des hauteurs de ruissellement avoisinant 150 mm, représentant environ 30 % du débit en cours d'eau. Ces valeurs sont toutefois fortement variables spatialement, et d'une année à l'autre. Ainsi, en 2009, les bassins versants Ewing et Castor font état de valeurs de ruissellement de l'ordre de 56 et 98 mm (17 % et 28 % du débit total) respectivement. De façon similaire, des études en parcelles agricoles drainées (Enright, 2006) font état d'hauteurs de ruissellement très faibles, variant de 13 à 471 mm, soit de 15 à 31 % du débit sortant des parcelles. Considérant que les forêts et milieux boisés représentent près de 35 % du bassin, la faible valeur du ruissellement moyen (87 mm) pour l'ensemble du bassin demeure plausible.

Tableau 6.6 : Bilan hydrique moyen annuel modélisé pour la période 2001-2010

Fractionnement du bilan hydrique	Quantités (mm) (% des précipitations tot.)	Quantités pour la zone sans argile sous-jacente (mm)
Précipitations totales	1 175	1 184
Évapotranspiration	620 (52.5 %)	618 (52 %)
Débit en rivière (débit total)	526 (44.5%)	520 (44 %)
Contribution du ruissellement de surface	87 (7.5 %)	78 (6.5 %)
Contribution des écoulements souterrains	439 (37 %)	444 (37.5 %)
Recharge de l'aquifère	66 (5.5 %)	113 (9.5 %)
Fluctuations associées à la sublimation et à l'emmagasinement de l'aquifère	-36 (-3 %)	-68 (-5.5 %)

Une étude précédente effectuée par Michaud et al. (2006) avec SWAT dans le bassin de la rivière aux Brochets montre cependant des résultats quelque peu différents. Dans cette étude, l'ajustement du modèle montre une surestimation du ruissellement et une sous-estimation des eaux de drainage agricole, alors qu'actuellement le contraire est observé. Une des différences majeures entre les deux exercices est la profondeur modélisée des sols. Alors qu'un mètre de sol a été simulé pour le projet du bassin de la rivière aux Brochets, la profondeur modélisée pour ce projet est de deux mètres. Puisque le sol peut emmagasiner plus d'eau, l'infiltration d'une couche à l'autre des sols est plus grande et en conséquence la quantité d'eau moyenne évacuée par les drains peut être plus élevée.

La façon dont SWAT a été mis en place dans le présent exercice doit également être considéré dans l'analyse du bilan hydrique. Tel que mentionné précédemment (section 6.1.1), SWAT ne modélise par directement les transferts d'eau dans les aquifères. Afin de restreindre la recharge de l'aquifère dans les zones où une épaisseur de plus de 3 m d'argile restreint les transferts d'eau du sol à l'aquifère rocheux régional, une couche d'argile a été ajoutée au profil des sols. Cette structure du modèle a malheureusement entraîné des problèmes lors du calage du modèle en surestimant le ruissellement de surface dans ces zones. Lorsque l'eau est transférée d'une couche à l'autre du sol et atteint la couche d'argile peu perméable, la couche au-dessus de l'argile se sature et présente un excès d'eau. L'eau en surplus, qui ne peut être

emmagasinée par la couche de sol, est envoyée aux couches de sol supérieures, jusqu'à ce que du ruissellement en surface soit généré. En réalité, le toit de la couche d'argile peut être rencontré à plus de deux mètres de la surface du sol et, par conséquent, il peut y avoir des dépôts meubles perméables ou semi-perméables entre le profil de sol et la couche d'argile qui permettent des transferts d'eau vers les cours d'eau ou même en dehors du sous-bassin modélisé via des écoulements souterrains. Pour ces raisons, les résultats de SWAT dans les zones où l'argile restreint les transferts aqueux n'ont pas pu être calés de façon satisfaisante et seraient donc moins représentatifs en comparaison des résultats obtenus pour les URH en dehors de ces zones. Par ailleurs, malgré l'ajout d'une couche d'argile, les valeurs de recharge estimées dans les zones visées par cet ajout ont été jugées non représentatives également en raison de valeurs trop élevées localement. Par conséquent, les résultats de recharge dans ces zones ont été remplacés par des valeurs nulles afin d'obtenir un portrait régional plus représentatif de la recharge dans ces zones les sédiments argileux restreignent la recharge de façon significative. A titre de comparaison, le tableau 6.6 montre donc aussi le fractionnement du bilan hydrique pour les zones exemptes de cette couche d'argile. Le bilan hydrique fait alors état d'une évapotranspiration légèrement plus faible, fort probablement associée aux températures plus basses dans le piedmont appalachien. Le débit total moyen reste sensiblement le même alors que le ruissellement est plus faible et les transferts souterrains sont plus élevés, tout comme la valeur de recharge.

6.1.4.3 Calage et validation aux stations hydrométriques

La performance du modèle a été évaluée à l'aide de trois indices statistiques et de l'appréciation visuelle des hydrogrammes journaliers. Trois critères d'évaluation ont été retenus, soit le biais par rapport aux valeurs prédites (B), le coefficient de corrélation de Pearson (r) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS). Le biais témoigne de la capacité du modèle à reproduire les volumes d'eau qui ont transité dans le réseau hydrographique pendant la période de référence. Pour le calage quotidien des débits, un biais de plus ou moins 10 % est considéré très bon. Au-delà de ± 25 %, les résultats sont insatisfaisants (Moriasi et al., 2007). Le coefficient de corrélation de Pearson témoigne quant à lui de la corrélation linéaire simple entre les valeurs mesurées et prédites. Les valeurs de r varient entre -1 et 1. Une valeur de -1 indique une relation inverse forte alors qu'une valeur de 1 signale une forte relation dans le même sens. Finalement, le coefficient de Nash-Sutcliffe est un indicateur sensible à l'ajustement des pics des séries chronologiques. Les valeurs de NS varient entre l'infini négatif et 1, où 1 témoigne d'un ajustement parfait du modèle. Mensuellement, les valeurs supérieures à 0,5 sont considérées satisfaisantes et les valeurs supérieures à 0,75 sont très bonnes (Moriasi et al, 2007).

Huit stations hydrométriques ont été utilisées afin de comparer les débits journaliers et mensuels simulés aux débits mesurés pour la période de calage (tableau 6.7). Les stations ont été choisies de façon à couvrir l'ensemble du territoire étudié. La performance du modèle a été évaluée à l'aide des données disponibles entre le 1er janvier 2001 et le 31 décembre 2010. Il en résulte donc des périodes de calage différentes. De la même manière, cinq autres stations ont été utilisées en validation. Toutefois, seuls les mois possédant une série de données complète ont été utilisés. Pour cette raison, les biais mensuels diffèrent parfois des biais quotidiens. Dans l'ensemble, la comparaison des débits simulés aux mesures prises en cours d'eau témoignent d'un bon ajustement. Les biais sont généralement en dessous de 15 %, sauf pour la station du bassin de la Petite-rivière-Bellevue où le modèle génère une surestimation de 18 %, ce qui demeure tout de même satisfaisant (Moriasi et al., 2007). En territoire de validation, les biais sont également satisfaisants, mais le bassin Ewing montre une surestimation (30,5 %).

Bien que les corrélations journalières pour l'ensemble des bassins ne soient pas satisfaisantes (< 0,8; Donigian, 2002), pour les périodes mensuelles, les résultats des stations de calage sont généralement bons. Les stations de validation montrent cependant des résultats variables. Les

zones plus boisées (Yamaska, Noire et Brochets amont) ont des coefficients de corrélation satisfaisants à bons, contrairement aux bassins plus agricoles où les résultats sont plus faibles.

Au niveau des coefficients Nash-Sutcliffe journaliers, les résultats sont plutôt faibles et dépassent rarement 0,50 (satisfaisant). Considérant la sous-estimation du ruissellement observée dans le bilan hydrique, ces valeurs ne sont pas surprenantes. De plus, sur de grands territoires, SWAT a tendance à simuler les pics de ruissellement/débit une journée plus tôt. Ceci est partiellement dû à la différence entre la période de simulation du modèle et les périodes de cumul des données hydrométriques (minuit à 11:45h) et climatique (8:00h à 7:45h) au 15 min., ainsi qu'aux algorithmes du modèle qui régissent les temps de concentration. Comme le NS est sensible à ces valeurs décalées, les NS journaliers tendent à être faibles. Pour les périodes mensuelles, ces différences sont moins apparentes et les coefficients des stations de calages sont en général bons à très bons. Pour les stations de validation, les bassins plus forestiers montrent de meilleurs résultats que les bassins agricoles. Dans ces derniers, les différences de débit et de ruissellement peuvent en partie expliquer les faibles résultats. Considérant le but du travail qui consiste à évaluer la recharge, le bilan hydrique en zone non captive ainsi que l'ajustement du modèle aux stations hydrométriques (tableau 6.7) sont jugés satisfaisants.

Tableau 6.7 : Calage et validation du modèle SWAT pour les débits journaliers et mensuels à 12 stations hydrométriques entre 2001 et 2010

Usage	No.	BV	Station	Date	n	B	r.	NS
Calage	30316	6	Riv. David	2001-01-01-2009-03-17	2998	-8.6%	0.71	0.23
					99	-5.4%	0.85	0.68
Calage	--	9	Petite-riv. Bellevue	2009-05-31-2010-12-31	579	18.5%	0.58	0.15
					19	18.5%	0.9	0.74
Calage	30415	25	Riv. des Hurons	2001-01-01-2009-03-9	2934	4.0%	0.72	0.23
					99	5.9%	0.82	0.55
Calage	30421	32	Riv. L'Acadie	2001-01-01-2009-05-14	3056	1.2%	0.68	0.24
					101	1.5%	0.84	0.66
Calage	30340	34	Riv. Yamaska Nord	2001-01-01-2009-03-12	3054	-13.6%	0.73	0.52
					101	-11.5%	0.89	0.68
Calage	30302	37	Riv. Yamaska à Farnham	2001-01-01-2009-05-14	3056	6.0%	0.77	0.57
					101	6.5%	0.92	0.78
Calage	30314	42	Riv. Yamaska S-E	2001-01-01-2009-05-13	3055	0.6%	0.62	0.32
					101	1.2%	0.9	0.8
Calage	42500vt	54	Riv. Missisquoi	2001-01-01-2010-12-06	3627	15.0%	0.72	0.41
					120	15.0%	0.89	0.69
Validation	30420	46	Riv. aux Brochets amont	2001-01-01-2009-05-14	3056	-4.6%	0.73	0.45
					101	-4.2%	0.85	0.6
Validation	30426	45	Rau Ewing	2002-01-01-2010-12-31	2362	30.5%	0.58	-0.07
					109	38.5%	0.64	-0.99
Validation	30428	43	Rau Wallbridge	2001-11-01-2006-10-31	1826	-21.9%	0.47	0.13
					60	-12.9%	0.48	-0.23
Validation	30304	27	Riv. Noire	2001-11-01-2009-05-14	3056	-1.5%	0.74	0.52
					101	-1.1%	0.9	0.73
Validation	30345	19	Riv. Yamaska à St-Hyacinthe	2001-11-01-2009-05-14	3056	-1.1%	0.79	0.59
					101	-0.7%	0.91	0.76

6.1.4.4 Recharge

Bien que le modèle ait été calé et validé pour la période 2001-2010 à des pas de temps journaliers et mensuels, la recharge a été calculée annuellement pour la période 1979 à 2010. Le tableau 6.8 présente les valeurs annuelles moyennes de recharge et du bilan hydrique pour la période 1979 à 2010.

Tableau 6.8 : Valeurs de recharge annuelle estimées par SWAT pour la période 1979 à 2010

Année	Précipitations totales (mm/an)	Évapotrans-piration (mm/an)	Recharge (mm/an)	Ruissellement de surface (mm/an)	Écoulements souterrains (mm/an)	Débit total (mm/an)
1979	1096	632	53	60	342	401
1980	988	605	43	26	307	334
1981	1180	673	56	80	384	464
1982	954	573	52	36	425	461
1983	1358	591	79	78	555	634
1984	1001	616	55	41	428	468
1985	1077	604	56	35	422	457
1986	1210	656	69	64	459	523
1987	1015	615	50	51	382	433
1988	955	590	48	41	328	369
1989	1014	574	46	41	344	386
1990	1304	628	81	91	556	648
1991	1025	605	57	37	431	468
1992	1038	574	59	49	437	486
1993	1286	617	82	76	549	626
1994	1170	632	65	78	471	549
1995	1183	606	58	65	384	448
1996	1262	609	86	132	568	699
1997	1123	569	61	52	473	525
1998	1056	627	61	44	454	499
1999	1072	602	54	57	370	427
2000	1259	607	70	60	481	541
2001	950	609	52	68	390	458
2002	1112	608	62	57	402	460
2003	1293	585	72	91	474	565
2004	960	599	52	59	383	443
2005	1282	616	72	137	445	582
2006	1392	651	89	145	576	721
2007	1197	610	62	56	422	478
2008	1220	638	72	89	487	576
2009	1149	627	66	72	424	496
2010	1205	648	64	97	384	481
Minimum	**950**	**569**	**43**	**26**	**307**	**334**
Maximum	**1392**	**673**	**89**	**145**	**576**	**721**
Moyenne	**1137**	**612**	**63**	**68**	**436**	**503**
Écart-type	**128**	**25**	**12**	**29**	**71**	**92**

En moyenne, la recharge de la zone étudiée est de 63 mm/an ± 12 mm/an. Selon les conditions climatiques annuelles, la recharge oscille de 43 mm/an en 1980 à près de 89 mm/an en 2006, qui fut une année particulièrement pluvieuse au printemps et en début d'été. Comme mentionné à la section 6.1.4.2, les valeurs de recharge estimées pour les zones avec plus de 3 m d'argile ont été jugées peu représentatives et remplacées par des valeurs nulles. Cela a généré une valeur moyenne annuelle de recharge un peu plus faible qu'initialement estimé. A titre de comparaison, la recharge moyenne annuelle est 107 mm/an ± 20 mm/an lorsqu'on considère seulement les valeurs de recharge estimées dans les zones exemptes d'argile.

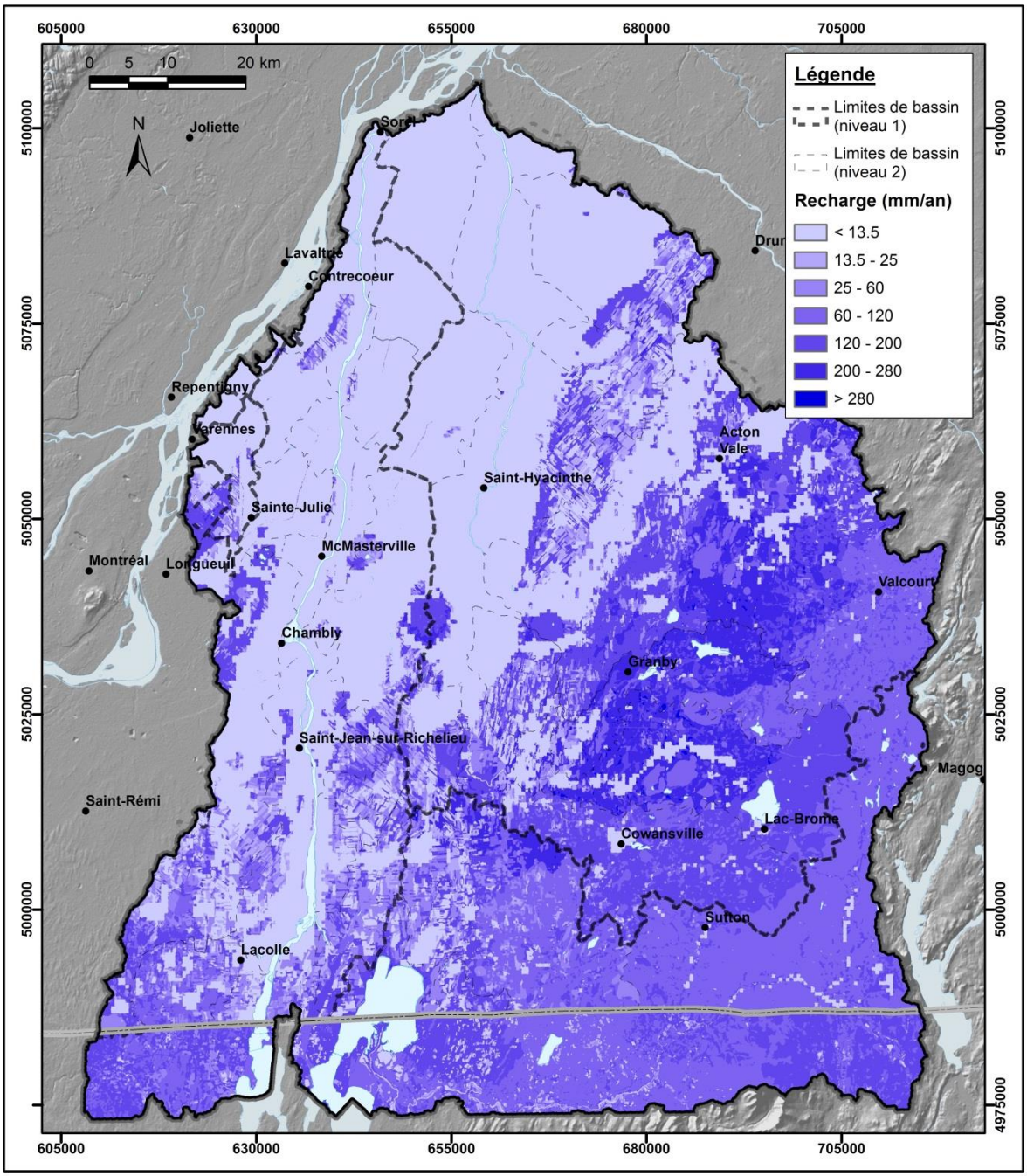


Figure 6.5 : Recharge moyenne annuelle obtenue par SWAT pour la période 1979-2010

La figure 6.5 présente la recharge annuelle moyenne des 32 dernières années. Les zones où la recharge est nulle apparaissent en gris. Les valeurs maximales de recharge modélisée atteignent 555 mm/an et sont plutôt localisées dans le sud-est du bassin, dans les Appalaches, où les sols sont plus minces et des affleurements rocheux sont présents. Rappelons que la recharge telle que considérée par SWAT correspond à l'eau qui percole du sol et qui ne rejoint pas le cours d'eau pour chaque URH via l'aquifère peu profond (figure 6.3). Ceci a pour effet possible de surévaluer la recharge dans ces zones. D'ailleurs, la plupart des valeurs de recharge supérieures à 390 mm/an sont retrouvées dans des zones avec des sols identifiés comme affleurement rocheux. Comme ces sols couvrent de grandes superficies selon les cartes pédologiques disponibles (4,9 % du territoire), la recharge moyenne comptabilisée dans le bilan hydrique en est affectée.

Sur la carte, une démarcation à la frontière avec les États-Unis est visible, principalement en raison des différentes informations pédologiques disponibles de part en d'autres de la frontière. Bien que l'utilisation du sol ait un effet indirect sur les valeurs de recharge estimées, celles-ci sont principalement influencées par la description pédologique des sols dont la précision diffère de chaque côté de la frontière. Les sols des états du Vermont et de New York ont en majorité été cartographiés à une échelle de 1/20 000, où l'aire minimale représentée est d'environ 3 acres. Au Québec, les cartes pédologiques de la région de Brome-Missisquoi ont été élaborées à une échelle de 1/63 600 en 1948 (Cann et al., 1948). Les méthodes descriptives de part et d'autres sont différentes et plusieurs paramètres hydrologiques des sols ont dû être évalués, plutôt que mesurés, du côté québécois. Sur la carte, il est également possible de voir une tendance vers des valeurs plus faibles de recharge en zones agricoles dans la Plate-forme du Saint-Laurent et plus élevées en zones boisées et herbacées des Appalaches.

6.1.4.5 Comparaison des résultats obtenus avec SWAT et HELP

Bien que les modèles SWAT et HELP aient été conçus pour répondre à des objectifs distincts, une comparaison des résultats de recharge obtenus à l'aide des deux modèles a été faite afin d'identifier les similarités et différences dans les tendances spatiales et temporelles pour la zone d'étude. Dans la mesure du possible, les données utilisées pour les deux modèles ont été les mêmes (ex. : données climatiques, profondeurs et propriétés des sols, utilisation du sol, …). Tel que mentionné précédemment (sections 4.3.1 et 6.1.1), la recharge de l'aquifère rocheux régional correspond à l'infiltration verticale de l'eau jusqu'au roc pour HELP et à la recharge de l'aquifère profond pour SWAT. La figure 6.6 offre une comparaison sommaire des résultats de modélisation de la recharge annuelle calculée par les modèles SWAT et HELP pour la période 1979-2010, avec en arrière-plan les précipitations totales qui sont les mêmes pour les deux modèles. Bien qu'on puisse percevoir une tendance similaire entre les deux modèles pour la période considérée, les valeurs de SWAT sont généralement plus faibles et plus variables d'une année à l'autre (moyennes annuelles de 62.6 et 97.8 mm/an pour SWAT et HELP, respectivement). Étant donné la multitude d'intrants nécessaires à l'utilisation de ces modèles, plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ces différences, notamment :

- Support physique pour le calcul des modèles (URH pour SWAT (vectoriel) et cellule 1D pour HELP (matriciel))
- Profondeur des profils considérés (profondeur variable pour HELP (jusqu'au roc) et profondeur maximale de 2 m pour SWAT)
- Algorithmes des modèles (modèle déterministe semi-distribué comprenant plusieurs équations pour SWAT et équations de Campbell (percolation verticale) et de Boussinesq (écoulement saturé latéral) pour HELP)
- Méthode pour le calcul de la recharge (calculs basés sur les propriétés physiques du milieu pour HELP et calculs empiriques pour SWAT)
- Méthode de calage (différentes données de référence, précision de calage différente, …)

Par ailleurs, des différences sont également notables au niveau de l'évapotranspiration estimée par les modèles. Tel que mentionné à la section 4.3.2, l'évapotranspiration estimée par HELP serait sous-estimée par rapport aux valeurs réelles mais également par rapport aux valeurs obtenues avec SWAT. Cette différence pourrait être en partie attribuable aux différentes méthodes de calcul utilisées (équation de Hargreaves pour SWAT et de Penman pour HELP), en plus des raisons indiquées à la section 4.3.2. Considérant que les débits totaux estimés par SWAT et HELP sont plutôt similaires (moyennes annuelles respectives de 503 et 531 mm/an), cette différence observée pour l'évapotranspiration (612 et 532 mm/an pour SWAT et HELP respectivement) pourrait expliquer en partie la différence observée pour la recharge.

Au niveau de la distribution spatiale, les valeurs de recharge estimées présentent des tendances similaires, malgré les valeurs plus faibles obtenues de SWAT. Les valeurs les plus élevées se retrouvent dans les Appalaches, plus particulièrement dans le Piedmont appalachien (zone externe des Appalaches).

Bien que les données semblent montrer les mêmes tendances temporelles et spatiales, une étude comparative plus détaillée serait requise afin de mieux identifier les paramètres qui permettraient de meilleurs ajustements lors du calage. De plus, une analyse des variations intra-annuelles (mensuelles ou journalières) permettrait également de vérifier les différences quant aux périodes favorables ou non à la recharge.

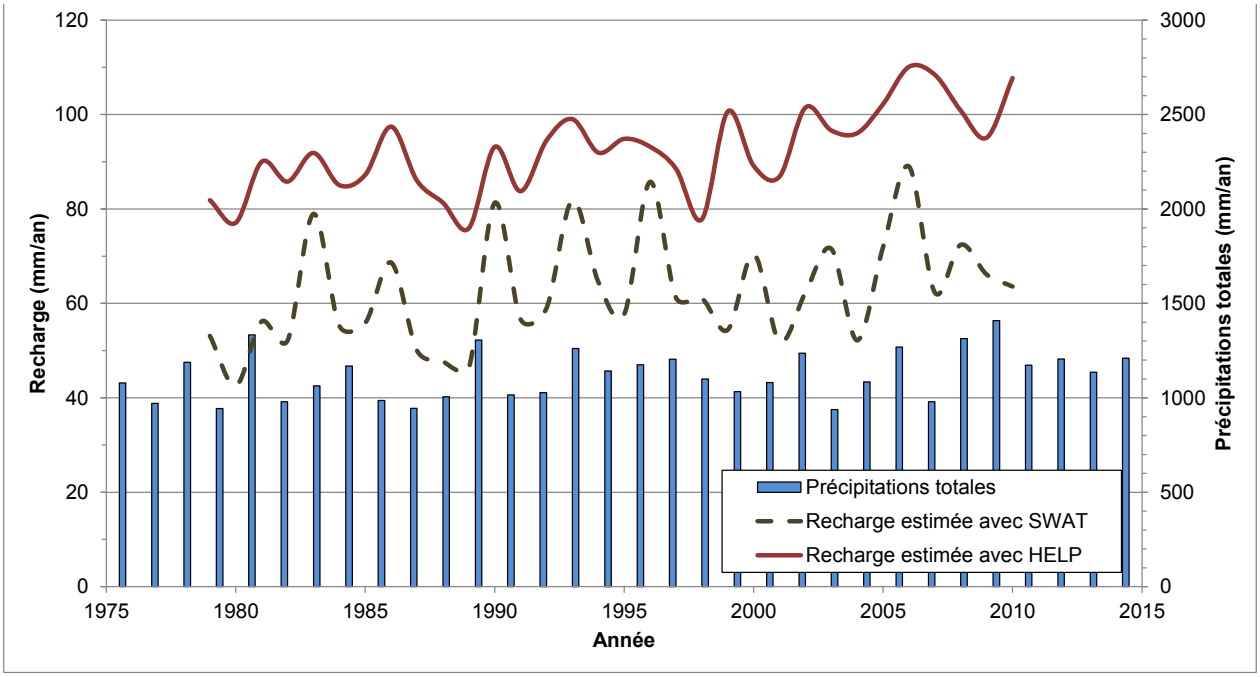


Figure 6.6 : Comparaison de la recharge annuelle modélisée par les modèles HELP et SWAT

6.2 Caractérisation de la fracturation

6.2.1 Données utilisées

Les analyses statistiques sur la fracturation du roc en Montérégie-Est ont été réalisées à partir des données de diagraphies acoustiques (*Acoustic Borehole Televiewer*) et de relevés sur affleurements. Plus de détails sur ces analyses sont présentés dans Ladevèze et al. (2013) ainsi que Crow et al. (2013).

L'identification détaillée des fractures le long des parois des puits à l'aide de diagraphies permet une étude statistique de la densité de fracturation dans la première centaine de mètres de profondeur correspondant aux intervalles forés dans le roc. La mesure de l'orientation des joints dans les puits et affleurements apporte quant à elle une information sur les tendances préférentielles d'orientation des fractures sur le territoire. Un total de 30 puits et 19 sites avec le roc affleurant ont été visités (figure 6.7).

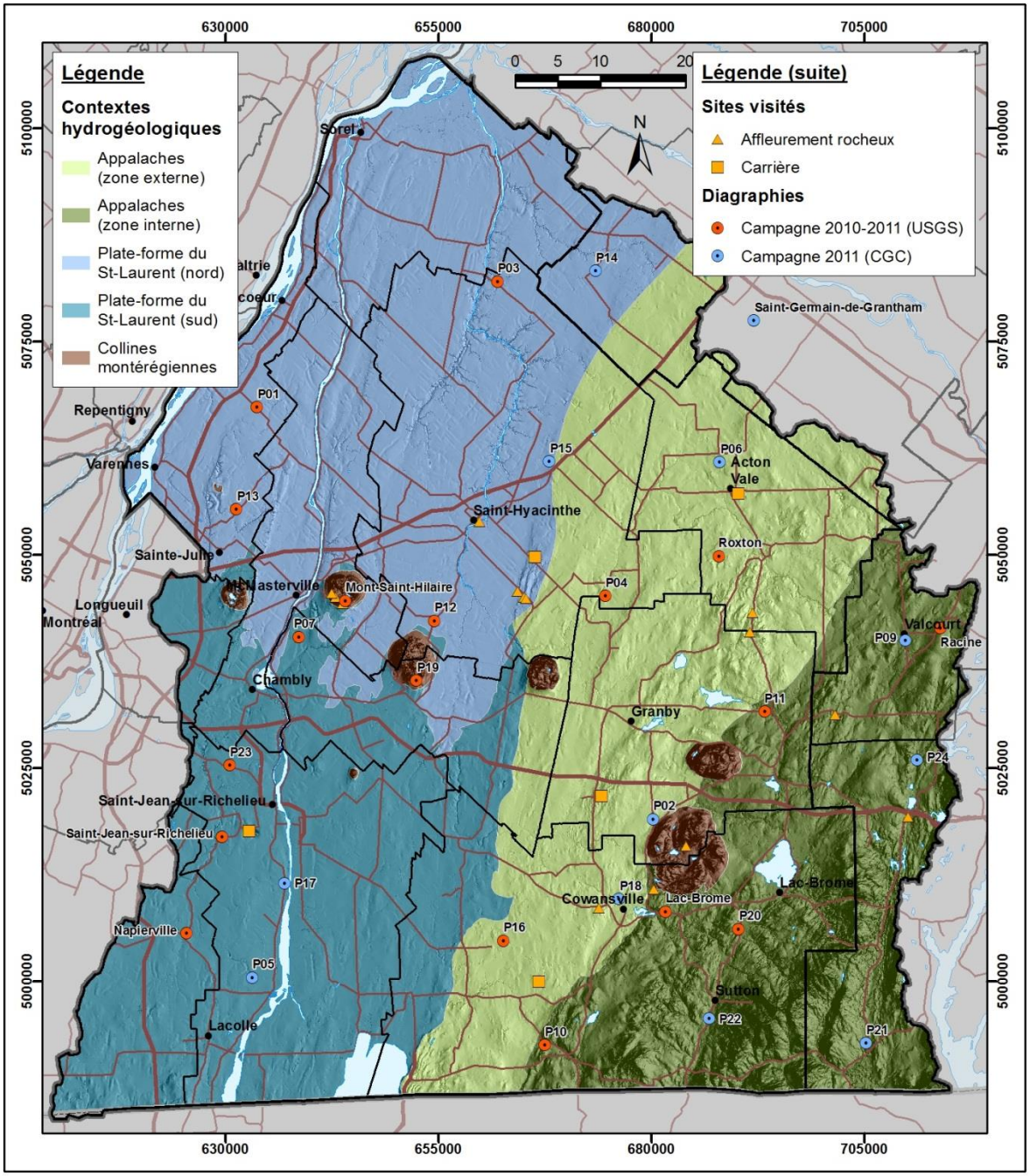


Figure 6.7 : Localisation des puits avec données de diagraphies acoustiques et des affleurements visités

6.2.1.1 Données de diagraphies

Deux jeux de données de diagraphies ont été collectés grâce à des campagnes de levés réalisés d'abord par l'USGS et ensuite par la CGC. Les données de diagraphies utiles à l'identification de fractures sont présentées dans le tableau 6.9. Les statistiques sont basées uniquement sur les fractures identifiées avec les données de diagraphies acoustiques (29 puits sur 30). La majorité des mesures de débitmètre n'ont pas été concluantes en ce qui concerne les débits alimenté par les fractures dans le roc; ceux-ci étaient généralement faibles, voire inexistants dans certains cas. Par ailleurs, pour certains puits, des arrivées d'eau provenant de la base du tubage du puits ont été observées, lesquelles sont possiblement dues à un défaut de scellement de ce dernier au contact du roc.

Les levés acoustiques ne sont pas de qualité uniforme, les données de la deuxième campagne ayant été acquises avec une sonde acoustique haute résolution alors que cette sonde n'était pas disponible lors des levés initiaux. Ainsi, certains puits imagés lors de la première campagne ont été ré-investigués (4 puits sur 29) afin d'améliorer la connaissance des structures géologiques les recoupant.

Tableau 6.9 : Synthèse des diagraphies de puits disponibles

Type de diagraphies	Campagne		Total
	USGS	CGC	
Toutes les sondes	**26**	**12**	30 / 30
Sonde acoustique	21	12	29 / 30
Débitmètre *(Flowmeter)*	12	6	16 / 30
Sonde de température	26	5	30 / 30

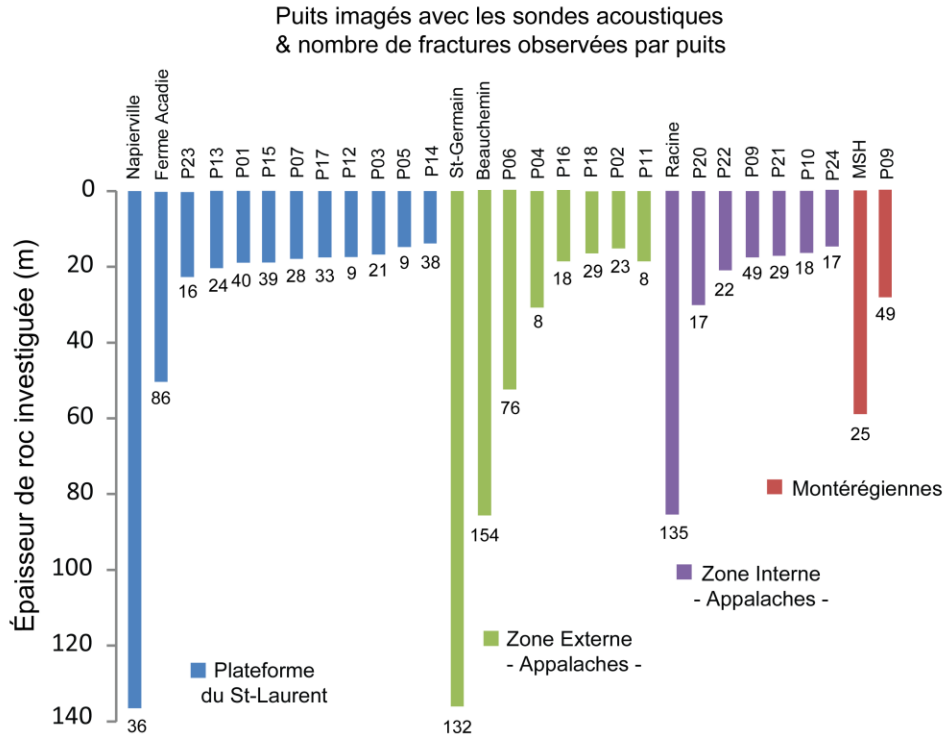


Figure 6.8 : Épaisseur de roc investiguée et nombre de fractures observées pour chaque puits

Les puits interceptent des contextes structuraux variés (figures 6.7 et 6.8) : sur 29 puits, 12 sont situés dans la Plate-forme du Saint-Laurent, 2 au pourtour des collines Montérégiennes, 8 dans la zone externe des Appalaches et 7 dans la zone interne des Appalaches. Pour la majorité des puits, l'intervalle investigué correspond aux 25 m de la partie supérieure du roc. Seuls 10 puits ont été investigués à des profondeurs supérieures à 25 m dans le roc (figure 6.8).

6.2.1.2 Données d'affleurements

En tout, 19 sites d'affleurements répartis sur le territoire de la Montérégie Est ont été visités (figure 6.7). Le relief étant très peu marqué dans la Plate-forme du Saint-Laurent et dans la partie ouest de la zone externe des Appalaches, 5 carrières dans lesquelles le roc est exploité (pour la production de granulats) ont aussi été visitées. Les autres affleurements sont, en majorité, situés dans la partie est des Appalaches (zone interne) et correspondent à des transects le long de routes. Ce sont les carrières qui présentent le meilleur terrain d'étude puisqu'elles offrent, sur un même site, plusieurs faces d'observations régulières et d'orientations variées, ce qui permet un échantillonnage plus complet des différentes familles de fractures en présence. Pour les affleurements, les fractures ont été recensées sous la forme de relevés généraux dans lesquels un maximum de fractures est mesuré. Dans les carrières, des relevés détaillés le long de transects ont été faits. La différence avec le relevé général est qu'ici les espacements entre fractures sont mesurés. Au total, 809 structures qui ont été identifiées lors de ces relevés.

6.2.1.3 Synthèse des données collectées

Au total, 2078 fractures ont été identifiées dans ces relevés (tableau 6.10). Ce total comprend toutefois les structures identifiées à deux reprises dans les 4 puits ré-investiguées lors de la deuxième campagne; ce chiffre diminue à 1904 fractures si seulement les fractures identifiées lors de la deuxième campagne sont considérées pour les puits imagés en double.

Tableau 6.10 : Synthèse du nombre de fractures mesurées (diagraphies et affleurements)

		Diagraphies		**Affleurements**	**Total**
		Campagne du USGS	Campagne de la CGC		
Plateforme du St-Laurent	Nombre de puits / sites	9	4	4	
	Nombre total fractures	**262**	**119**	**164**	**545**
Appalaches - Zone externe	Nombre de puits / sites	6	4	5	
	Nombre total fractures	**318**	**263**	**359**	**940**
Appalaches - Zone interne	Nombre de puits / sites	4	4	8	
	Nombre total fractures	**211**	**117**	**141**	**469**
Montérégiennes	Nombre de puits / sites	2	0	2	
	Nombre total fractures	**74**	**0**	**50**	**124**
Total des données	Nombre de puits / sites	21	12	19	
	Nombre total fractures	**865**	**499**	**714**	**2078**

6.2.2 Étude de l'évolution de la fracturation selon la profondeur

À partir de la localisation des fractures le long des puits, la répartition des fractures a été définie selon la profondeur. L'évolution des valeurs du nombre cumulé de fractures a été tracée en fonction de la profondeur, en utilisant des intervalles de 2 m. Ce nombre a été normalisé afin de comparer entre elles les pentes des courbes de chacun des puits. Une variation de pente sur les

courbes de la figure 6.9 indique un changement de l'espacement entre les fractures, ce qui implique une fréquence de fracturation variable.

La répartition du nombre de fractures selon la profondeur est présentée à la figure 6.9 avec, à gauche, les répartitions pour tous les puits et, à droite, seulement les puits dans lesquels une rupture de pente est visible (profondeur de rupture de pente localisée par les petits cercles).

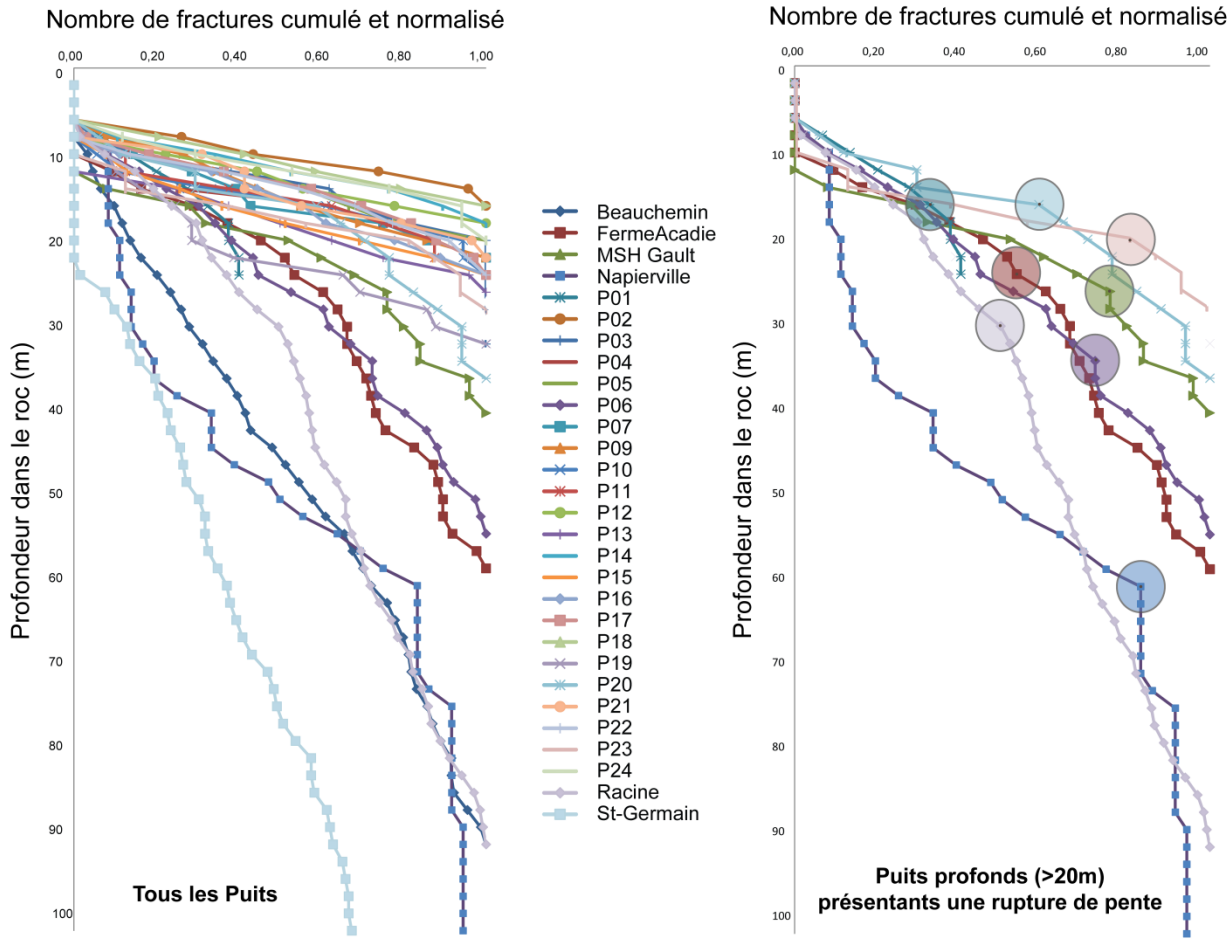


Figure 6.9 : Évolution du nombre cumulé et normalisé de fractures en fonction de la profondeur.

Les puits ne pénètrent généralement le roc que dans les 25 m supérieurs, ce qui peut affecter la fiabilité ou la représentativité de cette répartition du nombre de fractures selon la profondeur. Concernant les puits plus profonds (entre 25 et 100 m) (graphique de droite de la figure 6.9), de nettes variations de la pente sont observées. Dans ces derniers, entre 15 et 35 m, le nombre de fractures diminue progressivement avec la profondeur (augmentation de la pente et donc de l'espacement entre les structures). Sur 10 puits dépassant 25 m de profondeur, cette tendance est observée pour 7 puits (Napierville, Racine, Ferme Acadie, MSH, P06, P20 et P23). Dans les contextes géologiques associés à ces derniers, la majeure partie des fractures serait donc concentrée dans les 15 à 35 m supérieurs du roc. Par contre, sur ces 7 puits, il est difficile de conclure quant à une tendance de répartition des fractures selon la profondeur selon le contexte hydrogéologique (Plate-forme du Saint-Laurent vs Appalaches) étant donné le nombre insuffisant de puits profonds dans chacun des contextes. Ces résultats sont cohérents avec l'évaluation de la conductivité hydraulique *K* dans l'aquifère rocheux régional (section 4.1) ; cette évaluation indiquait une forte diminution de *K* avec la profondeur dans le roc, reliée à la

réduction de la densité de la fracturation avec la profondeur (figure 6.9) puisque la fracturation serait le principal facteur contrôlant *K* dans l'aquifère rocheux et non la lithologie ou le contexte géologique.

6.2.3 Analyse statistique de l'orientation des fractures

6.2.3.1 Méthodologie

Les données de diagraphies acoustiques ont principalement été utilisées pour cette analyse. Ces données permettent d'identifier correctement les fractures dont le pendage est relativement faible mais celles dont le pendage est vertical ou sub-vertical sont moins bien identifiables par des puits verticaux (Priest, 1993). Pour prendre en compte la présence des fractures verticales (peu échantillonnées dans des données de puits), des données d'affleurements visités à l'été 2012 ont également été utilisées. Les résultats de cette campagne ne sont toutefois pas présentés en détail ici (pour des détails, voir Ladevèze et al., 2013). Cependant, les conclusions présentées dans la synthèse des travaux de caractérisation de la fracturation (section suivante) ont été rédigés à la lumière des observations faites sur certains affleurements.

L'analyse statistique concerne les structures qui peuvent potentiellement contribuer à l'écoulement en eau souterraine. Elle concerne donc les structures « ouvertes » observées lors de la campagne de la CGC (catégorie « *Open Continuous & Partial* »; les « *Broken Zone* » ont été retirées de l'analyse puisque leurs orientations ne sont pas toujours fiables), ainsi que toutes les structures observées lors de la première campagne de l'USGS. Lors de cette campagne, toutes les structures imagées ont été catégorisées comme des structures ouvertes puisque la sonde acoustique utilisée était moins performante, impliquant que les structures identifiées devaient être plus massives afin d'être détectées par la sonde.

Les orientations des fractures identifiées ont été corrigées selon la méthode de Terzaghi (1965). Un poids égal à 1/cos(pendage) a été attribué à chaque donnée. Ce poids correspond à l'angle entre la ligne d'échantillonnage (le puits) et le plan de fracture. Une zone noire (« *blind zone* ») de 20° a été appliquée lors de la correction pour limiter la surestimation des structures à fort pendage. Les données brutes et corrigées ont été interprétées en parallèle.

Les orientations de fractures (corrigées par rapport au nord magnétique) sont représentées selon trois types de diagrammes préparés à l'aide du logiciel de stéréographie Stereo32 (Roller et Trepmann, 2011) : 1) pôles, 2) densité de pôles et 3) fréquences des directions. Ces diagrammes ont été générés pour chacun des puits. Une fois les puits comparés entre eux, des familles de fractures communes recoupant les différents puits ont été identifiées. Des regroupements ont donc été faits selon ces caractéristiques communes, ainsi que selon la localisation des forages dans les deux grands domaines structuraux de la Montérégie Est. Les domaines structuraux ont été choisis en fonction de leurs structures géologiques communes. Le premier est la Plate-forme du Saint-Laurent, présentant des formations sédimentaires peu déformées (pendage faible à quasi-nul). La Plate-forme est limitée à l'est par une zone de failles de chevauchement imbriquées, dont la faille la plus à l'est est la Ligne Logan qui sépare la Plate-forme du Saint-Laurent du domaine des Appalaches (comprenant les zones externe et interne de Humber ainsi qu'une petite portion de la partie ouest de la zone de Dunnage). Dans ce dernier, les formations appalachiennes sont venues chevaucher les formations de la Plate-forme du Saint-Laurent lors d'épisodes de déformations intenses : orogénèse taconienne à l'Ordovicien et, par la suite, dans une certaine mesure, lors de l'orogenèse acadienne au Dévonien moyen.

6.2.3.2 Synthèse des travaux et résultats

La figure 6.10 présente une synthèse des analyses réalisées. Ces analyses portent sur les structures considérées ouvertes et qui peuvent ainsi potentiellement permettre un écoulement en eau souterraine. Il faut noter que ces structures ouvertes constituent un faible pourcentage du total des structures observées lors de la deuxième campagne (Crow et al., 2013).

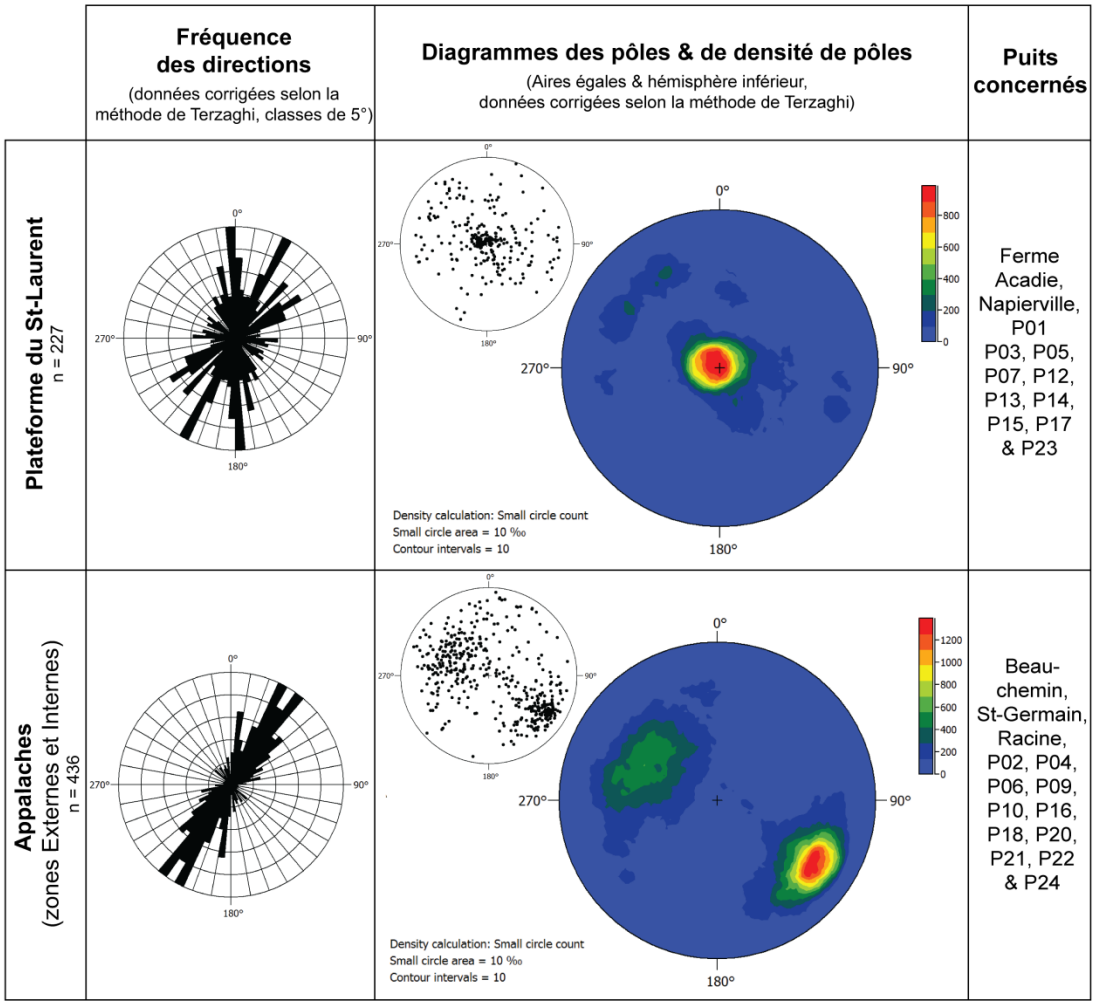


Figure 6.10 : Données de fractures ouvertes observées lors des diagraphies acoustiques

De manière générale, aussi bien pour les puits dans la Plate-forme du St-Laurent que ceux dans les Appalaches, les structures observées sont orientées selon une direction moyenne de N25 (avec un étalement de N340 à N50 selon les secteurs - voir les fréquences de directions dans la figure 6.10). Cette orientation NNE est parallèle aux directions des axes des principales structures géologiques de la région (ex. : synclinal de Chambly-Fortierville dans la Plate-forme du St-Laurent, zone de failles imbriquées à proximité de la ligne Logan ainsi que les plis et failles dans le secteur appalachien).

En ce qui concerne la Plate-forme du Saint-Laurent, une seule famille importante de fractures est identifiée dans les données de puits. Elle correspond à des fractures sub-horizontales avec un pendage pouvant varier de 0 à 22° et orientées en moyenne N30;03SE (voir le diagramme de densité de pôles de la Plate-forme du St-Laurent dans la figure 6.10). En outre, la présence significative de fractures sub-verticales a été notée dans certains affleurements dans la Plate-

forme, notamment à Saint-Hyacinthe (lit de la rivière Yamaska), dans le secteur sud de Montérégie Est (carrière à Saint-Jean-sur-Richelieu) et également dans la région voisine de Châteauguay (au sud de Montréal) (Denis et Rouleau, 1991; Morin et al., 2007). Ceci laisse supposer l'existence d'un réseau de fractures orthogonales : des fractures sub-horizontales, parallèles aux plans de litage, recoupées par des fractures sub-verticales. Cependant, la direction des fractures sub-verticales est relativement peu connue du fait du très faible échantillonnage de ces structures en Montérégie Est. Il est également difficile de dire si une ou plusieurs familles de fractures sub-verticales recoupent les structures sub-horizontales. D'autre part, ces structures orthogonales pourraient être légèrement inclinées, parallèlement aux plans de stratification dans les flancs est et ouest du synclinal de Chambly-Fortierville (comportement observé dans P03 et P12 notamment).

D'autre part, dans les Appalaches, deux familles de fractures se distinguent. La première est orientée en moyenne N33;60NW et prédomine dans le jeu de données. La seconde famille, sous-représentée dans les données, est orientée N23;42SE (voir le diagramme de densité des Appalaches dans la figure 6.10). Ces familles semblent également orientées orthogonalement l'une par rapport à l'autre. Le pendage plus important que dans la Plate-forme du St-Laurent s'explique par l'association de ces fractures aux plis et failles de chevauchement qui ont affectés les formations dans ce secteur. Des variations d'orientations localement importantes ont été observées dans les puits et à l'affleurement. La plus grande diversité d'orientations est retrouvée dans la zone externe où les fractures sont associées à un réseau complexe de nappes de charriage. La zone interne est déformée de façon plus homogène selon un axe NNE.

Ces résultats mettent donc en lumière la présence de deux patrons de fracturation distincts entre la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. Ce schéma de fracturation concerne les fractures qui peuvent potentiellement concourir à l'écoulement d'eau souterraine et donc avoir une implication sur les conditions d'écoulement ou sur l'anisotropie des propriétés hydrauliques. Une synthèse des orientations des plans des principales familles de fractures est représentée de façon schématique à la figure 6.11. Le sous-échantillonnage relatif de certaines familles de fractures (principalement les fractures sub-verticales dans la Plateforme du St-Laurent) peut toutefois engendrer une incertitude quant au schéma présenté.

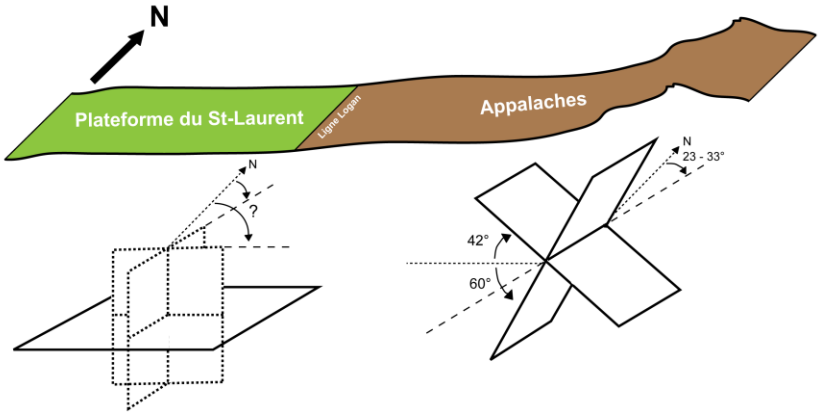


Figure 6.11 : Schématisation de l'orientation des plans des principales familles de fractures observées dans la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches en Montérégie Est

6.3 Estimation de la recharge à partir d'hydrogrammes de puits

La méthode d'estimation de la recharge basée sur les fluctuations d'élévation de la nappe est une méthode couramment utilisée pour l'estimation de la recharge dans les études de

caractérisation hydrogéologique (Healy et Cook, 2002). Cette méthode est attrayante parce qu'elle est simple et facile à appliquer. Cette méthode repose sur l'hypothèse que les hausses du niveau de la surface libre d'un aquifère sont le résultat de flux épisodiques de recharge. Le volume d'eau rechargée, V_R (m^3/m^2), est calculé pour chacune des fluctuations observées de la nappe et correspond au produit de la porosité de drainage de l'aquifère, S_y (m^3/m^3), et de la variation totale du niveau d'eau causée par la recharge, ΔH (m) :

$$V_R = S_y \, \Delta H \qquad [3]$$

La méthode est fortement conditionnée par la porosité de drainage, S_y, ce qui constitue une limitation majeure car une incertitude importante est habituellement associée à la détermination d'une valeur représentative de S_y (Healy et Cook, 2002 ; Healy, 2010). Ceci est d'autant plus vrai lorsque la nappe régionale est située dans le roc fracturé. De plus, la méthode permet d'estimer seulement la recharge qui est attribuable à des événements épisodiques de forte intensité. Les événements de recharge diffus de faible intensité sont difficilement pris en compte. Ceci peut entraîner une sous-estimation de la recharge annuelle. A l'inverse, puisque la méthode ne fait pas de lien entre les précipitations et les variations du niveau d'eau dans le puits, une surestimation pourrait être introduite dans les estimations si d'autres phénomènes naturels que la recharge agissent de façon parallèle sur la variation des niveaux d'eau (ex: un apport saisonnier en eaux souterraines provenant d'une région adjacente ayant une élévation plus importante). Il est donc important de bien connaître et de tenir compte des conditions hydrogéologiques et climatiques au site étudié et d'obtenir une estimation fiable du S_y afin d'obtenir une estimation de la recharge représentative.

Une approche moins conventionnelle présentant un potentiel très intéressant pour l'estimation de la recharge consiste à caler les paramètres d'un bilan hydrique quotidien de surface avec des mesures de niveaux d'eau d'un aquifère à nappe libre. Cette approche a récemment été utilisée par Baaloosha (2005) et Lefebvre et al. (2011), qui ont subséquemment amélioré la méthode et l'ont adaptée pour le climat tempéré du Québec méridional. Ces deux approches sont utilisées dans le cadre des travaux de doctorat de Jean-Sébastien Gosselin sur l'estimation de la recharge distribuée. De plus, une méthode novatrice pour estimer le paramètre S_y a été développée et est présentée ci-dessous. Ces travaux étant en cours, seul un exemple d'interprétation est présenté ici, celui du puits d'observation P19 (Rougemont), qui a été abondamment instrumenté. Au total, une quarantaine d'hydrogrammes de puits sont disponibles, mais seulement 23 ont été classés comme étant en conditions libres.

La recharge à ce site a été estimée sur une base journalière en combinant des mesures de niveau d'eau, des mesures de flux d'infiltration acquises avec un lysimètre à contrôle passif et des données météorologiques (températures de l'air et précipitations totales). Le taux de récession de la nappe a été déterminé directement à partir de l'hydrogramme de puits. Un modèle de la distribution de la porosité de drainage de l'aquifère en fonction de la profondeur par rapport à la surface du sol a été défini en comparant les données du lysimètre avec les fluctuations du niveau d'eau dans le puits. Le modèle de porosité de drainage et l'estimation du taux de récession ont par la suite été utilisés pour définir un modèle de bilan en eau de l'aquifère. Parallèlement, un bilan hydrologique de surface basé sur les données météorologiques a été utilisé pour produire des estimations journalières de la recharge. Ces valeurs de recharge ont été substituées dans le modèle de bilan en eau de l'aquifère afin de produire un hydrogramme de puits synthétique. L'hydrogramme synthétique a par la suite été comparé à l'hydrogramme mesuré et les paramètres du bilan hydrologique de surface ont été calés rétroactivement.

La recharge a pu être estimée pour la période allant du 1er janvier 2000 au 31 décembre 2012 avec le bilan hydrologique de surface ajusté aux données de niveau d'eau. Ces estimations de

recharge ont été comparées avec les mesures directes du flux d'infiltration acquises avec le lysimètre et avec les résultats du modèle hydrologique HELP (section 4.3).

6.3.1 Description du site de Rougemont (P19)

Le puits d'observation P19 est localisé au sud du Mont Rougemont, dans un champ en jachère en bordure d'une région boisée constituée majoritairement de feuillus (figure 6.12). L'altitude au puits P19 est de 130 m au-dessus du niveau de la mer.



Figure 6.12 : Photographie du puits P19 (Rougemont)

D'après la carte des dépôts du Quaternaire (livrable 12), les dépôts meubles des environs sont constitués de sédiments littoraux et pré-littoraux. Ces données sont cohérentes avec le rapport de forage (annexe 4) qui indique un roc indifférencié recouvert d'une couche d'environ 3 m d'épaisseur de sable graveleux.

La station météorologique active la plus près de P19 est celle de Marieville (station 7024627), située à une distance d'environ 10.1 km et à une altitude de 38 m. Toutefois, un pluviomètre pouvant mesurer les précipitations liquides (pluie) a également été installé à ce site ; les données mensuelles sans neige montrent une bonne corrélation avec cette station, malgré la distance et la différence d'élévation. Un lysimètre à contrôle passif mesurant le flux d'infiltration de l'eau à travers la zone non saturée des dépôts meubles a aussi été installé à une distance ~ 140 m du puits (figure 6.13). Sur la figure 6.13, le point rouge correspond à la localisation du puits P19 et le point vert correspond à la localisation du lysimètre.

6.3.2 Données utilisées

6.3.2.1 Niveau d'eau et données météorologiques

Le puits P19 est un puits ouvert dans la partie rocheuse à partir d'une profondeur de 5 m sous la surface du sol jusqu'à 30.5 m. Des mesures de niveau d'eau acquises à une fréquence de 6 h sont disponibles pour la période allant du 20 novembre 2010 au 27 novembre 2012. Les données météorologiques journalières (températures maximale, minimale et moyenne ainsi que les accumulations sous forme de pluie et de neige) de la station météorologique de Marieville ont été récupérées sur le site d'Environnement Canada pour la période allant du 1er janvier 2000 au 31 décembre 2012. Les données manquantes ont été comblées par un modèle de régression linéaire avec les stations avoisinantes les mieux corrélées.



Figure 6.13 : Photo aérienne du site P19 (Rougemont)

Les données météorologiques (températures et précipitations) et les mesures de niveau d'eau ont été compilées et tracées sur un même graphique (figure 6.14). Suite au forage, une période d'environ 2 mois a été nécessaire pour que le niveau d'eau dans le puits atteigne à nouveau un état d'équilibre avec le niveau de la nappe locale. Cette réponse lente du niveau d'eau dans le puits indique une faible conductivité hydraulique du roc. Cette observation est cohérente avec le fait que la conductivité du puits est inférieure à la limite de détection des essais de perméabilité (*slug tests*) qui ont été réalisés dans ce puits. Cette faible conductivité hydraulique a pour effet d'atténuer les variations du niveau d'eau dans le puits par rapport à celles de la nappe environnante. Cette atténuation est visible sur l'hydrogramme de la figure 6.14 qui ne présente pas de variations brusques malgré la présence de dépôts meubles très perméables en surface.

6.3.2.2 Flux d'infiltration

Des données de flux d'infiltration acquises avec le lysimètre à contrôle passif sont disponibles pour la période allant du 2 juin 2011 au 27 novembre 2012 à une fréquence de 15 minutes. Les mesures du flux d'infiltration de même que les données météorologiques sont présentées sur la figure 6.15 sur une base hebdomadaire. Sur la figure 6.15, les flux d'infiltration hebdomadaires occupent le graphique du bas (vert) et les précipitations totales (pluie en bleu et neige en gris) et températures (rouge) hebdomadaires sont illustrées au-dessus.

6.3.3 Méthodologie

6.3.3.1 Modélisation de la courbe de récession de l'aquifère

La récession d'une nappe libre correspond à l'évolution dans le temps du niveau d'eau durant les périodes où la recharge est négligeable. De façon générale, la récession est représentée mathématiquement par une fonction unique de type linéaire ou exponentielle décroissante appelée courbe maîtresse de récession (CMR). La CMR est une représentation moyenne de l'ensemble des segments des courbes de récession observées sur un hydrogramme de puits. La variabilité saisonnière ou semi-annuelle de la récession des aquifères n'est ainsi généralement pas prise en compte dans les modèles, malgré qu'un contraste important puisse exister entre les périodes estivale et hivernale (Tallaksen, 1995). Au Québec, il est difficile d'interpréter la récession des aquifères durant la période hivernale en raison des épisodes de fonte qui sont souvent observées durant l'hiver. Plusieurs méthodes ont été développées pour la détermination automatique d'une CMR à partir d'un hydrogramme de puits (Crosbie et al., 2005; Posavec, 2006; Heppner et Nimmo, 2005). La suite de cette section porte sur l'approche qui a été utilisée pour la détermination d'une CMR pour le puits P19.

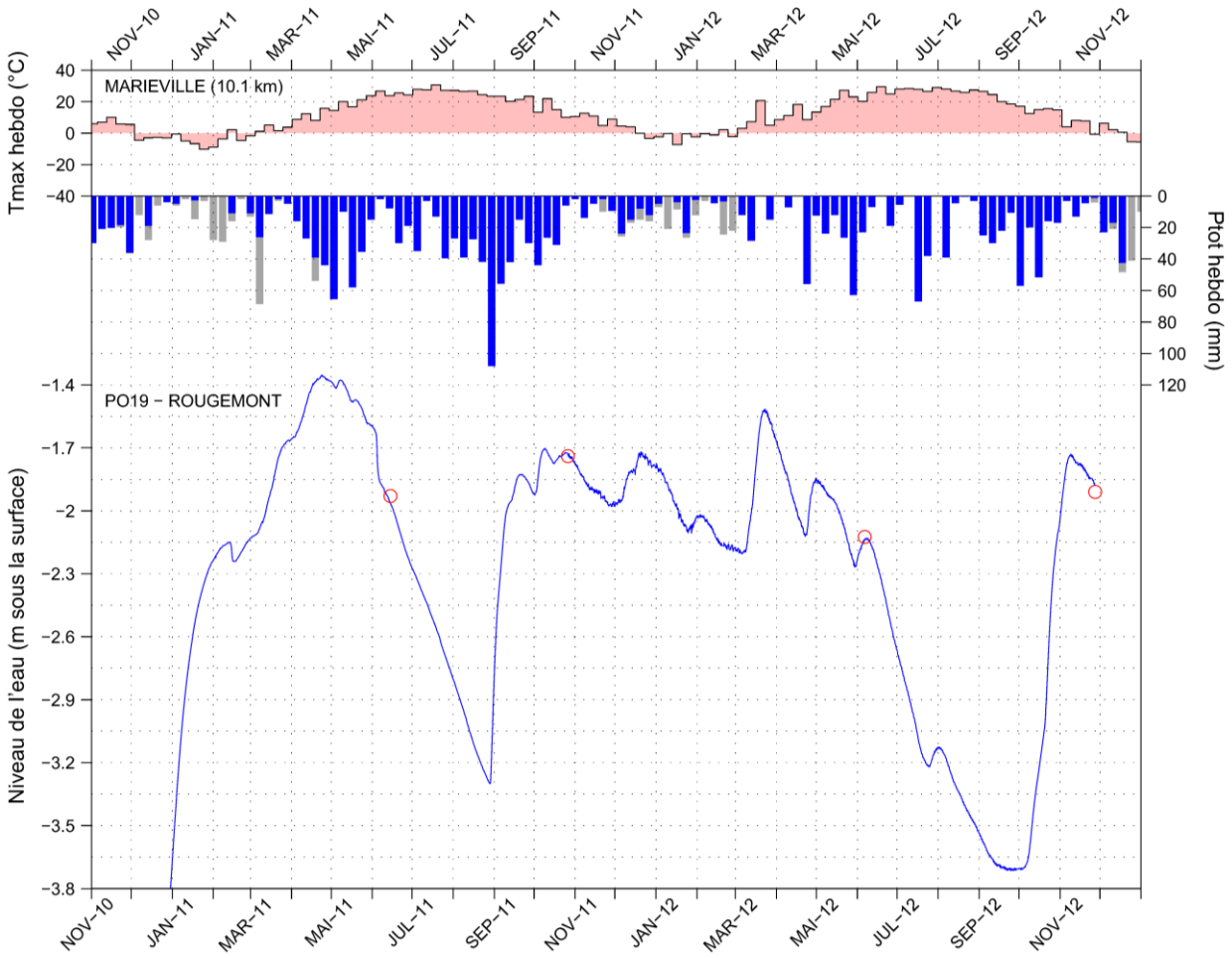


Figure 6.14 : Données météorologiques (température et précipitations) et mesures de niveau d'eau compilées pour le puits P19 situé à Rougemont

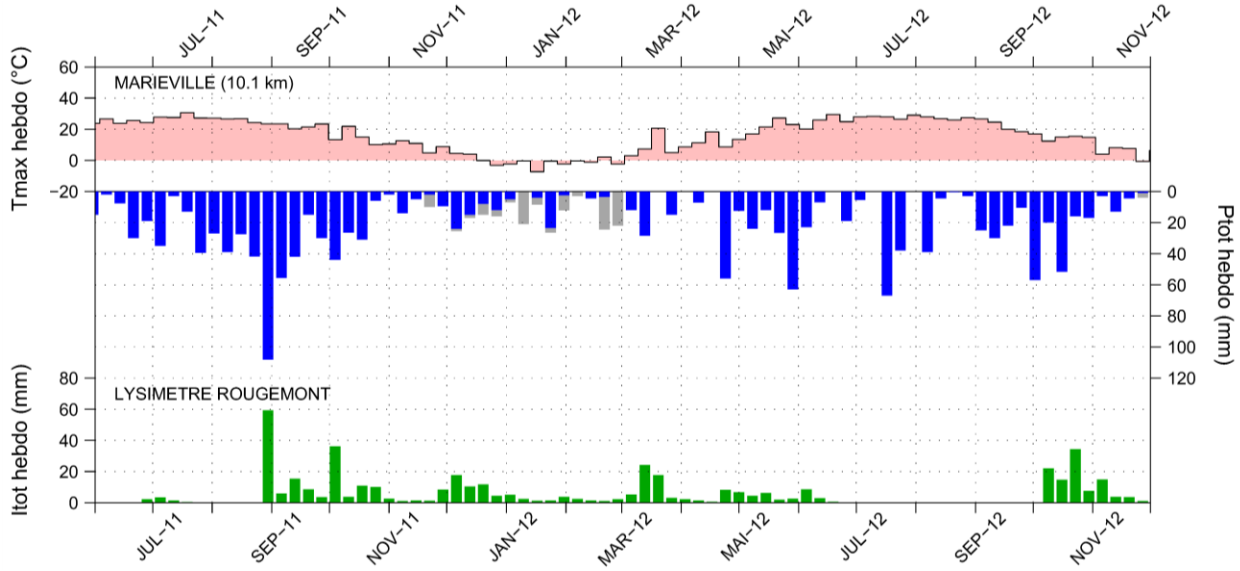


Figure 6.15 : Données météorologiques et flux d'infiltration compilés pour le lysimètre situé à Rougemont près du puits P19

On observe sur l'hydrogramme du puits P19 une récession qui est de type linéaire. La variation du niveau d'eau en période de récession peut alors être représentée par l'équation 6.3 suivante:

$$\frac{dh}{dt} = -D \qquad \text{où} \qquad D \geq 0 \qquad 6.3$$

où h est le niveau d'eau et *D* (m/s) est une constante correspondant au taux de récession de l'aquifère dont la valeur est déterminée par calage. Le calage requiert d'abord une identification manuelle des périodes de récession sur l'hydrogramme de puits. Pour l'ensemble des segments de récession identifiés, les niveaux d'eau de l'aquifère sont simulés à partir d'une discrétisation numérique de l'équation 6.3. Le taux de récession est enfin déterminé de façon à minimiser l'erreur absolue entre les niveaux d'eau mesurés et simulés pour l'ensemble des périodes de récession. Cette procédure d'optimisation est réalisée de façon automatisée dans Matlab.

6.3.3.2 Estimation de la porosité de drainage de l'aquifère

Il est connu que l'estimation de la porosité de drainage des aquifères est délicate et difficile (Healy et Cook, 2002; Delin et al., 2007; Healy, 2010). Ceci est attribuable, entre autres, au fait que les mesures de niveau d'eau dans les puits sont influencées par des fluctuations de la nappe sur une superficie allant de plusieurs mètres à plusieurs centaines de mètres carrés (Healy et Cook, 2002). La porosité de drainage est autrement dit une propriété de l'aquifère qui représente une valeur intégrée à l'intérieur d'un grand volume. Il en résulte que des valeurs mesurées sur des échantillons de sol en laboratoire ne sont pas nécessairement représentatives de la porosité de drainage de l'aquifère car ces mesures ne permettent pas de tenir compte de l'hétérogénéité spatiale du milieu. S_y peut également être estimé à l'aide d'essais de pompage à long terme, mais ceux-ci sont rarement disponibles et, même quand ils le sont, l'interprétation de ce paramètre n'est pas toujours facile.

La porosité de drainage est un paramètre qui doit donc souvent être déduit directement de l'interprétation de l'hydrogramme de puits. La valeur qui est attribuée à S_y, tel que mentionné précédemment, a un impact majeur sur les estimations de la recharge, particulièrement pour les méthodes basées uniquement sur les fluctuations du niveau de la nappe. Lorsque des valeurs de S_y sont sélectionnées uniquement sur la base de la nature des dépôts meubles, la plage des valeurs théoriques plausibles de S_y est si grande que les estimations de recharge n'ont plus aucune signification. Healy et Cook (2002) ont fait une revue exhaustive de la théorie relative à la porosité de drainage. Ils présentent également quelques méthodes pouvant être utilisées pour l'estimation d'une porosité de drainage représentative à l'échelle de l'aquifère à caractériser.

Pour le site P19, les données du lysimètre ont été utilisées conjointement avec l'hydrogramme de puits pour définir un modèle de la distribution verticale de S_y. Pour ce faire, pour chaque jour de la période couverte par les données où le flux d'infiltration était non nul et où la variation du niveau d'eau dans le puits était positive, une valeur de la porosité de drainage de l'aquifère a été calculée à partir de la relation suivante:

$$S_y = \frac{Re}{\Delta h - D\,\Delta t} \qquad \text{pour tout } \Delta h > 0 \text{ et } Re > 0 \qquad 6.4$$

où S_y est la porosité de drainage de l'aquifère, *Re* (m) est la recharge totale journalière, Δh (m) est la variation journalière du niveau d'eau, *D* (m/jour) est le taux de récession en et Δt (jour) est la période sur laquelle le calcul est effectué, soit 1 jour.

6.3.3.3 Bilan hydrologique de surface

À partir des données de la température atmosphérique moyenne et des précipitations totales journalières, il est possible de construire un bilan hydrologique de surface pour toute la période sur laquelle des données météorologiques sont disponibles, soit du 1er janvier 2000 au 31 décembre 2012. Le bilan hydrologique de surface est défini tel que:

$$Re = P_d - Ru - ET_r \qquad 6.5$$

où P_d correspond aux précipitations totales disponibles, *Ru* au ruissellement de surface, *Re* à la recharge à la nappe et Et_r à l'évapotranspiration réelle. Les unités de l'ensemble des variables de l'équation 6.5 sont en mètre (m^3/m^2).

Durant la période estivale, P_d correspond directement aux précipitations tombant sous forme de pluie. Durant la période hivernale, P_d est calculé à partir d'un modèle de stockage et de fonte de la neige qui est fonction de la température moyenne de l'air. Le ruissellement, *Ru*, est calculé pour chaque jour comme un rapport constant des précipitations disponibles, tel que $Ru = C_{ru}*P_d$, où C_{ru} est le coefficient de ruissellement supposé constant dans le temps. L'évapotranspiration réelle, ET_r, est calculée à partir d'une modélisation de la réserve utile en eau disponible pour les plantes et de l'évapotranspiration potentielle journalière, ET_p, calculée avec la méthode de Thornthwaite. La recharge, *Re*, est la résultante du bilan et correspond à la quantité d'eau qui parvient à traverser la zone racinaire et à atteindre la nappe.

La recharge journalière ainsi calculée peut par la suite être substituée dans un modèle du bilan en eau de l'aquifère afin de produire un hydrogramme de puits synthétique pouvant être comparé avec l'hydrogramme mesuré :

$$\int_{h1}^{h2} S_y \, dh = Re - D \, \Delta t \qquad 6.6$$

où *h* (m) est le niveau d'eau en m, $S_y(h)$ est la porosité de drainage de l'aquifère qui varie en fonction de *h*, *Re* (m) est la recharge journalière, *D* (m/jour) est le taux de récession de l'aquifère, Δt (jour) est le pas de discrétisation numérique, soit 1 jour, *h1* (m) est le niveau d'eau initial et *h2* (m) est le niveau d'eau après que la recharge et la récession aient été prises en compte à la fin de la journée. Le seul inconnu de l'équation 6.6 est *h2*.

L'hydrogramme synthétique produit à partir de l'équation 6.6 est ensuite comparé avec l'hydrogramme mesuré afin de caler les paramètres du bilan hydrologique de surface (équation 6.5). Les résultats du calage sont présentés dans la section suivante.

6.3.4 Résultats pour le site P19 (Rougemont)

6.3.4.1 Modélisation de la récession de *la nappe*

La valeur du taux de récession obtenue par calage est de 17.3 mm/jour. Le résultat du calage est présenté à la figure 6.16. Sur la figure, la ligne bleue correspond aux niveaux d'eau enregistrés alors que les lignes rouges correspondent au niveau d'eau simulé d'après le modèle de récession présenté à l'équation 6.3. La correspondance relativement bonne entre les niveaux d'eau mesurés et simulés durant les périodes de récession supporte l'hypothèse que la récession de l'aquifère a un comportement linéaire qui est indépendant du niveau d'eau de l'aquifère. Une certaine variabilité du taux de récession est néanmoins observée entre les années 2011 et 2012.

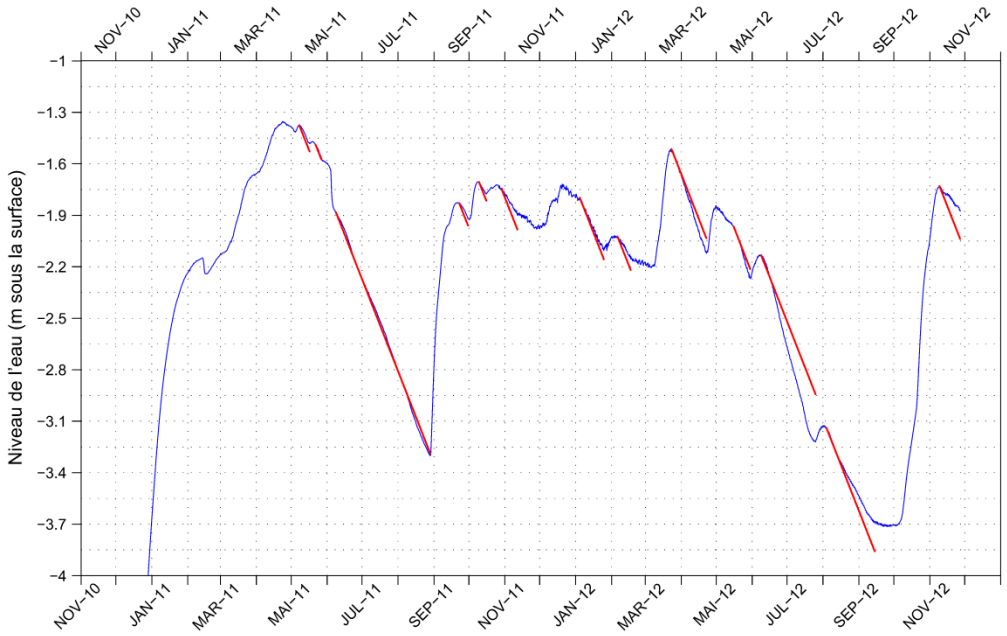


Figure 6.16 : Modélisation de la récession de la nappe à partir de l'hydrogramme du puits P19

6.3.4.2 Estimation de la porosité de drainage de l'aquifère

Sur l'hydrogramme du puits P19, les variations de niveau d'eau causées par la recharge sont beaucoup plus importantes sous une profondeur d'environ 2.3 m. Le rapport de forage indique également que le toit du roc serait à environ 3 m sous la surface du sol. Ces observations suggèrent la présence d'une zone de transition (interface roc-sable) située entre 2 et 3 m de profondeur sous la surface du sol. La porosité de drainage du roc pouvant être de 10 à 30 fois inférieure à celle du sable, cela pourrait expliquer le contraste observé entre le comportement du niveau d'eau dans la partie inférieure de l'hydrogramme et celui dans la partie supérieure.

Afin d'investiguer d'avantage ce phénomène, des valeurs de porosité de drainage ont été calculées avec les mesures de flux d'infiltration du lysimètre et les mesures de niveau d'eau dans le puits (équation 6.4). Les estimations ainsi obtenues de S_y sont tracées en fonction de la profondeur par rapport à la surface du sol à la figure 6.17. Ce graphique illustre bien la variabilité de la porosité de drainage de l'aquifère avec la profondeur. En outre, la figure 6.17 montre une brisure nette au niveau de la distribution des valeurs de S_y à une profondeur d'environ 2.15 m sous la surface du sol. Sous 2.15 m, la porosité de drainage semble relativement stable autour de 0.02, ce qui est une valeur plausible pour un roc fracturé. En haut de 2.15 m, la porosité de drainage semble augmenter graduellement vers la surface du sol.

À partir de ces observations et de la géologie du roc et du quaternaire à ce site, un modèle conceptuel de la distribution de S_y avec la profondeur a été formulé (ligne rouge sur la figure 6.17). Sous une profondeur de 2.15 m, on suppose un roc fracturé homogène avec un S_y constant. Au-dessus de cette profondeur, on retrouve une zone de transition constituée de sable et de roc altéré caractérisée par un S_y qui augmente graduellement avec la diminution de la profondeur jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0.26. Cette valeur maximale correspond à la porosité de drainage des dépôts de sable graveleux de l'unité de sol défini à cette localisation dans la base des données pédologiques de l'IRDA.

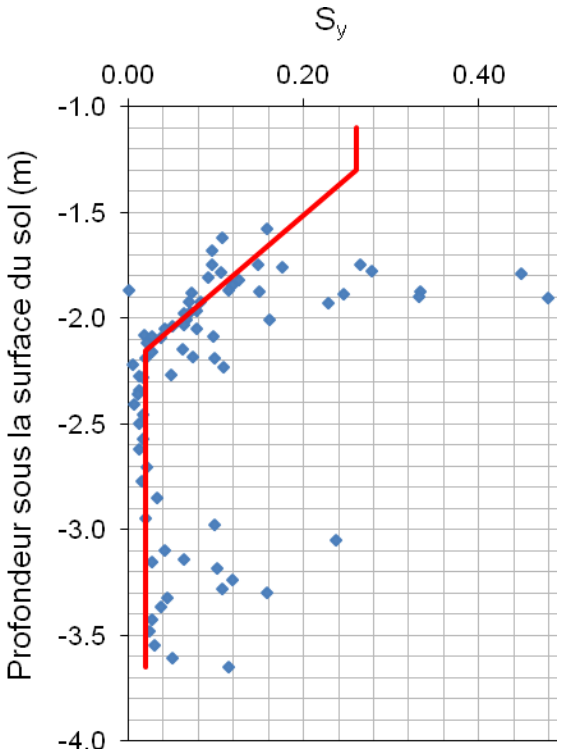


Figure 6.17 : Porosité de drainage de l'aquifère, S_y, en fonction de la profondeur par rapport à la surface du sol

Afin de valider et de raffiner ce modèle conceptuel de $S_y(h)$, le flux d'infiltration mesuré par le lysimètre a été converti en un hydrogramme de puits synthétique grâce au modèle de bilan en eau (équation 6.6). La recharge journalière a été supposée égale au flux d'infiltration mesuré avec le lysimètre et la distribution de $S_y(h)$ a été représentée par le modèle conceptuel défini au paragraphe précédent. La porosité de drainage du roc et la profondeur à laquelle la porosité de drainage atteint la valeur maximale de 0.26 ont été calées de façon à minimiser la somme des erreurs au carré entre l'hydrogramme de puits synthétique et l'hydrogramme mesuré *in situ*. L'hydrogramme de puits synthétique final obtenu au terme du calage est tracé et comparé à l'hydrogramme mesuré sur la figure 6.18. Le modèle final de $S_y(h)$ obtenu est tracé en rouge sur le graphique de la figure 6.17 et est défini par les équations suivantes:

$$S_y = 0.26 \quad \text{pour} \quad h \geq -1.3\ \text{m} \qquad \text{6.7a}$$

$$S_y = \frac{0.26 - 0.02}{2.15 - 1.3}(h + 2.15) + 0.02 \quad \text{pour} \quad -2.15\ \text{m} < h < -1.3\ \text{m} \qquad \text{6.7b}$$

$$S_y = 0.02 \quad \text{pour} \quad h \leq -2.15\ \text{m} \qquad \text{6.7c}$$

Un hydrogramme synthétique produit en considérant un milieu parfaitement homogène est également présenté sur la figure 6.18 afin de montrer l'amélioration apportée par le modèle de $S_y(h)$ sur la reproduction des niveaux d'eau. La valeur de la porosité de drainage utilisée est de 0.053 pour le modèle homogène. Cette valeur a été déterminée par calage avec l'hydrogramme mesuré. Il est à noter que ces résultats sont préliminaires. Un travail d'analyse plus poussé sera nécessaire afin d'expliquer certaines anomalies retrouvées, entre autres, dans les résultats présentés à la figure 6.17.

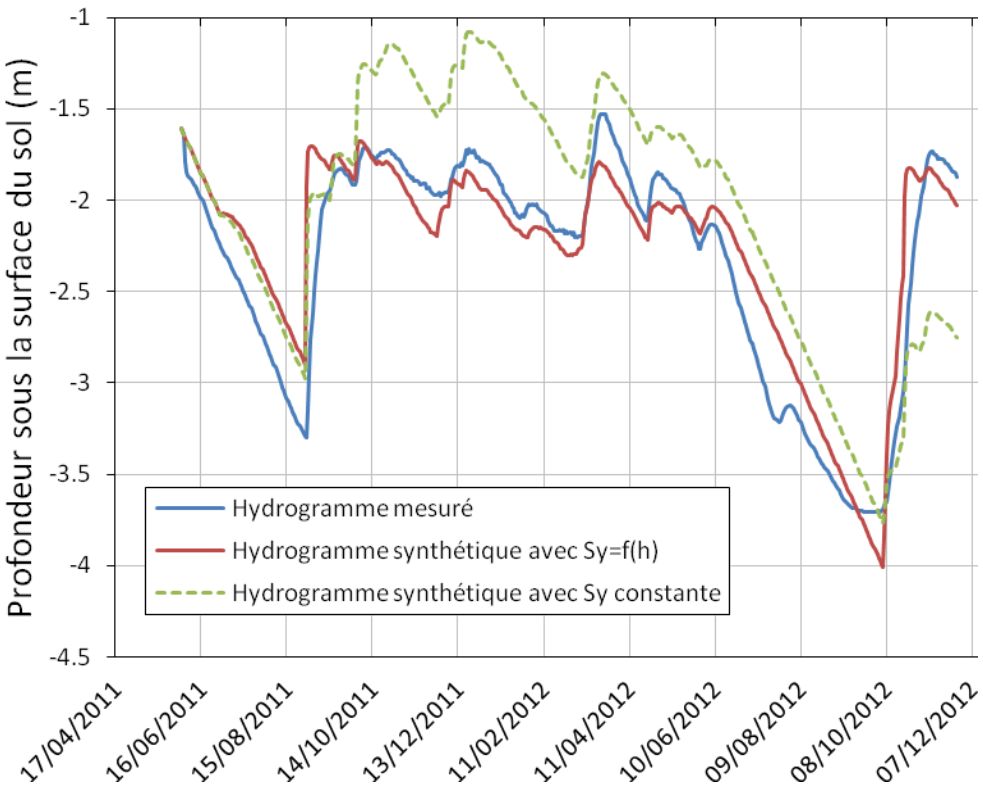


Figure 6.18 : Comparaison entre l'hydrogramme de puits mesuré (bleu) et les hydrogrammes de puits synthétiques produits à partir des données du lysimètre

6.3.4.3 Bilan hydrologique de surface

Les graphiques de la figure 6.19 présentent l'hydrogramme de puits synthétique produit à partir du bilan hydrologique de surface quotidien (équation 6.5) suite au calage du coefficient de ruissellement et du volume d'eau maximal disponible pour évapotranspiration. La valeur optimale du coefficient de ruissellement est de 0.14 alors qu'elle est de 56 mm pour le volume d'eau maximal disponible pour évapotranspiration.

Le calage a été réalisé de façon à maximiser le coefficient de corrélation linéaire entre les niveaux d'eau simulés et ceux mesurés. Le modèle de $S_y(h)$ et le taux de récession de l'aquifère définis aux sections précédentes ont été utilisés directement pour produire l'hydrogramme synthétique à partir du bilan hydrologique de surface (équation 6.6).

Le tableau 6.11 présente les résultats obtenus sur une base annuelle avec le bilan hydrologique de surface ajusté aux niveaux d'eau mesurés pour la période allant du 1er janvier 2000 au 31 décembre 2012 (*Re* est la recharge, *Ru* le ruissellement de surface, ET_r l'évapotranspiration réelle et *P* correspond aux précipitations annuelles totales).

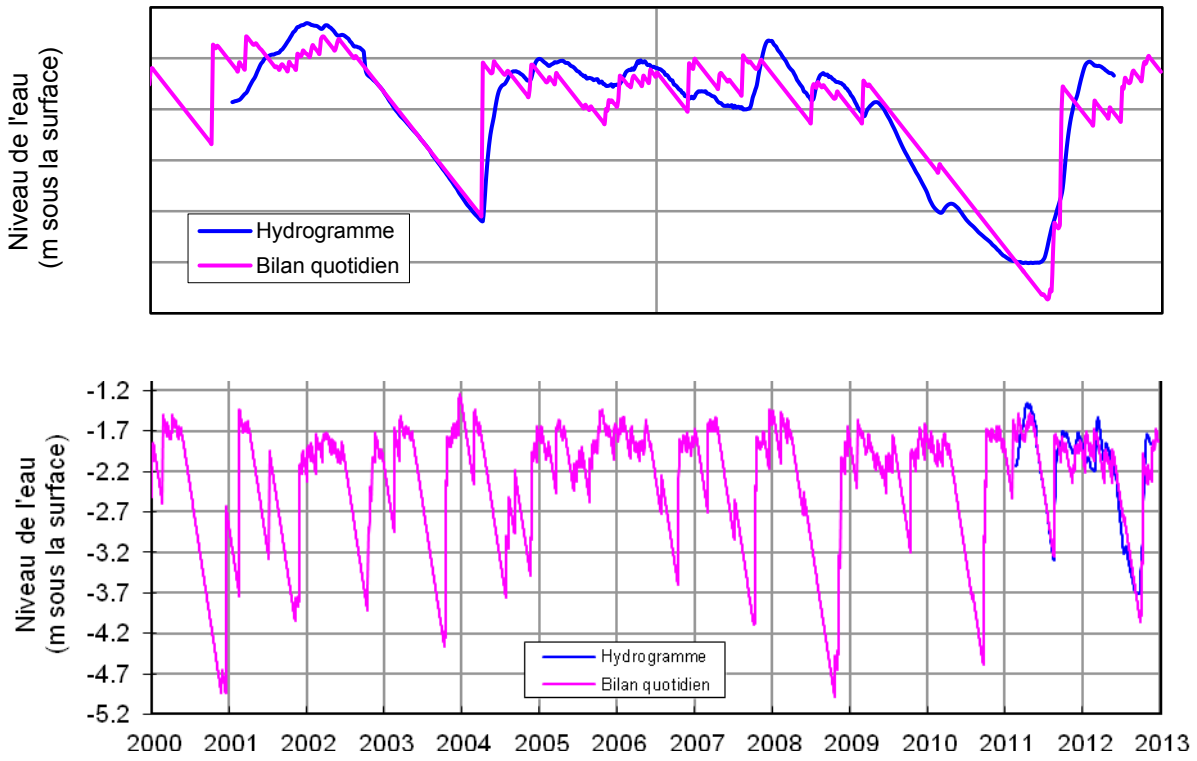


Figure 6.19 : Hydrogramme de puits synthétique produit avec la méthode des bilans (rose) et hydrogramme mesuré au puits P19 (bleu) pour la période où des données de niveaux d'eau sont disponibles (haut) et la période où des données météorologiques sont disponibles (bas)

Tableau 6.11 : Bilan hydrologique de surface ajusté aux niveaux d'eau mesurés sur une base annuelle de 2000 à 2012 au site P19

Année	*Re* (mm/an)	*Ru* (mm/an)	ET_r (mm/an)	*P* (mm/an)	Rapport *Re*/*P*
2000	385	153	555	1144	34%
2001	308	130	490	897	34%
2002	395	140	464	996	40%
2003	595	173	465	1217	49%
2004	290	136	543	980	30%
2005	613	195	587	1383	44%
2006	505	175	569	1252	40%
2007	475	165	536	1175	40%
2008	373	155	577	1105	34%
2009	418	160	564	1150	36%
2010	404	160	578	1133	36%
2011	548	179	554	1284	43%
2012	332	135	495	1010	33%
Moyenne	**434**	**158**	**537**	**1133**	**38%**

6.3.4.4 Comparaison des valeurs de recharge obtenues avec différentes méthodes

Selon le tableau 6.11, la recharge estimée au site du puits P19 avec la méthode du bilan hydrologique quotidien est en moyenne de 434 mm par année, ce qui correspond environ à 38% des précipitations totales. Ce résultat semble représentatif, considérant que la conductivité hydraulique des dépôts meubles à ce site est très élevée. Les faibles valeurs de ruissellement de surface obtenues sont également cohérentes avec le fait que la conductivité des dépôts meubles est très élevées.

Le tableau 6.12 présente une comparaison entre l'estimation de la recharge obtenue avec la méthode du bilan hydrologique et la mesure directe du flux d'infiltration avec le lysimètre pour la période allant du 2 juin 2011 au 27 novembre 2012 (période sur laquelle des données de lysimètre étaient disponibles). Les résultats obtenus sont très similaires.

Tableau 6.12 : Comparaison entre la recharge mesurée avec le lysimètre et celle estimée avec le bilan hydrologique de surface au site P19

Période	Précipitations totales (*P*) (mm/an)	*Re* (mm/an) (lysimètre)	*Re* (mm/an) (bilan hydrique)
juin 2011 à novembre 2012 (18 mois)	1620	438 (27% de *P*)	455 (28% de *P*)

La comparaison des résultats obtenus avec le bilan hydrologique et ceux obtenus du modèle HELP (section 4.4) est moins pertinente compte tenu des quantités pouvant être comparées. Premièrement, la recharge estimée avec HELP correspond en réalité au flux d'eau souterraine s'écoulant de la surface vers le roc alors que la recharge estimée avec le bilan hydrologique de surface correspond au flux d'eau souterraine atteignant la nappe à surface libre de l'aquifère. Afin de comparer deux quantités qui soient similaires, la somme de la recharge au roc et du drainage latéral associé aux couches entre le roc et la surface de la nappe calculés dans HELP a été utilisée afin d'obtenir une valeur qui se rapproche de l'infiltration d'eau atteignant la nappe. De plus, il faut souligner le fait que le modèle HELP a été obtenu en utilisant des cellules représentatives des conditions régionales (250 x 250 m) obtenues des cartes disponibles et des interpolations effectuées pour l'ensemble de la région d'étude. Les variations locales ou ponctuelles ne peuvent donc pas être prises en compte par HELP, contrairement à la méthode basée sur l'hydrogramme de puits.

Par exemple, en raison de la méthode utilisée pour construire les profils typiques des dépôts meubles qui ont servi dans HELP, une mince couche d'argile a été interpolée sous les sédiments littoraux et pré-littoraux. Cette couche argileuse est en réalité un artéfact découlant de la procédure d'interpolation et ne devrait pas être présente en réalité au site du P19. Cela a un impact important sur les estimations de la recharge obtenues avec HELP dans les zones où des unités quaternaires de types littoraux et pré-littoraux ceinturent les monts Saint-Hilaire et Rougemont. La figure 6.20 présente la distribution de la recharge annuelle moyenne sur 32 ans calculée avec HELP dans les environs du mont Rougemont et Saint-Hilaire. Sur la figure, les unités quaternaires de type littoral et pré-littoral sont délimitées par un contour noir et la flèche noire indique l'emplacement du puits P19.

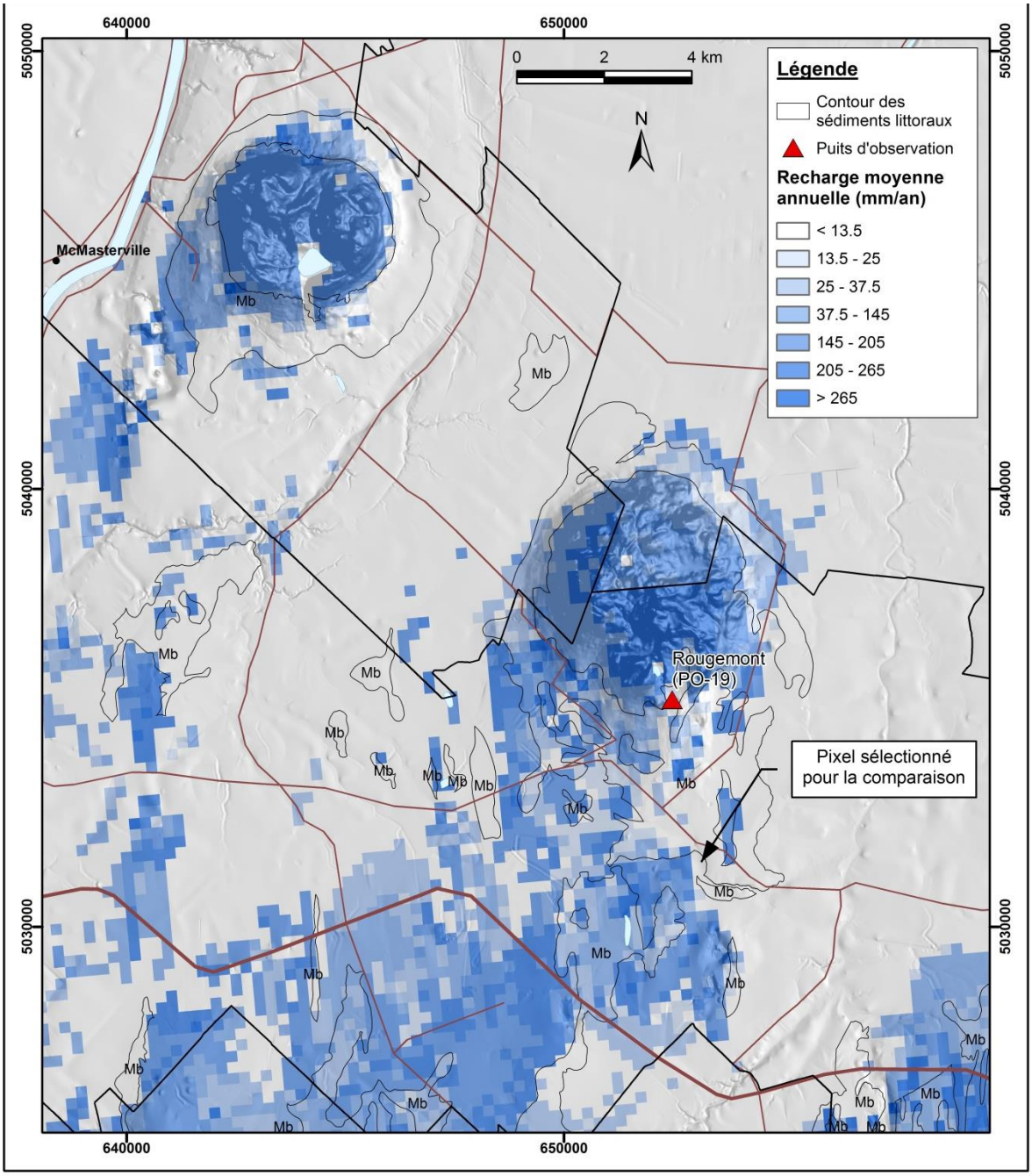


Figure 6.20 : Recharge annuelle moyenne estimée avec HELP pour la période 1979-2010 dans les environs du mont Rougemont (en bas à droite) et du mont Saint-Hilaire (en haut à gauche)

En raison de la conductivité hydraulique élevée des dépôts littoraux et pré-littoraux reposant directement sur le roc au site du P19, on devrait retrouver à cet endroit une recharge au roc plus importante que les résultats obtenus avec HELP. En effet, les essais au perméamètre de Guelph effectués à ce site montraient des valeurs particulièrement élevées de conductivité hydraulique en surface. Les faibles valeurs de recharge estimées avec HELP sont donc attribuables à la présence d'argile (résultant de l'interpolation régionale) sous le sable graveleux qui restreint la recharge au roc. Afin de contourner ce problème dans le cadre de la comparaison des estimés de recharge, une cellule située dans un contexte similaire mais ne présentant pas d'argile sous l'unité sableuse a été sélectionnée pour la comparaison. À noter

que les dépôts meubles pour cette cellule sont environ 8-10 m plus épais qu'au site du puits P19. Les résultats sont comparés au tableau 6.13. Les résultats indiqués pour HELP correspondent à des moyennes annuelles des composantes du bilan hydrologique sur une période de 32 ans, soit de 1979 à 2010, alors que les résultats présentés pour le bilan hydrologique correspondent à des moyennes annuelles sur 12 ans (2000 à 2012). De façon générale, les estimations de la recharge obtenues avec les deux méthodes sont cohérentes. Une analyse plus poussée de ces résultats sera faite dans les mois à venir.

Tableau 6.13 : Comparaison des valeurs de recharge estimées avec HELP et le bilan hydrologique de surface pour une cellule située à environ 1.2 km du puits P19

Méthode	*Re* (mm/an)	*Ru* (mm/an)	ET_r (mm/an)	*P* (mm/an)	Rapport *Re*/*P*
HELP	372	270	452	1 094	34%
Bilan hydrologique	434	158	537	1 133	38%

6.4 Modélisation numérique hydrogéologique

6.4.1 Objectifs

Les objectifs visés par la modélisation hydrogéologique sont multiples, bien qu'ils cherchent tous, dans l'ensemble, à affiner la compréhension de la dynamique du système aquifère (SA) actif dans la région à l'étude. Or, plusieurs observations indiquent que le SA n'est pas entièrement à l'équilibre avec les conditions actuelles. Par conséquent, la modélisation doit considérer l'évolution de la dynamique du SA au cours des temps géologiques récents, c'est- à - dire depuis le dernier maximum glaciaire, en vue d'expliquer les particularités de son état actuel. Parmi cet historique, l'influence des mers postglaciaires est particulièrement intéressante.

6.4.2 Approche générale

Devant l'envergure de tels travaux, une approche exploratoire est préférée à une approche de caractérisation détaillée. Ainsi, la modélisation hydrogéologique du SA, tant conceptuelle que numérique, est d'abord développée en coupes verticales bidimensionnelles (2Dxz). De même, l'assignation des propriétés et des conditions aux limites du modèle numérique demeure assez conceptuelle (simplifiée, idéalisée). De cette façon, les résultats des simulations d'écoulement comme de transport de masse s'interprètent facilement et renseignent plus directement sur l'influence des paramètres assignés au modèle numérique.

6.4.3 Construction conceptuelle

Localisation

Tout d'abord, un modèle conceptuel 2Dxz à l'échelle régionale a été développé, en partant des géométries du modèle stratigraphique incluant la surface (toit) du roc. Le tracé de la coupe préliminaire présentée dans ce texte traverse la région, du sud-est (Lac Stukely ; 45,37°N ; 72,27°O) au nord-ouest (Contrecœur ; 45,86°N ; 73,26°O), et conceptualise un transect du SA long de près de 95 km (figure 6.21). Celui-ci traverse des reliefs allant de 307 m en amont jusqu'à 4 m en aval et croise notamment la vallée de la rivière Noire (dans le Piedmont appalachien) et les rivières Yamaska et Richelieu (dans la Plate-forme du Saint-Laurent), permettant ainsi de représenter les différents contextes hydrogéologiques de la Montérégie Est, à l'exception des collines montérégiennes.

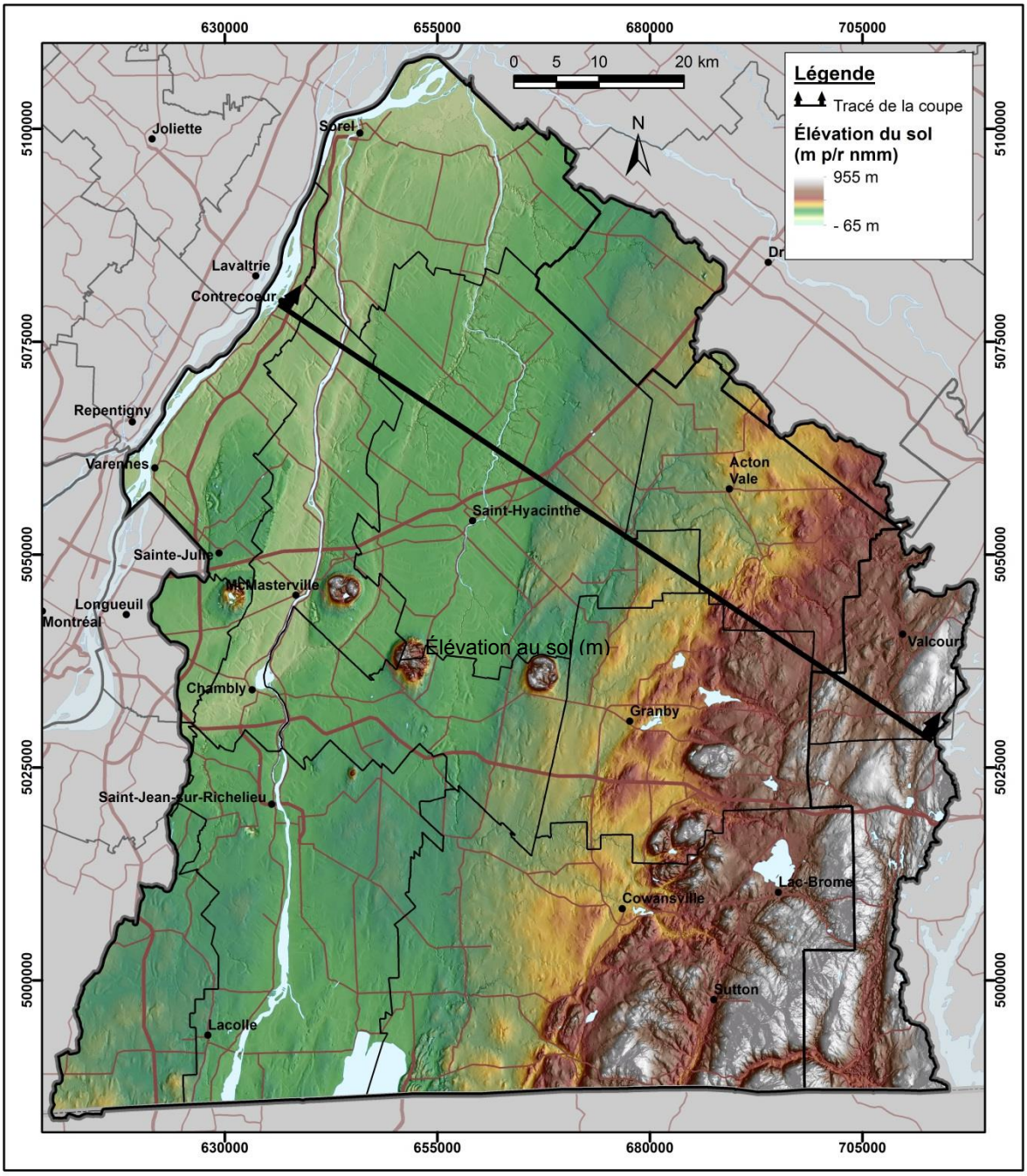


Figure 6.21 : Localisation du tracé de la coupe préliminaire dans la zone d'étude

Conditions aux limites

Bien que le tracé de la coupe soit rectiligne et ne suive pas strictement une ligne d'écoulement régional, le SA modélisé est, dans l'ensemble, cerné de conditions aux limites réalistes. Ainsi, la limite latérale amont est considérée à flux nul, même en profondeur, puisque située à un sommet topographique où les écoulements souterrains devraient se séparer (limite de partage présumée). Similairement, la limite latérale aval est à flux nul, d'abord parce qu'elle atteint le talweg des basses-terres (occupé en surface par le fleuve Saint-Laurent) vers lequel devraient converger les écoulements régionaux ; on ne la considère pas à charge constante aussi parce

que la liaison hydraulique entre le fleuve et l'aquifère rocheux est vraisemblablement très faible étant donné l'épaisse couverture d'argile marine. Par ailleurs, une charge hydraulique égale à l'altitude au sol est imposée à la limite supérieure du modèle 2Dxz. Cette approximation est jugée admissible 1) car la surface piézométrique des dépôts meubles est, en moyenne, à moins de 3 m sous la surface topographique, 2) parce que de multiples essais ont montré que les résultats d'un modèle à piézométrie fixée à la surface s'approchent de ceux d'un modèle où seraient définies plusieurs zones de recharge intercalées d'exutoires locaux, et 3) parce que les visées de cet exercice sont avant tout qualitatives. Enfin, la base du modèle, fixée à une profondeur arbitraire de 2 000 m, correspond à une limite à flux nul, puisqu'il a été considéré que les fractures étaient généralement fermées à cette profondeur et que l'écoulement était négligeable. Il n'est pas nécessaire d'imposer de flux (typiquement de recharge, ou de résurgence dans les cours d'eau) à la surface du modèle, puisque ceux-ci seront déduits automatiquement par le simulateur numérique d'écoulements (grâce aux charges hydrauliques imposées à la surface, qui contraignent suffisamment le modèle).

Hydrostratigraphie simplifiée des dépôts meubles

En dehors de la Plate-forme du Saint-Laurent et de la vallée de la rivière Noire (où la couverture sédimentaire est relativement importante), l'épaisseur de sédiments sus-jacents à l'aquifère rocheux régional (ARR) est relativement faible. Puisque l'ARR est l'objet d'étude principal, la stratigraphie interpolée, comprenant la surface du sol, les épaisseurs des trois groupes de sédiments ou unités hydrostratigraphiques principales (voir section 3.2.3) et le toit du roc, devrait permettre de bien reproduire l'influence de la couverture sédimentaire sur l'ARR sous-jacent. Les propriétés hydrauliques sont supposées homogènes à l'intérieur des trois unités hydrostratigraphiques meubles considérées. Cependant, des valeurs contrastées (anisotropes) sont assignées aux conductivités hydrauliques horizontale versus verticale (tableau 6.14).

Tableau 6.14 : Conductivités hydrauliques assignées aux dépôts meubles (valeurs préliminaires)

Unité hydrostratigraphique	K_h (m/s)	K_v (m/s)	K_h / K_v
Dépôts sur les argiles (~sableux)	4×10^{-5}	4×10^{-6}	10:1
Argiles marines (très compactes)	2×10^{-9}	4×10^{-11}	50:1
Dépôts sous les argiles (till)	2×10^{-6}	1×10^{-7}	20:1

Conceptualisation de l'aquifère rocheux régional

Les analyses statistiques des valeurs de conductivité hydraulique (K) de l'aquifère rocheux, issues de données indirectes principalement (conversion de la capacité spécifique en T puis K), montrent que la variation spatiale de K n'est pas significative d'une formation géologique à une autre, tandis qu'elle est systématique par rapport à la profondeur dans le roc (section 4.1). Par ailleurs, les structures géologiques (ex. : failles, dykes) cartographiées à l'échelle régionale n'ont pas été suffisamment investiguées pour que leurs rôles hydrauliques soient définis. Pour ces raisons, l'ARR conceptualisé n'est pas divisé en plusieurs couches géologiques mais plutôt défini comme un continuum équivalent dont les propriétés hydrauliques évoluent avec la profondeur. L'équation utilisée pour définir $K(z)$ dans les modèles numériques préliminaires est d'ailleurs tirée de la section 4.1. De plus, bien que l'analyse détaillée des essais hydrauliques de la base de données du projet ne soit pas encore terminée, les premiers constats, à l'heure actuelle, suggèrent effectivement que l'ARR se comporte comme un milieu poreux équivalent.

6.4.4 Construction numérique

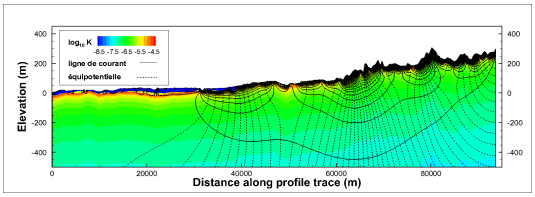
Le modèle conceptuel 2Dxz a ensuite été traduit en un jeu de paramètres d'entrée qui peuvent être lus par un simulateur d'écoulement ou de transport de masse. Aux fins de cette phase exploratoire, le simulateur en éléments finis FLONET/TR2 (Molson et Frind, 2010) et des scripts développés dans R (R Core Team, 2013) sont utilisés conjointement. Cette méthode originale donne tout son sens à l'aspect exploratoire puisqu'elle rend possible la génération quasi-automatique d'un modèle numérique d'écoulement à partir d'un tracé défini par l'utilisateur. Naturellement, les scripts contiennent plusieurs paramètres qui peuvent être activés ou modifiés selon les besoins ; ils contrôlent aussi l'assignation de l'ensemble des propriétés hydrauliques incluant, entre autres, le calcul de leur évolution avec la profondeur dans l'ARR. Le simulateur numérique, quant à lui, calcule, en régime permanent, les charges hydrauliques, les vitesses d'écoulement, les fonctions de courant et, optionnellement, le transport advectif-dispersif des concentrations ou des âges de l'eau souterraine dans le milieu modélisé (Molson et Frind, 2010). Les résultats de simulation sont analysés via le logiciel Tecplot 360™, qui permet un affichage efficace du réseau orthogonal d'équipotentielles et de lignes de courant (constituant le réseau d'écoulement) généré par le simulateur.

Puisque le modèle est bidimensionnel, la résolution spatiale des éléments peut être assez fine sans impliquer un nombre excessif d'éléments. Dans les modèles numériques développés, la distance horizontale entre les nœuds est uniforme et d'environ 100 m. Verticalement, le modèle numérique est discrétisé en un nombre préétabli de couches numériques réparties entre les différentes unités stratigraphiques de dépôts meubles et de l'ARR. Dans le cas des dépôts meubles, les couches stratigraphiques sont tranchées en sous-couches numériques d'égales épaisseurs (de l'ordre du cm au m), tandis que dans le cas de l'ARR, une suite de couches numériques parallèles d'épaisseur croissant avec la profondeur (de 50 cm à 20 m env.) est générée en partant du toit du roc et ce jusqu'à atteindre la limite inférieure sélectionnée lors du développement du modèle conceptuel.

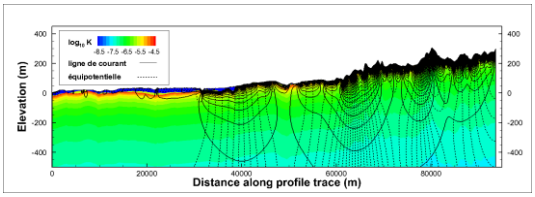
6.4.5 Simulations de la dynamique actuelle réalisées en 2D

À ce jour, seuls des modèles exploratoires ont été développés. Ces modèles ne sont ni calés ni validés rigoureusement et ne sont donc pas encore utilisables à des fins quantitatives. De plus, seules les composantes naturelles de la dynamique aquifère sont considérées pour le moment. Néanmoins, plusieurs constats intéressants ressortent déjà de ces résultats préliminaires.

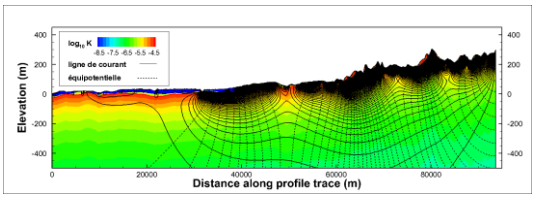
Les simulations basées sur le modèle conceptuel décrit en début de section montrent d'abord que le taux de décroissance de K_h avec la profondeur dans le roc z et l'anisotropie verticale K_h/K_v sont deux paramètres qui contrôlent en grande partie le réseau d'écoulement de l'ARR. Lorsque l'anisotropie verticale est plus forte (i.e. un rapport K_h/K_v plus élevé), les lignes d'écoulement ont tendance à s'allonger (horizontalement). Similairement, lorsque la décroissance $K(z)$ est plus modérée (i.e. une valeur plus élevée de z_c ; section 4.1), les lignes d'écoulement plongent plus profondément dans l'ARR. Or, des écoulements plus étendus longitudinalement et plus profonds décrivent des systèmes d'écoulement d'ordres hiérarchiques supérieurs (i.e. davantage régionaux, moins locaux). En d'autres mots, l'importance des écoulements régionaux est étroitement liée à la variation et à l'anisotropie verticale de K (figure 6.22).



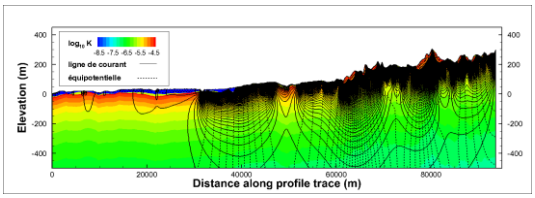
a) modèle de référence
(K_h/K_v = 500; z_c = 16.6)



b) K moins anisotrope
(K_h/K_v = 100; z_c = 16.6)



c) $K(z)$ à décr. plus lente
(K_h/K_v = 500; z_c = 83.0)



d) $K(z)$ à décr. plus lente et moins anisotrope
(K_h/K_v = 100; z_c = 83.0)

Figure 6.22 : Influence des paramètres hydrauliques principaux ($K(z)$ et K_h/K_v) sur l'organisation des écoulements régionaux d'après les résultats du modèle hydrogéologique numérique

Les zones de résurgence du SA sont aussi influencées par ces paramètres. En effet, selon l'ordre hiérarchique des tubes de courant connectant des points hauts (recharge) et des points bas (résurgence) de la surface, ceux-ci peuvent écouler des eaux récentes (dans des tubes locaux de l'ordre du km) à anciennes (dans des tubes régionaux de l'ordre de la vingtaine de km). De plus, les simulations montrent que les tubes de courant d'ordres supérieurs ont tendance à relier plusieurs zones de recharge (en amont) à une zone de résurgence (en aval) (figure 6.23). Ces tubes plus complexes renferment alors des points de stagnation, à l'union des «branches» de recharge, qui pourraient préserver ponctuellement des eaux anormalement anciennes (Jiang et al., 2012; Jiang et al., 2011). Par conséquent, la plupart des zones de résurgence «régionales» récoltent des eaux de différents âges, selon les dimensions et embranchements des tubes de courant qui y convergent. Les eaux faisant résurgence seraient donc le plus souvent un mélange d'eaux d'âges et d'évolutions hydrogéochimiques divers. Par ailleurs, la localisation des zones de recharge et de résurgence principales ne semble pas changer significativement lorsque les propriétés hydrauliques de l'ARR (homogènes latéralement puisqu'elles ne varient qu'en z) sont modifiées; les changements observés concernent plutôt l'intensité des flux et la configuration souterraine des tubes de courant.

Aussi, l'influence du couvert sédimentaire sur les écoulements régionaux est évaluée, en comparant des simulations incluant l'hydrostratigraphie à des simulations ne l'incluant pas. On constate que les dépôts meubles n'ont un impact significatif sur le réseau d'écoulement que lorsqu'ils comprennent une couche épaisse de sédiments fins (ex. : argiles de la mer de Champlain) jouant un rôle d'aquitard. Alors, l'ARR sous-jacent est en condition captive, ce qui se traduit par une surface potentiométrique dépassant le toit du roc et parfois même la surface du sol (conditions artésiennes discontinues) (Figure 6.24).

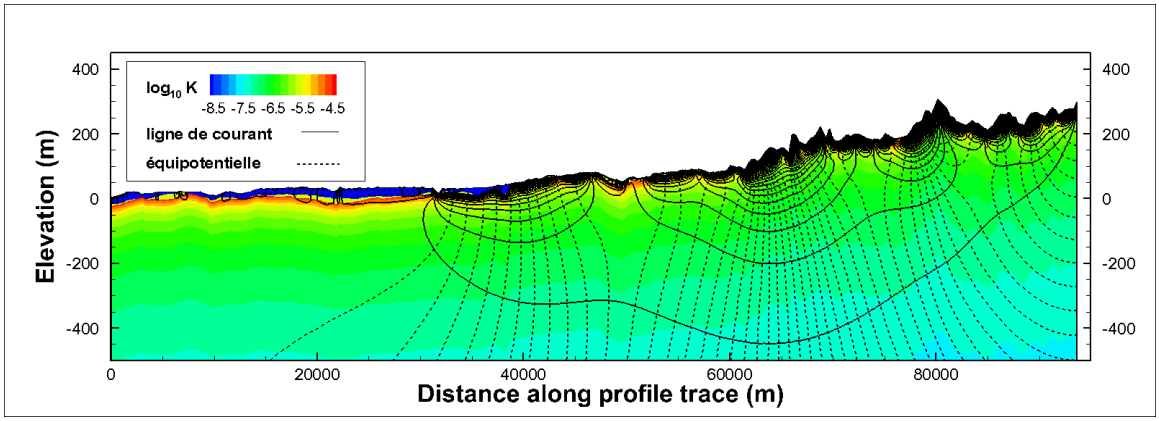


Figure 6.23 : Résultats de la modélisation hydrogéologique numérique 2Dxz préliminaire avec les paramètres retenus - Coupe hydrostratigraphique et réseau d'écoulement

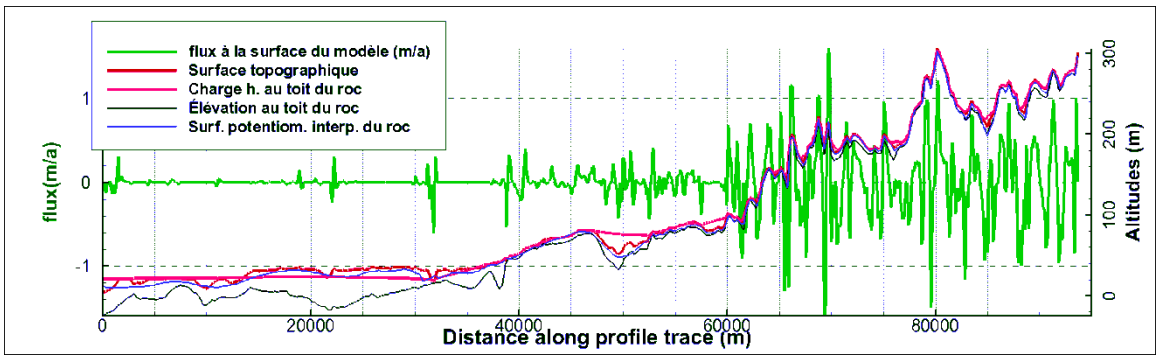


Figure 6.24 : Résultats de la modélisation hydrogéologique numérique 2Dxz préliminaire avec les paramètres retenus – Élévations de surfaces stratigraphiques, charges hydrauliques et flux

Toutefois, la comparaison des surfaces potentiométriques simulées vs observées pour l'ARR indique que le modèle numérique a une tendance systématique à la surestimation de la charge hydraulique dans les zones captives de l'ARR. Il est probable que la fixation de la piézométrie sur toute la surface du modèle (i.e. au toit des dépôts meubles) soit en cause, surtout si cette piézométrie est elle-même surestimée par rapport à la surface piézométrique réelle des dépôts meubles. Aussi, le procédé automatisé d'extraction puis d'interpolation des surfaces stratigraphiques à l'échelle régionale, fortement dépendant de la localisation du tracé du profil et de la résolution spatiale accordée aux informations stratigraphiques, ne permet pas de représenter adéquatement toutes les zones de résurgence étroites qui, dans la réalité, connectent localement l'ARR à la surface (ex : dans certains tronçons de rivière où le roc affleure, ou à d'autres endroits où la couche d'argile s'amincit localement).

De plus, la figure 6.24 montre qu'une portion de l'aquifère rocheux est particulièrement isolée du reste de l'ARR, entre la rive est du fleuve et la rivière Yamaska. En effet, cette zone, par ailleurs caractérisée par des eaux saumâtres (Beaudry et al., 2011), est pratiquement évitée par la circulation souterraine régionale, pour plusieurs raisons : 1) son gradient hydraulique est très faible (quasi-absence de courbes équipotentielles, pourtant définies à intervalles réguliers); 2) elle est précédée, de son côté amont, par une zone de résurgence (certains tronçons de la rivière Yamaska); 3) elle est captive et ne reçoit pratiquement aucune recharge étant donné la couverture sédimentaire sus-jacente épaisse et continue. La zone évitée par l'écoulement régional « actif » dans le modèle numérique de la figure 6.24 correspond relativement bien à la zone saumâtre délimitée par Beaudry et al. (2011), le long du tracé choisi.

En somme, les propriétés hydrauliques du SA s'avèrent les paramètres clés du modèle hydrogéologique actuel, dont la simulation est en cours d'amélioration. Les connaissances issues des travaux de caractérisation hydraulique sont donc d'une grande importance, bien qu'elles doivent possiblement être modulées lors de l'ajustement du modèle aux objectifs de calage. En particulier, la courbe de décroissance de $K(z)$ dans l'ARR doit être mieux contrainte, par des données hydrauliques (section 4.1), mais aussi par des arguments issus de l'analyse structurale des formations géologiques (section 6.2).

Une fois ces propriétés hydrauliques définies plus rigoureusement, des conditions aux limites plus complexes pourront être introduites afin de représenter davantage d'objets naturels (ex. : rivières, affleurements suintants, …) et anthropiques (ex. : pompages majeurs, …). De même, des modifications manuelles de la stratigraphie (géométries, propriétés) devront être faites, en particulier dans les zones où les flux verticaux sont importants, pour bien reproduire la résurgence de l'eau souterraine. Il reste donc plusieurs aspects à améliorer et à étudier dans les modèles 2Dxz avant d'entreprendre la construction d'un modèle 3D de la région d'étude étendue (modèle transfrontalier). La section suivante résume les travaux qui sont planifiés pour approfondir l'étude du SA de la région d'étude via la modélisation hydrogéologique.

6.4.6 Travaux à venir

Calage

Le calage des modèles hydrogéologiques numériques impliquera une comparaison des valeurs simulées versus observées de plusieurs variables dites « objectifs de calage ». Les charges hydrauliques simulées devront être comparées aux niveaux d'eau mesurés *in situ*. Conjointement, des simulations complémentaires seront réalisées à partir des modèles d'écoulement développés en 2Dxz pour calculer l'âge apparent de l'eau en tout point du SA. Alors, les âges isotopiques de l'eau échantillonnée *in situ* pourront être comparés, en un premier temps, aux âges advectifs simulés (Sanford, 2010) - calculés par traçage de particules à rebours (*backward particle tracking*) - puis peut-être, en un second temps, aux âges advectifs-dispersifs simulés par transport d'âge (Goode, 1996). L'utilisation simultanée d'au moins ces deux objectifs de calage devrait permettre d'optimiser ou de confirmer certains paramètres du modèle numérique d'écoulement 2Dxz. Toutefois, les bénéfices de ce processus pourraient être limités du fait de la faible profondeur des puits au roc investigués (par rapport à l'extension verticale du modèle 2Dxz). Néanmoins, dans la mesure où l'on parvient à une validation qualitative du modèle numérique (réseau d'écoulement simulé représentatif), la validité quantitative du modèle numérique devrait être réalisable assez efficacement via 1) le calage des âges de l'eau simulés à proximité des zones de résurgence, 2) la comparaison des flux simulés aux conditions aux limites (en particulier des rivières représentées) aux flux «observés» (ex. : les débits de base calculés pour les tronçons de rivière). L'âge apparent de l'eau souterraine faisant résurgence est particulièrement intéressant car le temps de résidence qu'il quantifie témoigne de la résistance hydraulique cumulative du milieu traversé.

Modélisation 3D

Une fois le modèle numérique 2Dxz validé et utilisable tant à des fins qualitatives que quantitatives, un modèle numérique 3D sera développé avec le logiciel FEFLOW 6.1 afin de poursuivre l'effort de modélisation en incorporant tous les principaux éléments du paysage susceptibles d'avoir un rôle hydrogéologique aux simulations d'écoulement. En effet, davantage d'objets, naturels et anthropiques, peuvent être représentés dans un environnement 3D, notamment, les Montérégiennes, les cours d'eau et lacs majeurs et les failles régionales qui sont des objets qui ne peuvent pas être entièrement représentés en 2Dxz. Éventuellement, le système aquifère transfrontalier Richelieu/Lac Champlain – Yamaska pourra être modélisé

(~ 16 500 km^2). La 3D permettra d'étudier la dynamique d'écoulement du SA, des hauts piézométriques (zones de recharge) jusqu'aux creux piézométriques (zones de résurgence) où convergent au moins une partie des tubes de courant supérieurs. Plus spécifiquement, l'influence des reliefs et des discontinuités structurales, de même que la composition multi-échelle des gradients hydrauliques entretenant cette dynamique, seront mieux représentées par la modélisation 3D. Par exemple, les écoulements provenant du haut d'une colline montérégienne pourraient rejoindre un écoulement régional au niveau des basses-terres environnantes. Par conséquent, les lignes d'écoulement simulées en 3D seront plus complexes et sinueuses car sensibles aux variations locales du gradient hydraulique induites par les divers éléments du paysage.

Modélisation historique

Enfin, l'évolution du SA au cours des temps géologiques récents sera étudiée au moyen de modèles hydrogéologiques 2Dxz, l'objectif de cet exercice étant d'identifier puis de décrire les propriétés et processus (hydrauliques, géologiques, structuraux, mécaniques, glaciaires, glacio-isostatiques, glacio-eustatiques, …) qui ont pu contrôler l'évolution hydrodynamique et hydrogéochimique du SA et qui expliquent son état actuel (en particulier sa salinité résiduelle dans le secteur nord-ouest de la zone d'étude). Des modèles 2Dxz très simples seront utilisés, pour commencer. Les processus seront représentés essentiellement par des changements dans les conditions aux limites, qui simuleront: 1) la croissance puis la décroissance de l'Inlandsis au-dessus de la région d'étude (à l'aide d'une charge hydraulique équivalente au poids de la glace sus-jacente); 2) l'occupation de la vallée du Saint-Laurent par des lacs proglaciaires (à l'aide d'une charge hydraulique correspondant à la hauteur d'eau inondante); 3) l'invasion marine de ladite vallée par la mer de Champlain (à l'aide d'une hauteur d'eau inondante et de changement de densité lié à la salinité) et l'imprégnation du SA par ses eaux saumâtres; 4) le retrait des eaux saumâtres inondantes; 5) l'évolution subséquente du réseau de drainage de la vallée du Saint-Laurent et le lessivage progressif de la salinité résiduelle dans l'ARR, jusqu'à l'état actuellement observé. Une fois l'influence hydrogéologique des différents processus postglaciaires évaluée, les modèles pourront être complexifiés peu à peu, par exemple en considérant la densité inhomogène des fluides et la non linéarité de certains changements aux limites.

6.5 Étude du cycle de l'azote

6.5.1 Contexte de l'étude

Une étude locale sur le cycle de l'azote a été réalisée dans le cadre de ce projet pour différentes raisons, notamment car les rivières Yamaska et Richelieu sont fortement affectées par les nitrates. Bien que les résultats de l'étude de géochimie régionale aient démontré que les concentrations en nitrates étaient relativement faibles dans la région d'étude (section 4.6), les processus en cause sont peu documentés et encore moins bien compris. Les travaux décrits ici représentent un résumé du mémoire de Rachel Thériault (Thériault, 2013).

Cette étude avait pour objectif d'apporter une meilleure compréhension des échanges azotés entre la zone vadose et l'aquifère rocheux régional, principalement où des grandes cultures sont pratiquées, dans le but de comprendre les processus qui contribuent aux faibles concentrations en nitrates dans l'eau souterraine de la région. Deux sous-bassins agricoles du bassin versant de la rivière aux Brochets, situé au nord-est de la Baie Missisquoi dans le sud de la zone d'étude, ont été ciblés pour cette étude : les sous-bassins Ewing (34 km^2) et Walbridge (52 km^2). Les sols du secteur sont, dans une grande proportion, mal drainés. Les cultures les plus fréquentes y sont le maïs et le soya. Par ailleurs, 83 % du territoire est agricole dans le cas du bassin Ewing, tandis que ce pourcentage est de 70 % pour le bassin Walbridge. Dans ces deux

secteurs, la concentration moyenne de $N\text{-}NO_3$ dans les ruisseaux se situe entre 6,0 et 8,0 mg/L (Michaud et al., 2008; Michaud et al., 2009a), alors que la norme pour l'eau potable est de 10 mg/L $N\text{-}NO_3$ et celle pour la vie aquatique de 2,9 mg/L $N\text{-}NO_3$. Très peu de données récentes étaient disponibles pour l'eau souterraine avant la réalisation de ce projet.

Les engrais principalement utilisés par les agriculteurs peuvent être sous deux formes : le lisier (de vache ou de porc) et les fertilisants chimiques. Ces engrais, riches en ammonium (NH_4), se transforment en nitrate (NO_3) dans le sol, un nutriment aisément assimilable par les plantes, mais aussi très soluble, ce qui le rend facilement mobilisable. Ainsi, les fertilisants utilisés pour la croissance des cultures sont à l'origine d'une grande part des nitrates présents dans les sols et les eaux en milieu rural (Kendall, 1998). Toutefois, l'immobilisation, la volatilisation, la dénitrification, l'infiltration et le ruissellement peuvent contribuer aux pertes d'azote (Magnan, 2006). En raison de sa grande solubilité, le transport des nitrates dans les sols est contrôlé par l'écoulement de l'eau souterraine. Il est donc primordial de comprendre le cycle de l'azote et de connaître les particularités des cultures ainsi que de la région d'épandage pour éviter le gaspillage de fertilisants et pour protéger les ressources en eau de surface ou souterraine.

6.5.2 Travaux effectués

Travaux de terrain et en laboratoire

Les travaux de terrain ont inclus l'échantillonnage de sol à 9 sites, l'échantillonnage d'eau de surface et d'eau souterraine, ainsi que des sondages à ces 9 sites. Les journaux de sondages (logs) des sites X01 à X09 sont présentés à l'annexe 4. L'épaisseur des dépôts meubles dans ces deux bassins versant est relativement faible et varie entre 2,8 et 7,0 m. En raison de la texture et de l'épaisseur de ces dépôts, les conditions varient de libres à semi-captives.

L'échantillonnage de sols a été effectué à trois reprises en 2010 : 1) avant la croissance des plantes et l'épandage printanier, 2) au moment où les plantes sont au maximum de leur croissance et 3) une fois les plantes mortes. L'échantillonnage a été fait avec une tarière manuelle à des profondeurs de 30, 60 et 90 cm, soit dans la zone non saturée (sous la zone racinaire), à neuf sites répartis dans les bassins des ruisseaux Walbridge et Ewing. Les échantillons de sol étaient conservés au frais dans une glacière, puis congelés en attendant les analyses. La majorité des endroits sélectionnés pour l'étude était dédiée à la culture du maïs. La méthodologie pour prélever et conserver les échantillons est fournie dans Thériault (2013).

Les sols très cohésifs (ex. : argile raide) n'ont pas pu être utilisés pour ce genre d'analyse, l'eau ajoutée ne pouvant pas se mélanger à l'eau contenue dans les sols. Un des 9 sites a donc dû être abandonné. L'eau des sols de 8 sites a donc pu être analysée aux différentes profondeurs d'échantillonnage en fonction de la texture des sols rencontrés pour un total de 72 échantillons.

Des échantillons d'eau souterraine ont également été prélevés à l'aide d'une pompe Waterra en août 2010 dans les 9 puits d'observation installés suite à la réalisation des sondages CPT ainsi que dans 19 puits résidentiels du secteur. En complément, les résultats de neuf puits échantillonnés pour définir la géochimie régionale de l'eau souterraine ont été utilisés (section 4.6). Douze de ces puits sont aménagés dans l'aquifère granulaire et les 16 autres puisent leur eau dans l'aquifère rocheux. Lorsque disponibles, les élévations du niveau de l'eau, de la profondeur du puits et de la profondeur au roc ont été documentées. De plus, l'eau de trois ruisseaux a été prélevée. Seuls les anions majeurs, dont les nitrates, ont été analysés (sauf dans le cas des puits faisant partie de l'étude sur la géochimie générale, pour lesquels tous les paramètres mentionnés à la section 2.2.4 ont été analysés).

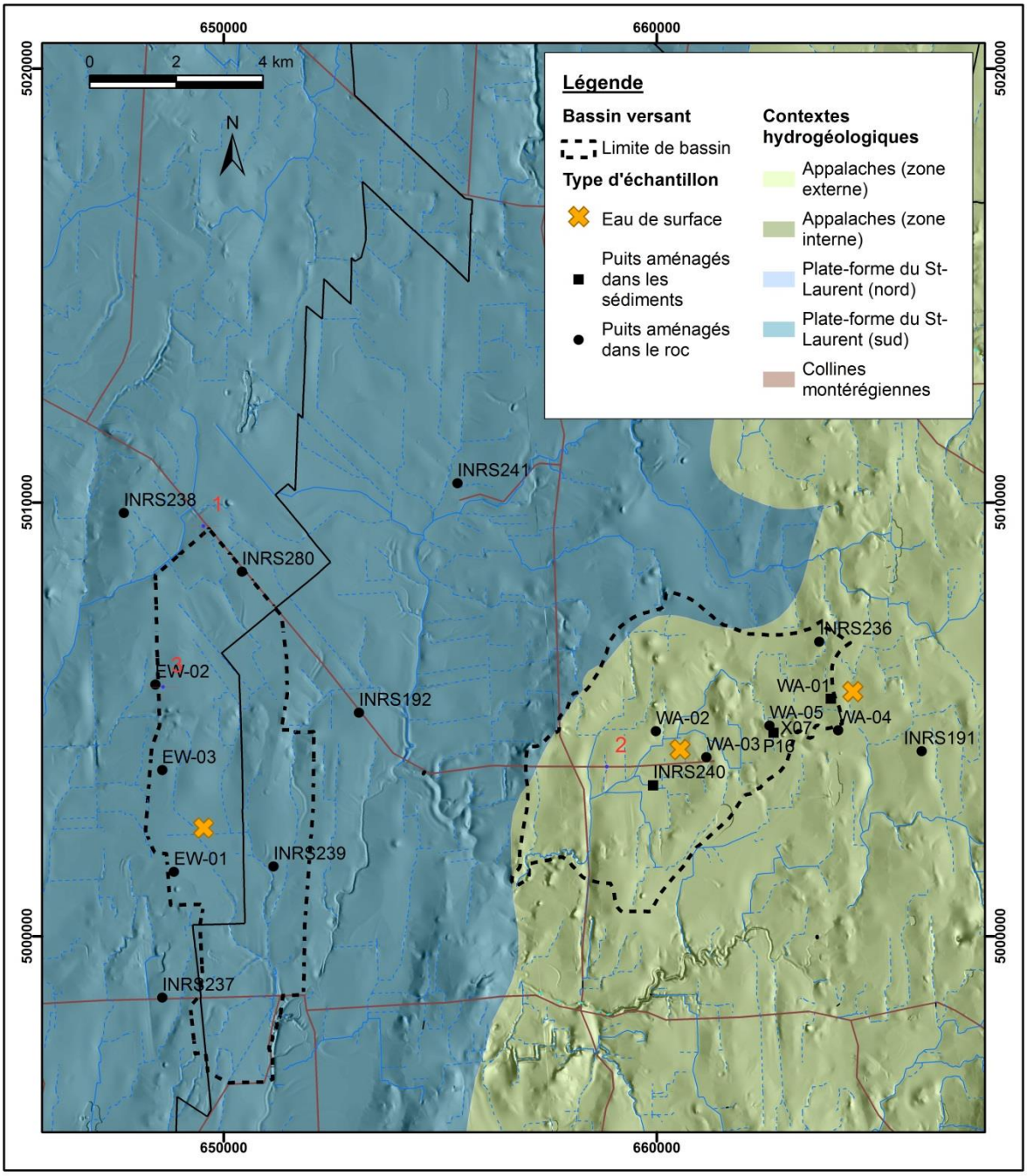


Figure 6.25 : Sites d'échantillonnage de l'eau souterraine, de l'eau de surface et des sols

La figure 6.25 présente les 9 sites d'échantillonnage d'eau de surface et souterrain. Les échantillons ont été filtrés sur le terrain à l'aide d'un filtre de 0,45 µm et congelés par la suite. Pour les échantillons de sols de la zone non saturée, l'eau a été extraite par lessivage (Thériault, 2013). Il est à noter que cette filtration s'est avérée être beaucoup plus ardue que prévu initialement, la majorité des sols contenant beaucoup de particules fines. Même après centrifugation, il fallait utiliser une bonne quantité de filtres et une pompe électrique; le processus était donc long. Il fallait alors ne décongeler que 2-3 échantillons à la fois et les traiter dans un délai de 24 h pour éviter que les rapports isotopiques ne soient modifiés (les échantillons ont tous été traités en moins de 8 h). La concentration en nitrate a été déterminée

pour tous les échantillons prélevés par chromatographie ionique au laboratoire de l'INRS et les rapports $\delta^{15}N$ et $\delta^{18}O$ ont été déterminés pour tous ceux dont la concentration permettait l'analyse isotopique au Delta-Lab de la CGC. La teneur en eau des échantillons a été obtenue à partir d'une balance à infrarouge. Le protocole complet est présenté dans Thériault (2013).

Des échantillons de fertilisants chimiques et de lisiers de porc et de vache ont également été prélevés pour obtenir leurs caractéristiques. Ainsi, des granules de fertilisants (urée et nitrate d'ammonium calcique), obtenues auprès des fournisseurs des agriculteurs de la région, ont été broyées en fine poussière et des échantillons de lisiers de porc et de vache prélevés par les agriculteurs eux-mêmes ont été lyophilisés pour être analysés (Thériault, 2013).

Par ailleurs, un questionnaire avait été soumis aux agriculteurs exploitant les terres où les travaux ont été effectués. Les agriculteurs étaient invités à fournir les informations concernant le type de culture, le travail du sol ainsi que le taux, la fréquence et le type de fertilisant azoté employé pour les années 2009 et 2010 (Thériault, 2013).

Travaux de modélisation

Pour compléter les résultats obtenus en laboratoire, de la modélisation numérique avec le modèle hydrologique 1D Agriflux a été effectuée afin d'évaluer les magnitudes et distributions temporelles des flux d'eau et de la charge de nitrate susceptibles d'être transportés par lessivage et ruissellement. Agriflux comporte deux modules. Le premier simule le transfert de l'eau de la surface du sol jusqu'à la nappe phréatique en considérant les processus suivants : précipitations, infiltration, ruissellement, prélèvement par les plantes, évaporation, drainage (agricole). Le second simule le cycle de l'azote dans le sol et tient compte des processus biochimiques tels que la minéralisation, la nitrification et la dénitrification d'après la température, la teneur en eau de chaque couche, la fertilisation, l'incorporation des résidus de récolte, le prélèvement des plantes et l'infiltration. La limite inférieure du profil représenté dans Agriflux est située sous la zone racinaire et il est considéré que la quantité d'eau y parvenant est celle qui arrive également à la nappe (et qui atteint donc l'aquifère). Dans ce logiciel, la minéralisation-immobilisation et la nitrification sont déterminées par des cinétiques de premier ordre et la dénitrification est considérée de type Michaelis-Menten (Larocque et Banton, 1995). Ces processus sont principalement influencés par la température du sol et la teneur en eau du sol.

Le réseau de drainage est une composante très importante du bilan hydrique en milieu agricole au Québec et spécifiquement en Montérégie (Michaud et al., 2008). Le rôle des drains est d'abaisser le niveau de la nappe phréatique pour éviter l'ennoiement des racines. Le logiciel Agriflux considère toutefois que le drainage n'est possible que lorsque le niveau phréatique est plus élevé que les drains. Cette représentation n'est pas adéquate dans ce cas-ci puisqu'elle implique que le niveau phréatique minimal doive se trouver très près de la surface du sol pour que le drainage soit sollicité dans Agriflux, ce qui ne correspond pas toujours à la réalité du terrain. Michaud et al. (2008) qui ont utilisé le modèle agronomique SWAT avaient d'ailleurs souligné la même lacune dans la version SWAT-2005. Ils avaient conséquemment modifié la programmation pour que le drainage devienne possible lorsque la couche de sol où se trouve le drain atteint la capacité au champ.

Pour cette étude, la zone non saturée a été divisée en quatre horizons qui respectent les horizons naturels des sols (A, B et C). L'horizon A a été subdivisé en une couche supérieure de 10 cm d'épaisseur et une seconde couche comprenant le reste de l'horizon d'origine pour pouvoir représenter adéquatement le ruissellement. L'épaisseur de chaque couche ainsi que son contenu en sable, en limon et en argile doivent être indiqués au logiciel. À partir des descriptions des profils pédologiques et des classes de texture, ces pourcentages ont été déterminés à l'aide d'un abaque (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2002). La conductivité

hydraulique à saturation, la porosité, la capacité au champ et le point de flétrissement ont été déterminés à partir de la classe texturale, d'après la méthode proposée dans Agriflux.

L'épaisseur de la zone modélisée a été fixée à un mètre, ce qui correspond à la profondeur moyenne des drains, très présents dans la région, et à la profondeur maximale des racines du maïs. Sous la zone racinaire, les processus modifiant l'écoulement liés à l'évaporation et aux plantes sont considérés comme étant nuls (Baran et al., 2007; El-Amrani-Paaza et al., 2007), tout comme les processus biogéochimiques (Minet et al., 2012). On considère donc que la concentration de nitrate dans l'eau du lessivage est représentative de ce qui atteint la nappe.

Les valeurs par défaut du logiciel ont été utilisées dans le bloc d'entrée pour le cycle de l'azote. Ces valeurs sont difficiles à obtenir et l'usage des données par défaut peut se justifier par le fait qu'Agriflux ajuste en continu les paramètres en fonction de la température et de l'humidité du sol (El Amrani-Paaza et al., 2007). Les valeurs des blocs d'entrée de données concernant la fertilisation et les cycles culturaux ont été complétés à partir des informations obtenues des agriculteurs par le biais d'un questionnaire. Les paramètres concernant les caractéristiques d'une culture ont été obtenus à partir d'autres études utilisant les mêmes cultures ou à partir du Guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2003).

Pour que les conditions initiales affectent le moins possible les résultats, des simulations de deux ans ont été répétées jusqu'à ce que les résultats à la fin des deux années se stabilisent.

6.5.3 Résultats et discussion

6.5.3.1 Concentrations en nitrates et valeurs isotopiques

Sols

Le rapport isotopique du nitrate de l'eau extraite des sols a été obtenu pour les sites X01, X04, X06, X07 et X08, car les autres sols échantillonnés ne contenaient pas suffisamment de nitrate pour effectuer des analyses isotopiques. Pour leur interprétation, ces sites ont été regroupés en fonction de leur degré de drainage naturel. Seul le site X04 (Ewing) tombe dans la catégorie des sols « bien drainés ». Les sites X01 (Ewing) et X06 (Walbridge) ont été définis comme étant modérément drainés. Les sites X07 et X08, tous deux dans le bassin versant Walbridge, sont mal drainés et des marques de gleyification sont visibles dans le haut du profil de ces deux sites. Pour les mêmes raisons, les valeurs isotopiques du nitrate contenu dans l'eau souterraine n'ont pu être déterminées que pour 6 des 28 sites des secteurs Ewing et Walbridge et de leurs environs. Les concentrations de nitrates et les rapports isotopiques des échantillons de sols, d'eau de surface et d'eau souterraine sont fournis dans Thériault (2013) sous forme de tableaux et de graphiques en fonction de la profondeur et de la saison d'échantillonnage.

Le nitrate synthétique a été utilisé comme engrais à tous les sites en 2010, excepté au site X04 (où du lisier a été épandu). La valeur $\delta^{18}O$ de ce nitrate devrait se situer entre +18 et +22‰ (Kendall et Aravena, 2000). Puisque les valeurs de $\delta^{18}O$ obtenues ici se situent entre -9,7 et +13,9‰ (figure 6.26), il semble que tout le nitrate retrouvé dans les sols ait été nitrifié sur place. Une conclusion similaire avait également été obtenue par Aravena et al. (1993) lors de l'étude d'un panache de contamination provenant d'une fosse septique en milieu agricole. Sur la figure 6.26, les domaines indiqués en italique correspondent à la compilation de valeurs typiques possibles telle que présentée par Kendall (1998).

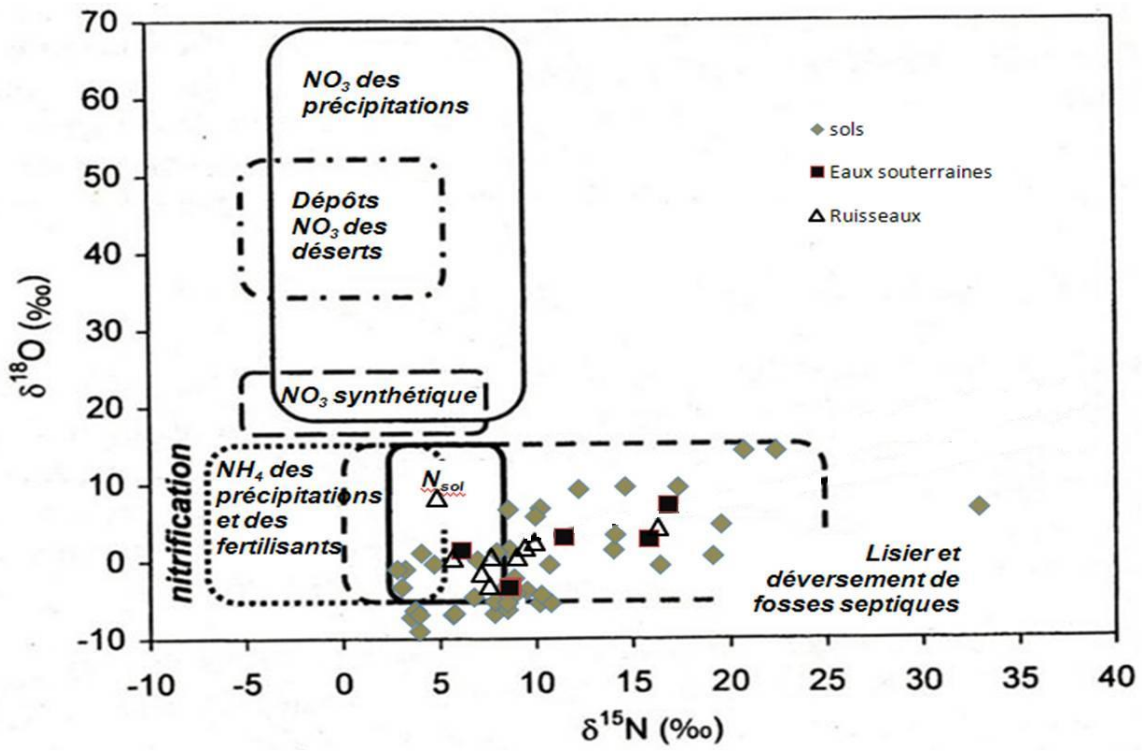


Figure 6.26 : Rapports $\delta^{15}N$ et $\delta^{18}O$ pour l'ensemble des échantillons analysés, incluant l'eau extraite des sols, les eaux de surface et les eaux souterraines

Les rapports isotopiques du nitrate des sols montrent une diversité de processus prenant place dans la zone non saturée. Dans un milieu bien aéré et bien drainé (comme le site X04), peu de changements semblent affecter le nitrate et la zone vadose est une simple zone de transition. Les rapports isotopiques peuvent alors permettre l'identification des sources de nitrate contenu dans le sol assez aisément. Dans un milieu au drainage modéré (sites X01 et X06), on peut détecter les effets de la dénitrification de manière évidente. Enfin, un milieu mal drainé (sites X07 et X08) semble être le siège de transformations diverses dont l'effet sur les rapports isotopiques peut être estompé par la multiplicité des processus y prenant place. Même si l'utilisation de l'isotope de l'azote n'a pas permis d'identifier les sources de nitrate de façon directe dans les sols étudiés, les valeurs de $\delta^{18}O$ et de $\delta^{15}N$ ont fourni des informations précieuses concernant le cycle du nitrate dans la zone vadose, tels que les processus biochimiques des sols qui peuvent affecter le nitrate en fonction du drainage naturel des sols (résumés dans la figure 6.27) et l'évolution temporelle des stocks d'azote. Pour identifier les sources de nitrate dans les sols, il serait approprié d'utiliser des indicateurs complémentaires comme, par exemple, les isotopes du bore ou la géochimie organique.

Les profils de sols complexes et les valeurs isotopiques variant considérablement entre les sites et les saisons rendent l'interprétation difficile. Pour pouvoir identifier les sources de nitrates, il est donc important de vérifier les types de fertilisants utilisés par les exploitants agricoles, de connaître l'historique agricole du site, et surtout, les conditions de drainage des sols. En effet, les concentrations et les rapports isotopiques observés dans le profil de sol et dans l'eau souterraine découlent principalement de la vitesse d'écoulement de l'eau jusqu'à la nappe. Spoelstra et al. (2007) suggèrent que des cycles répétés de dénitrification, immobilisation et reminéralisation peuvent mener à l'augmentation de la valeur $\delta^{15}N$ tout en réinitialisant à chaque fois le rapport de l'oxygène, menant ainsi à des valeurs éloignées de la source d'origine, ce qui nuit à l'identification du processus de dénitrification. Contrairement au rapport isotopique de

l'oxygène, le rapport de l'azote ne peut être réinitialisé. Il peut toutefois subir des modifications dû au mélange de nitrate de différentes sources et par incréments (Burns et Kendall, 2002). Il semble que les valeurs $\delta^{15}N$ soient fortement influencées par la composition isotopique des résidus de plante et la qualité du drainage.

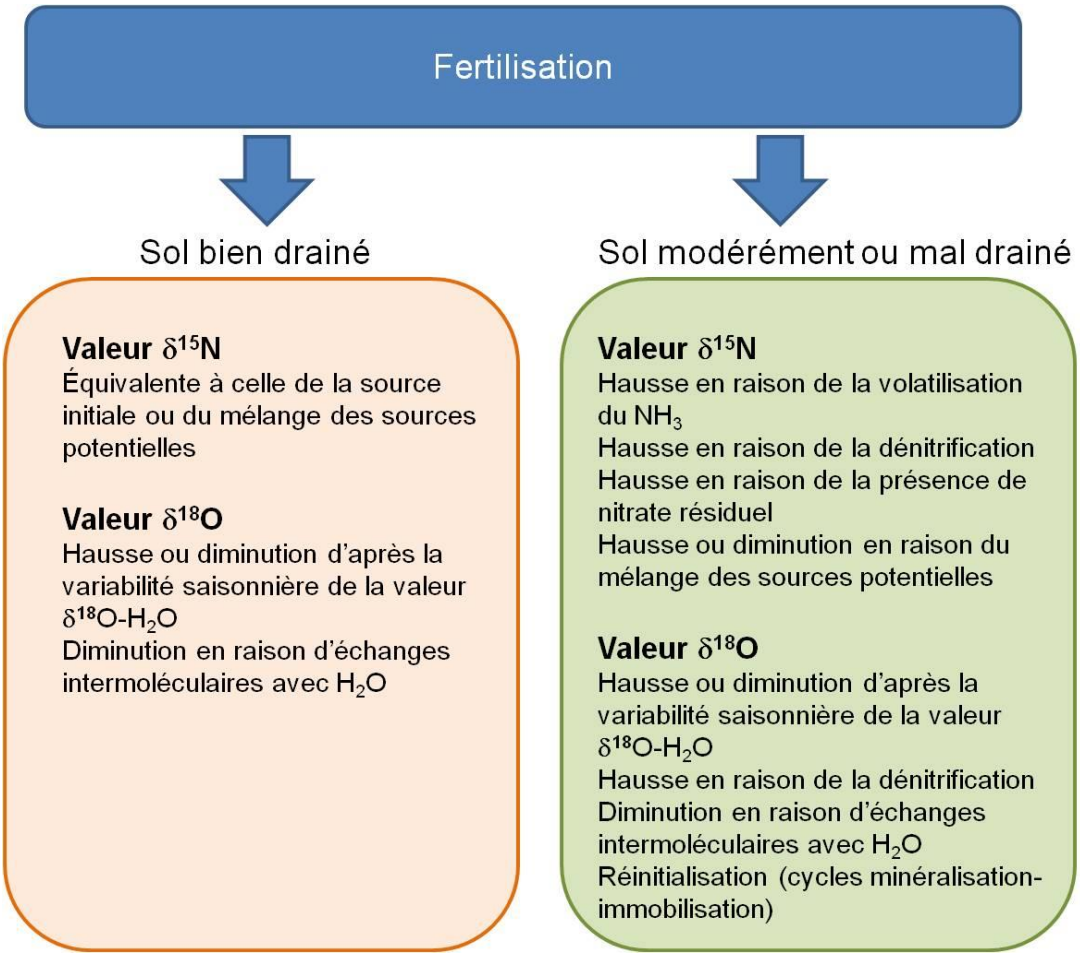


Figure 6.27 : Processus contrôlant les caractéristiques isotopiques du nitrate dans la zone vadose

Eau souterraine

En dépit de l'intensité des activités agricoles dans la région d'étude et de l'utilisation de fertilisants qui y est associée, on constate que, fort heureusement, le nitrate ne dégrade pas significativement la qualité des eaux souterraines de la Montérégie Est (section 5.4). Dans le bassin versant Ewing, les concentrations de nitrate dans l'eau souterraine sont pratiquement nulles, excepté au site X04 (sol sableux bien drainé). L'eau souterraine dans ce bassin est donc peu influencée par les épandages agricoles, sauf parfois localement. Du côté du bassin Walbridge, huit sites sont exempts de nitrate alors que 5 ont des concentrations importantes, découlant des activités anthropiques. Deux de ces puits puisent l'eau dans l'aquifère rocheux et les trois autres dans les dépôts de surface. Les puits contaminés par le nitrate sont relativement éloignés l'un de l'autre et les sources de nitrate concernées peuvent donc être distinctes et très locales. Les sites contaminés peuvent refléter une combinaison de facteurs favorisant la contamination, comme une forte perméabilité des dépôts de surface, une faible profondeur de la nappe, ou l'absence de scellement du puits qui permettrait une infiltration le long du tubage.

L'atténuation naturelle par la dénitrification dans l'eau souterraine semble peu probable dans cette région. La teneur en oxygène dissous mesurée ne permet pas de conclure que les conditions dans l'aquifère sont réductrices.

Dans la région, le drainage des terres agricoles joue un rôle important dans le bilan hydrique. Les écoulements latéraux engendrés par le réseau de drains évacuent une bonne partie de l'eau et des contaminants s'infiltrant dans les sols de la Montérégie vers les cours d'eau, au détriment de la recharge de l'aquifère rocheux, mais en le préservant, dans une certaine mesure, de la contamination en nitrate due aux activités agricoles. De plus, l'infiltration de l'eau et du nitrate en solution vers l'aquifère est limitée en de nombreux endroits par la texture fine du sol ou la présence d'un horizon peu perméable (ex. : présence de till intact dense à une profondeur de 1 à 1,5 m sous le till remanié dans la région), ce qui rend l'aquifère régional rocheux peu vulnérable.

Les valeurs moyennes des rapports isotopiques de l'eau souterraine sont de +0,7 ± 4,2‰ pour $\delta^{18}O$ et de +11,2 ± 4,2‰ pour $\delta^{15}N$ (figure 6.28). Les valeurs de $\delta^{15}N$ et $\delta^{18}O$ aux différents sites sont souvent contrastées, ce qui indique des sources de contamination distinctes. Ces valeurs dépendent principalement de l'épandage (fertilisant chimique ou lisier), de la nitrification hivernale ou printanière des résidus de plantes et beaucoup des conditions intrinsèques du sol (ex. : texture, drainage) et de la nappe. Gormly et Spalding (1979) avaient d'ailleurs rapporté que le nitrate dans les eaux souterraines situées à plus de 3 m de profondeur dans des sols à texture grossière pouvait être relié à sa source à partir des valeurs $\delta^{15}N$. À l'opposé, lorsque la nappe phréatique est près de la surface (par exemple, au site X08), et que la texture est fine, le nitrate subit des modifications rendant l'identification des sources beaucoup plus difficile. Les valeurs obtenues à chacun des sites étudiés sont discutées dans Thériault (2013).

Dans les eaux souterraines (et les eaux de surface), l'identification des sources de nitrate par le biais des isotopes stables est possible mais exige de tenir compte du cycle hydrique. À partir des résultats isotopiques du nitrate, on peut conclure que l'utilisation de lisier comme fertilisant semble être à l'origine d'une partie de la contamination dans l'eau souterraine (comme par exemple les sites X04 et WA-02). Les résidus de plantes nitrifiés pendant la période froide (ex. : sites WA-01, WA-05 et X06) ou encore le mélange de diverses sources de fertilisants (particulièrement au site X06) sont une autre source importante de nitrate.

Eau de surface

Dans les ruisseaux, les valeurs isotopiques ainsi que les concentrations obtenues étaient très variables. La concentration de nitrate mesurée dans l'eau de surface était à son minimum lors de l'échantillonnage du mois d'octobre. La concentration de nitrate était plus élevée en décembre et en mai, dépassant même la norme environnementale pour le nitrate dans les eaux de surface (2,9 mg $N\text{-}NO_3/L$). Les eaux souterraines de la région, qui contiennent généralement très peu de nitrates, alimentent en partie les ruisseaux de façon assez stable, en plus du ruissellement qui est très variable selon les saisons. Pour cette raison, en période sèche (étiage) alors que les ruisseaux sont alimentés surtout par l'eau souterraine, tel qu'observé en octobre, la concentration en nitrate dans les ruisseaux est faible, alors que c'est l'inverse lorsque la contribution provenant du ruissellement est plus importante.

Ceci concorde avec les observations de Michaud et al. (2009a) qui ont noté une hausse de concentration du nitrate concomitante à la hausse du niveau d'eau des ruisseaux en réponse aux précipitations. L'eau des précipitations qui ruisselle est acheminée directement vers les cours d'eau, après avoir lessivé les sols en surface, transportant le nitrate qui était jusqu'alors emmagasiné dans le sol, ce qui contribue à l'augmentation de la concentration en nitrate de l'eau de surface.

6.5.3.2 Modélisation avec Agriflux

Les simulations ont été réalisées sur la période débutant le 1er janvier 2010 et allant jusqu'en mai 2011 aux cinq sites où les concentrations de nitrate dans les sols étaient suffisantes pour permettre des analyses isotopiques, c'est-à-dire les sites X01, X04, X06, X07 et X08. Les résultats avec Agriflux donnent un taux de ruissellement moyen pour les cinq sites équivalent à 32% des flux d'eau, soit environ 154 mm d'eau, ce qui correspond bien aux valeurs obtenues par Deslandes et al. (2007) et Michaud et al. (2009a).

La répartition temporelle des transferts d'eau par ruissellement et infiltration permet d'évaluer les moments où l'aquifère reçoit le plus de nitrate (figure 6.28). Tel que prévu, le ruissellement se fait principalement au printemps (47 %), en mars et avril, suite à la fonte des neiges. L'automne et le début de l'hiver (octobre à décembre) représentent une deuxième période d'infiltration importante, ce qui concorde avec les observations d'autres chercheurs sous un climat similaire. L'été, en raison de l'effet de l'évapotranspiration, et l'hiver, en raison de l'accumulation de l'eau en phase solide sur le sol, sont des périodes moins propices au lessivage.

Puisque le drainage agricole n'a pas pu être modélisé dans Agriflux, le flux lessivé a simplement été divisé en deux parts comme suggéré par les résultats de Deslandes et al. (2007). Il est donc considéré que 29% des flux d'eau sont captés par les drains (137 mm) et que 39 % (190 mm), s'infiltrent jusqu'à l'aquifère. Il ne s'agit que d'une valeur moyenne annuelle présumée. Cela ne permet pas d'étudier les proportions de drainage et de recharge dans l'année, même s'il est généralement reconnu que le printemps et l'automne sont propices à une forte infiltration.

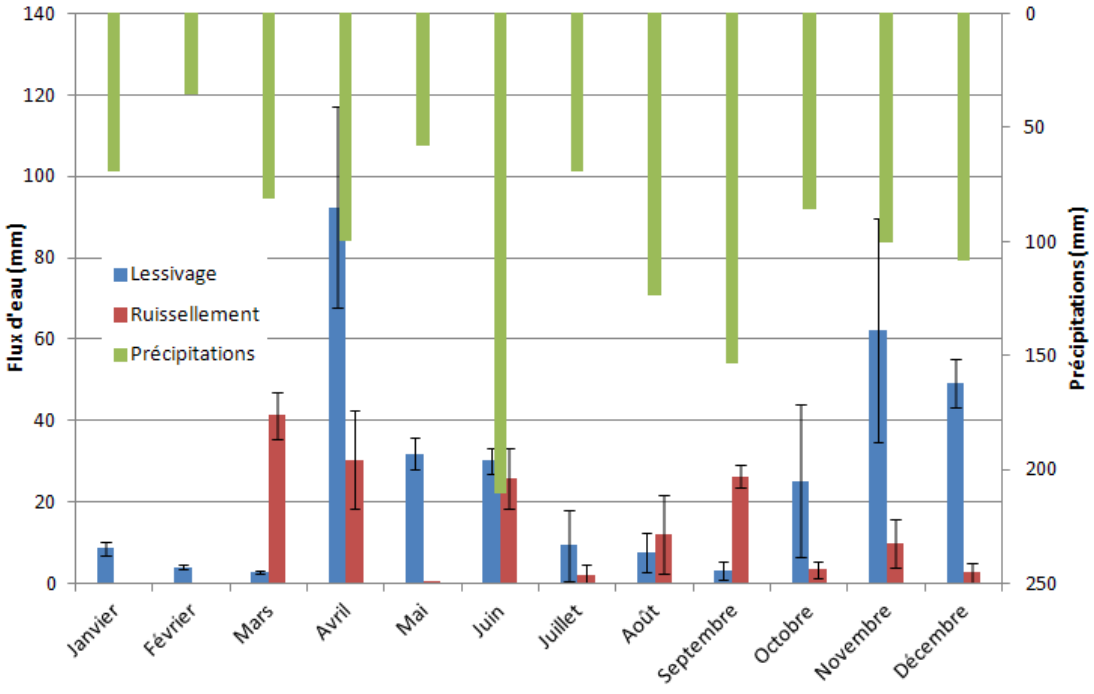


Figure 6.28 : Répartition temporelle des flux d'eau moyens

Les proportions de nitrate transporté (kg N/ha) se distinguent des flux d'eau simulés. Les résultats indiquent que 15 % du nitrate (kg $N\text{-}NO_3$/ha) est pris en charge par le ruissellement en surface, alors que 85 % du nitrate est transporté soit par le réseau de drainage des sols, soit par infiltration jusqu'à l'aquifère. Il est reconnu que le nitrate est davantage susceptible d'être

transporté de manière souterraine (drains, infiltration, écoulement latéral hypodermique) que par ruissellement de surface (Giroux et al., 2002).

Les concentrations simulées varient en moyenne annuellement de 25 à 40 mg/L pour une parcelle donnée, ce qui est très élevé, la limite de potabilité de l'eau étant de 10 mg $N\text{-}NO_3$/L. Le printemps (31 %) et l'automne (47 %) sont également les périodes où le transport souterrain du nitrate est le plus important. La quantité de nitrate lessivée en automne domine notamment en raison de la nitrification des résidus de culture après les récoltes, du lessivage plus efficace du nitrate en raison de l'évaporation moins importante et de l'absence de prélèvement d'eau et d'azote par les plantes. Les concentrations mesurées en août dans l'eau des dépôts de surface sont beaucoup plus faibles. Toutefois, la modélisation par Agriflux n'a pas permis de déterminer l'importance de la prise en charge des pertes de nitrate par les drains, ce qui aurait diminué les quantités d'eau et de nitrate lessivés vers l'aquifère. Cette comparaison laisse donc supposer que le réseau de drains pourrait avoir une contribution majeure. On ne peut toutefois pas supposer que la proportion de nitrate drainé est nécessairement équivalente à la proportion d'eau drainée car les taux de nitrification et de lessivage varient en cours d'année. Suite à des mesures sur le terrain, Giroux et al. (2002) avaient conclu que 90 % des pertes de nitrate annuelles passaient par les drains. Sans prétendre que ce chiffre puisse être appliqué tel quel en Montérégie, on suppose que la proportion de nitrate évacuée par les drains peut représenter une partie très importante des pertes de nitrate par voie souterraine.

Les concentrations obtenues par modélisation sont préoccupantes, car elles montrent que beaucoup trop de fertilisants sont utilisés chaque année sur ces terres agricoles, et que le surplus se retrouve, en Montérégie, principalement dans l'eau de surface via les drains agricoles. Giroux et al. (2002), qui ont effectué des mesures sur le terrain, rapportent que la concentration de nitrate de l'eau des drains au Québec se situe entre 1 et 40 mg $N\text{-}NO_3$/L, le maïs-grain et la pomme de terre étant les cultures engendrant le plus de pertes.

7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet avaient pour but de dresser le portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est dans le but d'en permettre la gestion et d'en assurer la pérennité. La zone d'étude du projet couvre une superficie d'environ 9 000 km^2 et comprend trois bassins versants, soit ceux des rivières Richelieu, Yamaska et de la baie Missisquoi, ainsi que l'ensemble des 9 municipalités régionales de comté (MRC) de la Conférence régionale des élus Montérégie Est et de ses 106 municipalités. De plus, 42 municipalités en dehors de la CRÉ Montérégie Est ont aussi été couvertes, parfois en partie, par les travaux.

Cinq contextes hydrogéologiques ont été définis dans la zone d'étude : les zones nord et sud de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres), les intrusions montérégiennes, la zone externe des Appalaches (Piedmont) et la zone interne des Appalaches (Hautes-terres). Des conditions hydrogéologiques distinctes sont observées dans ces contextes hydrogéologiques. Le contexte de la zone nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres nord) est caractérisé par une couverture argileuse épaisse (> 10 m) qui implique une recharge minimale de l'aquifère rocheux régional ainsi qu'un très faible écoulement de l'eau souterraine. De cette situation découle la présence d'eaux saumâtres non potables dans l'aquifère rocheux des Basses-terres nord dû au lessivage partiel des eaux de la mer de Champlain. Dans le contexte de la zone sud de la Plate-forme du Saint-Laurent (Basses-terres sud), il n'y a pas de couverture continue et épaisse de sédiments argileux, ce qui permet une recharge plus importante de l'aquifère rocheux. Le potentiel aquifère repose essentiellement sur l'aquifère rocheux fracturé et il y a une utilisation significative d'eau souterraine. Le contexte hydrogéologique des intrusions montérégiennes représente une zone de recharge régionale de l'aquifère rocheux. Il y a un potentiel aquifère dans le roc fracturé, mais aussi au pourtour de certaines collines, surtout du côté sud, où se trouvent des accumulations significatives de sédiments grossiers perméables. Dans ce contexte, on retrouve des dépassements significatifs de critères de potabilité pour le fluor (F) et le baryum (Ba). Dans le contexte de la zone externe des Appalaches (Piedmont), on retrouve un faible couvert de till sur les hauteurs qui permet une recharge importante par endroits. L'aquifère rocheux est exploité partout, tandis que le potentiel aquifère dans les dépôts meubles est présent par endroits dans les vallées. Il y a une utilisation importante de l'eau souterraine dans ce contexte. Enfin, dans le contexte de la zone interne des Appalaches (Hautes-terres), on retrouve aussi une importante recharge sur les hauteurs. La résurgence de l'eau souterraine se fait dans les vallées où la couverture de sédiments fins réduit la vulnérabilité. La meilleure qualité d'eau souterraine de la région est présente dans ce contexte. Il y a une utilisation locale de l'eau souterraine dans ce contexte dans les secteurs où des municipalités plus importantes se sont développées.

Des Montérégiennes jusqu'à Sorel, toute la partie nord-ouest de la région d'étude est desservie par des réseaux approvisionnés par de l'eau de surface, à cause de la présence d'eau saumâtre dans ce secteur. Ailleurs, les principales municipalités (population > 2 000) dont les réseaux sont alimentés par de l'eau souterraine sont Upton, Brigham, Lac-Brome, Saint-Germain-de-Grantham, Roxton Pond, Saint-Liboire, Waterloo, Saint-Alexandre, Napierville, Rougemont et Saint-Césaire. Les MRC avec les plus fortes consommations d'eau souterraine sont Les Maskoutains, Acton, Rouville, La Haute-Yamaska, Le Haut-Richelieu, Les Jardins-de-Napierville et Brome-Missisquoi. Ces MRC avec une consommation importante d'eau souterraine sont généralement situées dans des contextes où la vulnérabilité est relativement élevée.

Au niveau de la qualité de l'eau souterraine, cinq (5) composés ont des dépassements par rapport à des normes pour l'eau potable relatives à la santé : l'arsenic (As), le baryum (Ba), le fluor (F), les nitrites et nitrates (N-NO_2 et N-NO_3), ainsi que l'uranium (U). Des zones de qualité

d'eau jugée « non potable », « passable » et « acceptable » ont pu être définies dans la région d'étude. L'eau non potable correspond à la zone d'eau saumâtre dans la partie nord-ouest de la région. L'eau de qualité passable occupe tout le reste des Basses-terres et du Piedmont jusqu'aux Appalaches, ce qui représente approximativement la zone maximale d'extension de la mer de Champlain. L'eau de qualité acceptable occupe essentiellement les Hautes-terres des Appalaches, hors de la région affectée par la présence d'eau marine. Certains types d'eau présentent des proportions importantes de dépassements des critères de qualité. Bien que certaines concentrations non négligeables en azote sous forme de nitrites et nitrates ($N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$) aient été mesurées au niveau de l'aquifère rocheux régional, aucun dépassement des normes n'a été identifié dans les puits au roc échantillonnés dans le cadre du projet, malgré le caractère agricole de la région.

Des indicateurs de gestion durable des ressources en eau souterraine, sous forme de tableaux et de cartes, ont été dérivés des données et cartes produites par le projet PACES réalisé en Montérégie Est. Ces indicateurs permettent de « traduire » les résultats obtenus sous une forme plus facilement utilisable par les organismes régionaux impliqués dans la gouvernance et la gestion des ressources en eau souterraine. Ces indicateurs permettraient aux gestionnaires régionaux 1) de mieux saisir l'état de la ressource, 2) d'identifier les problématiques pertinentes à leur région, et 3) de cibler les secteurs prioritaires d'intervention. Certains des constats découlant de ces indicateurs et des données du projet sont décrits ci-après et pourraient être considérées par les organismes régionaux afin d'établir les priorités d'action permettant une gestion durable de la ressource sur leur territoire :

- De manière générale, il ne semble pas y avoir de problèmes de disponibilité d'eau souterraine dans les secteurs où celle-ci est importante pour l'approvisionnement en eau puisque la consommation d'eau souterraine représente généralement une proportion de la recharge inférieure à 10 %. Toutefois, l'exploitabilité de l'eau souterraine présente des défis par endroits puisque la productivité des puits installés dans l'aquifère rocheux fracturé est variable et relativement limitée, et que les aquifères granulaires pouvant être exploités sont d'étendue plus restreinte et peuvent être difficiles à localiser. Dans ce contexte, il sera important de garder à jour les données concernant le niveau d'exploitation des eaux souterraines dans la région, notamment via le réseau de puits suivi du MDDEFP, car il semble y avoir une augmentation de l'utilisation de l'eau souterraine au niveau municipal. D'autant plus que certaines municipalités sont déjà au prise avec des conflits d'usage, alors que d'autres considèrent l'utilisation d'eau souterraine alors que la pression sur l'eau de surface augmente, tant au niveau de sa quantité que de sa qualité.
- Au niveau de la qualité de l'eau souterraine, les zones associées à certains types d'eau définis dans le cadre de ce projet présentent une proportion significative de puits avec des dépassements des critères de potabilité. Dans ces zones, particulièrement où une densité de puits résidentiels est importante, une vérification de la potabilité de l'eau souterraine pour des paramètres susceptibles d'avoir des dépassements pourrait contribuer à protéger la santé publique. A l'extérieur de ces zones, les priorités de protection pourraient tenir compte des secteurs avec forte densité de puits résidentiels où la vulnérabilité est élevée et où la densité d'activités anthropiques est importante. Par ailleurs, bien que les concentrations en nitrites et nitrates associées à la fertilisation des cultures ne soient pas à un niveau préoccupant présentement, il faudra assurer un suivi de l'évolution de la situation pour les puits dans les secteurs à forte activité agricole, où la vulnérabilité est élevée et où la densité des puits résidentiels est importante.
- Bien que les connaissances acquises dans le cadre de ce projet soit la base d'une gestion durable des ressources en eau souterraine, des actions supplémentaires sont nécessaires afin de diffuser ces connaissances et les rendre utilisables par les acteurs

de l'eau, notamment ceux impliqués dans la planification du développement régional. Certaines initiatives ont été prises dans le cadre de ce projet afin de favoriser la diffusion et la vulgarisation de l'information (ex. : préparation d'un atlas hydrogéologique, développement d'une plate-forme de diffusion web pour les partenaires du projet, collaboration à un projet visant le développement d'un outil d'aide à la décision), mais il est souhaitable que ce projet crée d'autre opportunités pour des campagnes de sensibilisation et d'éducation ainsi que pour le transfert d'outils d'aide à la décision pour les acteurs de l'eau de la Montérégie Est.

En plus des livrables prévus par le PACES, des travaux spécifiques ont aussi été réalisés par des étudiants de 2^{e} et 3^{e} cycles sur des thèmes d'intérêt pour les ressources en eau souterraine en Montérégie Est. Certains de ces travaux sont documentés dans le présent rapport, notamment l'étude de la fracturation et de son contrôle sur les propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux régional, l'évaluation détaillée des processus de recharge avec de méthodes variées, l'étude des sources et du devenir des nitrates dans l'eau souterraine, et la modélisation numérique de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux.

Le projet PACES en Montérégie Est a fourni les bases de connaissances requises pour assurer la bonne gouvernance de l'eau souterraine. La concertation régionale au niveau des organismes intéressés pourrait assurer une cohérence dans les approches et les critères d'actions visant à assurer une bonne gouvernance de la ressource. Ces efforts devront être soutenus par les organismes gouvernementaux et les chercheurs intéressés à la ressource en eau souterraine.

8 REFERENCES

Agriculture et agroalimentaire Canada. (2002). Le système canadien de classification des sols. Ottawa, Conseil National de Recherche du Canada. 202 p.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. et Hackett, G. (1987) DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. National Water Well Association, Dublin, OH.

Arnold, J.G. et Fohrer, N. (2005) SWAT 2000 : Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. Hydrological Processes, Vol. 19, 563-572.

Aravena, R., Evans, M.L. et Cherry, J.A. (1993). Stable isotopes of oxygen and nitrogen in Source identification of nitrate from septic system. *Ground Water* 31(2): 180-186.

Baalousha, H. (2005) Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza Strip, Palestine. *Environmental Geology*, 48: 889-900.

Baran, N., Richert, J. et Mouvet, C. (2007). Field data and modelling of water and nitrate movement through deep unsaturated loess. *Journal of Hydrology* 345 : 27-37.

Beaudin, I., Michaud, A. R., Drouin, A., Desjardins, J. et Côté, N. (2013) Rapport final du Projet interrégional de connaissances sur les eaux souterraines du Québec - Projet de connaissances en Montérégie Est. Projet réalisé pour l'Institut national de recherche scientifique et financé par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada.

Beaudry, C. (2013) Hydrogéochimie de l'aquifère rocheux régionale en Montérégie Est, Québec. Mémoire de maîtrise, INRS - Centre Eau terre Environnement, Québec, 195 pp.

Beaudry, C., Malet, X., Lefebvre, R. et Rivard, C. (2011) Délimitation des eaux souterraines saumâtres en Montérégie Est, Québec, Canada. Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada, Dossier public 6970, août 2011, 26 p., doi : 10.4095/289123.

Bédard, K., Comeau, F.-A. et Malo, M. (2011) Évaluation du potentiel de séquestration géologique du CO_2 des bassins sédimentaires du sud du Québec. Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, rapport final INRSCO2-2011-V1.2, 25 p.

Bélanger, C., Gloaguen, E., Lefebvre, R., Giroux, B., Paradis, D., Ballard, J-M. et Tremblay, L. (2009) Hydrogeophysical characterization of an unconfined aquifer at the sub- watershed scale. Proceeding GeoHalifax 2009, 62^{e} Conférence géotechnique canadienne et à la 10^{e} Conférence spéciale conjointe SCG/AIH-SNC sur les eaux souterraines, 20-24 Septembre 2009.

Benoit, N., Lavoie, D., Huot-Vézina, G., Rivard, C., William, J.H. et Reynolds, R. (2011) Géologie du socle rocheux, bassins Richelieu-Lac Champlain et Yamaska, Québec, New York et Vermont/ Bedrock geology, Richelieu-Lake Champlain et Yamaska Watersheds, Quebec, New York and Vermont. Commission géologique du Canada, Dossier public 7283, échelle 1/250 000, doi : 10.4095/000000.

Berryman, D. (2008) État de l'écosystème aquatique du bassin versant de la rivière Yamaska : faits saillants 2004-2006. Gouvernement du Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-53592-8 (fichier pdf), 22 p.

Blouin, M., Martel, R. et Gloaguen, E. (2013) Accounting for aquifer heterogeneity from geological data to management tools, *Ground Water*, 51 (3): 421-431.

Blouin, M., Gloaguen, E., Pugin, A. et Chasseriau, P. (2011) A 3D integrated approach for geological modelling to improve hydrogeological characterization. Congrès conjoint de l'Association canadienne pour l'étude du Quaternaire (CANQUA) et de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues (AIH-CNC), 28-31 août 2011, 5 p.

Bouwer, H. (1989) The Bouwer and Rice Slug Test — An Update. *Ground Water*, 27(3): 304-309.

Brodaric, B. (1992) GSC FIELDLOG v2.83. Geological Survey of Canada, internal publication, 95 p.

Burns, D. A. et Kendall, C. (2002). Analysis of ^{15}N and ^{18}O to differentiate NO_3 sources in runoff at two watersheds in the Catskill Mountains of New York. *Water Resources Research*, 38 (5): 1051.

Canadian Centre for Remote Sensing (CCRS) (2011) Peak Season Leaf Area Index for Richelieu Aquifer during 2010 from MODIS 250m Imagery. CCRS Technical Note 5, May 2011, 11 p.

Cann, D. B., P. Lajoie et Stobbe, P. C. (1948) Étude des sols des comtés de Shefford, Brome et Missisquoi dans la province de Québec, Service des fermes expérimentales, ministère fédéral de l'Agriculture, en collaboration avec le ministère de l'Agriculture de Québec et le collège Macdonald, Université McGill, # 3M-10358-12-47, 94 p.

Castonguay, S. (2000) Évolution tectonique et géochronologie $^{40}Ar/^{39}Ar$ de la zone de Humber interne, Appalaches du sud du Québec. Institut National de la Recherche Scientifique, thèse de doctorat, 232 p.

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) (2010) Données hydrométriques de la Montérégie Est. Gouvernement du Québec, MDDEFP, compilation par station, fichiers en format texte distribués en 2010.

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) (2012) Limites de bassins versants du Québec à l'échelle 1/20 000. Gouvernement du Québec, MDDEFP, fichiers en format shapefile distribués en 2012.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2010). Guide de référence en fertilisation – 2^{e} édition. Sainte-Foy, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 473 p.

Charbonneau, J.M. (1980) Région de Sutton (moitié ouest) (comté de Brome-Missisquoi). Ministère des ressources naturelles (MRN), Géologie Québec, SIGEOM, document public DPV 681, carte 1, feuillet 31H02, échelle 1/50 000.

Clark, T.H. (1964a) Région de Saint-Hyacinthe (moitié ouest), comtés de Bagot, de Saint-Hyacinthe et de Shefford. Ministère des ressources naturelles (MRN), Géologie Québec, SIGEOM, rapport géologique RG 101, carte 1412, feuillet 31H10, échelle 1/63 360.

Clark, T.H. (1964b) Région d'Upton, comtés de Bagot, Drummond, Richelieu, Saint-Hyacinthe et Yamaska. Ministère des ressources naturelles (MRN), Géologie Québec, SIGEOM, rapport géologique RG 100, carte 1411, feuillet 31H15, échelle 1/63 360.

Clark, T.H. (1977) Région de Granby (moitié ouest). Ministère des ressources naturelles (MRN), Géologie Québec, SIGEOM, rapport géologique RG 177, carte 1869, feuillet 31H07, échelle 1/63 360.

Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M. et Therrien, R. (2010) Desalination of a sedimentary rock aquifer system invaded by Pleistocene Champlain Sea water and processes controlling groundwater geochemistry. *Environmental Earth Sciences*, 59(5): 977-994.

Coalition Canadienne de l'Énergie Géothermique (CCEQ) (2010) Données de forages géothermiques. CCEQ, données tabulaires distribuées en 2010.

COGEBY (2009) Plan directeur de l'eau - Portrait et diagnostic du bassin versant de la rivière Yamaska. Conseil de gestion du bassin versant de la Yamaska (COGEBY), mise à jour de la version de 2007, décembre 2009, 237 p.

Colpron, M. (1992) Géologie de la région du lac Brome (Estrie). Ministère des ressources naturelles (MRN), Géologie Québec, SIGEOM, étude terminale ET 90-09, cartes 2142 et2164, feuillet 31H02, échelle 1/20 000.

Colpron, M., Faure, S. et Dowling, W.M. (1994) Géologie de la région de Sutton (Montérégie). Ministère des ressources naturelles (MRN), Géologie Québec, SIGEOM, étude terminale ET 92-05, cartes 1 et 2, feuillet 31H02, échelle 1/20 000.

Comeau, F.-A. (2006) Structure et stratigraphie de la zone parautochtone des Appalaches taconiennes dans la région de Québec. Université Laval, Faculté des Sciences et de Génie, mémoire de maîtrise, 133 p.

Conseil des académies canadiennes (CAC) (2009) La gestion durable des eaux souterraines au Canada. Le Comité d'experts sur les eaux souterraines au Canada, 276 p.

Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) (2011) Initiative: Groundwater Assessment Approach Pilot Projects. CCME, WMC Groundwater Project Team, 2012/13 Workplan Proposal.

Cooke, H.C., Eakins, P.R. et Tiphane, M. (1962) Shefford map-area, Shefford and Brome counties. Ministère des ressources naturelles (MRN), Géologie Québec, SIGEOM, document public DP 187, carte 1, feuillet 31H07, échelle 1/31 680.

Cooke, H.C. (1950) Geology of a southwestern part of the eastern townships of Quebec. Government of Canada, Department of Mines and Technical Surveys, Geological Survey of Canada, geological compilation, map 994A, scale 1/126 720.

Cooper, H.H., Jr. et Jacob, C.E. (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Eos Trans. AGU*, 27(4): 526-534.

COVABAR (2009) Plan directeur de l'eau - Portrait et diagnostic du bassin versant de la rivière Richelieu. Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu (COVABAR), mars 2009, 290 p.

Crosbie R.S., Binning P. et Kalma J.D. (2005) A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research*, 41: W01008.

Croteau, A., Nastev, M. et Lefebvre, R. (2010) Groundwater recharge assessment in the Châteauguay River watershed. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 451-468.

Croteau, A. (2006) Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional du bassin versant de la rivière Châteauguay. M.Sc. Thesis, Institut National de la Recherche Scientifique - Eau, Terre et Environnement, Québec

Crow, H., Ladevèze, P., Laurencelle, M., Benoit, N. et Lefebvre, R. (2013) Downhole geophysical logging and preliminary analyses of bedrock structural data for groundwater applications in the Montérégie Est area, Québec. Geological Survey of Canada, Open File 7077, 51 p.

D'Astous, A.Y., Ruland, W.W., Bruce, J.R.G., Cherry, J.A. et Gillham, R.W. (1988) Fracture effects in the shallow groundwater zone in weathered Sarnia-area clay. *Canadian Geotechical Journal*, 26, 43-56 (1989).

De Chardon, C.M. (2009) Designing groundwater visualization interfaces. M. Sc. Thesis, Simon Fraser University, 255 p.

Decagon Devices (2011) Drain Gauge: Gee Passive Capillary Lysimeter. Operator's Manual, version 5. Decagon Devices, Pullman, Washinton, États-Unis, 36 p.

Delin, G.N., Healy, R.W., Lorenz, D.L. et Nimmo, J.R. (2007) Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. *Journal of Hydrology*, 334: 231-249.

Denis, C. et Rouleau, A. (1991) Relevés structuraux et essais hydrauliques en forage dans le substratum rocheux pollué à Ville-Mercier, Première Conférence canadienne sur la Géotechnique Environnementale, 14 au 16 mai 1991, Montréal.

Deslandes, J., Beaudin, I., Michaud, A., Bonn, F. et Madramootoo, C.A. (2007). Influence of landscape and cropping system on phosphorus mobility within the Pike River watershed of Southwestern Quebec: Model parameterization and validation. *Canadian Water Resources Journal*, 32(1): 21-42.

Donigian, A.S. Jr. (2002) Watershed Model Calibration and Validation: The HSPF Experience. WEF National TMDL Science and Policy 2002, November 13-16, 2002. Phoenix, AZ. WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM. Disponible en ligne: http://www.aquaterra.com/resources/pubs/

Dubé-Loubert, H., Parent, M. et Brazeau, A. (2013) Cartographie des dépôts de surface du bassin versant contigu des rivières Yamaska, Richelieu et de la baie Missisquoi. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources Naturelles (MRN), Bureau de l'exploration géologique du Québec, rapport en préparation, échelle 1/50 000.

Eckhardt, K. et Arnold, J.G. (2001) Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 251(1-2): 103-109.

El Amraani-Paaza, N., Larocque, M., Banton, O. et Benavente, J. (2007). Simulation de la contamination des eaux souterraines du delta du Rio Adra et eutrophisation des albuferas (Almérie, Espagne). *Revue des Sciences de l'Eau* 29 (1) : 15-25.

Enright, P. (2006) Communications personnelles. Université McGill.

Environnement Canada (2012) Archives nationales d'information et de données climatologiques. Environnement Canada, Direction des archives nationales et de la gestion des données, données distribuées en 2012 via Climat-Québec.

Environnement Canada (2011a) Archives nationales d'information et de données climatologiques. Environnement Canada, Direction des archives nationales et de la gestion des données, URL : climat.meteo.gc.ca.

Environnement Canada (2011b) Archives nationales des données hydrologiques - Base de données HYDAT. Environnement Canada, Relevés hydrologiques du Canada (RHC), URL : ec.gc.ca/rhc-wsc.

Fellenius, B.H. et Eslami, A. (2000) Soil profile interpreted from CPTu data. In: *Year 2000 Geotechnics*. Geotechnical Engineering Conference, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, November 27–30, 18pp.

Financière agricole du Québec (FADQ) (2003) Rendements réels de l'année 2001 en assurance récolte. Financière agricole du Québec, mars 2003, Lévis, Qc. Document disponible en ligne : /www.fadq.qc.ca/statistiques_et_taux/statistiques

Financière agricole du Québec (FADQ) (2009) Base de données des cultures assurées (BDCA). Gouvernement du Québec, Direction des ressources informationnelles (FADQ), fichiers en format shapefile distribués en octobre 2009.

Financière agricole du Québec (FADQ) (2010) L'état des cultures au Québec. Publication disponible en ligne pour les années 2000-2010. Site internet consulté en juillet 2010: www.fadq.qc.ca/acces_medias/evenements/etats_des_cultures.

Foster, S.S.D. et Hirata, R.C.A. (1988) Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data, CEPIs – PAHO / WHO, Lima, 78 p.

Freeze, R.A. et Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Upper Saddle River, NJ, 609 pp.

Frind, E.O., Molson, J.W. et Rudolph, D.L. (2006) Well vulnerability: A quantitative approach for source water protection. *Ground Water*, 44(5), 732-742.

Gaucher (1984) Compilation de la géologie du Quaternaire - Région des Appalaches. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, rapport DV 84-10, 89 cartes (échelle 1/50 000), feuillets SNRC 21E02-16, 21K12-13, 21L01-16, 21M01, 21M08, 21N04-16, 22B01-16, 22C01-03, 22C07-09, 22G01-03, 22H04-06, 31G01, 31H01-11, 31H14-16, 31I01-03, 31I07-09.

Gee, G.W., Ward, A.L., Caldwell, T.G. et Ritter, J.C. (2002) A vadose zone water fluxmeter with divergence control. *Water Resources Research*, 38, 16 p.

Gee, G.W., Newman, B.D., Green, S.R., Meissner, R., Rupp, H., Zhang, Z.F., Keller, J.M., Waugh, W.J., van der Velde, M. et Salazar, J. (2009) Passive wick fluxmeters: Design considerations and field application. *Water Resources Research*, 45, 18 p.

Géomont (2008) Cartographie de base des milieux humides de la Montérégie - Rapport de synthèse. Préparé par Géomont en collaboration avec Canards Illimités Canada, avril 2008, 28 p.

Giroux, M., Enright, P., Vézina, L., Royer, R. et Berrouard, A. (2002). Concentrations et charges d'azote et de phosphore perdues dans les drains souterrains selon les cultures et les modes de fertilisation. Québec, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. 33 p.

Globensky, Y. (1987) Géologie des Basses-terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, Rapport MM 85-02, 70 p., 1 carte au 250 000.

Gong, F. (2004) Analysis on different methods to fill in gaps in meteorological data. University of Waterloo, Ontario (for Natural Resources Canada, Canada Centre for Remote Sensing), 25 p.

Goode, D.J. (1996) Direct simulation of groundwater age. *Water Resources Research*, 32(2): 289-296.

Gordon, S. (2011) Sustainable groundwater management: Preliminary approach for assessing the sustainability of groundwater. Gordon Groundwater Consultancy, Report submitted to CCME, May 2, 2011. 41 p.

Gormly, J. R. et Spalding, R.F. (1979). Sources and concentrations of nitrate-nitrogen in ground water of the Central Platte Region, Nebraska. *Ground Water*, 17(3): 291-301.

Gosselin, J.-S., Rivard, C., Paniconi, C. et Martel, R. (2012) Critical evaluation of the use of superficial temperature measurements for recharge assessment, 39th IAH Congress, Niagara Falls, ON, September 16-21, 2012, poster.

Hamel, A, (2002) Détermination de la recharge des aquifères de roc fracturé du sud-ouest du Québec, M.Sc. Thesis, Université Laval, 288 pp.

Healy, R.W. (2010) Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press, United Kingdom, 245 p.

Healy, R.W. et Cook P.G. (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10: 91-109.

Hébert, S. (1997) Développement d'un indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau pour les rivières du Québec. In: Ministère de l'Environnement et de la Faune, D.d.é.a. (Ed.), Québec, pp. 20.

Hem, J.D. (1985) Study and interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, USGS, Alexandria, VA.

Heppner, C.S., Nimmo, J.R., Folmar, G.J., Gburek, W.J. et Risser, D.W. (2007) Multiple-methods investigation of recharge at a humid-region fractured rock site, Pennsylvania, USA. *Hydrogeology Journal*, 15: 915-927.

Hounslow, A.W. (1995) Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Lewis Publisher, Boca Raton, Florida, USA, 397 pp.

Institut de la statistique du Québec (2009) Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2006-2056 – Édition 2009. Gouvernement du Québec, Institut de la statistique

du Québec, Direction des statistiques sociodémographiques, juillet 2009, ISBN 978-2-550-56457-7,

Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) (2008) Feuillets pédologiques numériques. Données du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) et de l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA), échelle de numérisation : 1/20 000, échelle originale des données : variable, année de numérisation : 1998-2006, URL : www.irda.qc.ca.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) (2010) Études pédologiques. Documents pédologiques disponibles sur le site internet : www.irda.qc.ca/documents.

Jiang, X.-W., Wan, L., Ge, S., Cao, G.-L., Hou, G.-C., Hu, F.-S., Wang, X.-S., Li, H. et Liang, S.-H. (2012) A quantitative study on accumulation of age mass around stagnation points in nested flow systems. *Water Resources Research*, 48(12): W12502.

Jiang, X.-W., Wang, X.-S., Wan, L. et Ge, S. (2011) An analytical study on stagnation points in nested flow systems in basins with depth-decaying hydraulic conductivity. *Water Resources Research*, 47(1): W01512.

Jiang, X.-W., Wang, X.-S. et Wan, L. (2010) Semi-empirical equations for the systematic decrease in permeability with depth in porous and fractured media. *Hydrogeology Journal*, 18(4): 839-850.

Jyrkama, M.I., Sykes, J.F. et Normani, S.D. (2002) Recharge estimation for transient ground water modeling. *Ground Water* 40(6): 638-648.

Kendall, C. (1998). Tracing nitrogen sources and cycling in catchments. Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Ed. C. Kendall & J.J. McDonnell. Amsterdam, Elsevier, pp. 519-576.

Kendall, C. et Aravena, R. (2000). Nitrate isotopes in groundwater systems. Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. Ed. P.G. Cook & A.L. Herczeg. Kluwer Academic Publishers, pp. 261-297.

Knisel, W.G. (1980) CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report. No. 26, 643 p.

Ladevèze, P., Laurencelle, M., Lefebvre, R., Rouleau, A., Crow, H. et Rivard, C. (2013) Fracture systems controls on fluid flow in the regional sedimentary rock aquifer system of Montérégie Est, southern Québec, Canada, 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Montréal, QC, Canada.

Lafleur, J., Giroux, F. et Huot, M. (1987) Field permeability of the weathered Champlain clay crust. *Canadian Geotechnical Journal*, 24, 581-589 (1987).

Lamothe, M. (1989) A new framework for the Pleistocene stratigraphy of the central St. Lawrence Lowland, southern Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 43, 119-129.

Larocque, M. et Banton, O. (1995) Gestion de la contamination des eaux souterraines par les fertilisants agricoles : application du modèle AgriFlux. *Revue des Sciences de l'Eau*, 8: 3-21.

Laurencelle, M., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ladevèze, P., Beaudry, C., Carrier, M.-A. et Benoit, N. (2013) Modeling the evolution of a regional fractured-rock aquifer system in southern Quebec following the last deglaciation. 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Montréal, QC, Canada, 8 p.

Lavigne, M.A. (2006) Modélisation numérique de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Châteauguay. INRS Centre Eau-Terre-Environnement, Quebec, Canada, mémoire de maîtrise, 184 pp.

Lavigne, M.-A., Nastev, M. et Lefebvre, R. (2010a). Numerical simulation of groundwater flow in the Chateauguay River aquifers. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 469-486.

Lavigne, M.-A., Nastev, M., Lefebvre, R. et Croteau, A. (2010b) Regional sustainability of the Châteauguay River aquifers. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 487-502.

Lefebvre R., Maltais I., Paradis D. et Michaud Y. (2011) Recharge assessment from daily soil moisture balance and well hydrographs for the Portneuf unconfined aquifers. Proceedings, *Geohydro 2011*, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre-Eau Terre Environnement, Quebec City, Canada, 8 p.

Leonard, R.A., Knisel, W.G. et Still, D.A. (1987) GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *Trans. ASAE*, 30(5), 1403-1428.

Leroueil, S., Tavenas, F. et Lebihan, J.P. (1983) Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. *Revue canadienne de géotechnique*, 20-4, 681-705.

Lesperance, P.J. (1963) Région d'Acton, districts électoraux de Bagot, Shefford et Drummond. Ministère des ressources naturelles (MRN), Géologie Québec, SIGEOM, document public DP 677, carte 1, feuillet 31H10, échelle 1/50 000.

Lunne, T., Robertson, P.K. et Powell, J.J.M. (1997) Cone penetration testing in geotechnical practice. Spon Press, Taylor and Francis Group, New York, 312 p.

Mace, R.E. (2001) Estimating transmissivity using specific-capacity data. Geological Circular No. 01-2, Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, 7 p.

Magnan, J. (2006) Épandage postrécolte des engrais organiques et risques environnementaux reliés aux pertes d'azote. Montréal, Ordre des Agronomes du Québec. 75 p.

Martin, A., Bleser, J., Carrier, M.-A., Rivard, C. et Lefebvre, R. (2013) Évaluation d'indicateurs de gestion durable des eaux souterraines. Rapport préliminaire, OBV Yamaska et INRS-ETE, projet CCME réalisé pour le MDDEFP, transmis le 8 février 2013, 29 p.

McDonald, B.C. et Shilts, W.W. (1971) Quaternary stratigraphy and events in souththeastern Quebec. *Geological Society of America Bulletin*, 82, 683-698.

Mertens, J., Diels, J. et Feyen, J. (2007) Numerical analysis of passive capillary wick samplers prior to field installation. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 35-42.

Michaud, A.R., Desjardins, J., Coté, N., Beaudin, I., Drouin, A., Seydoux, S. et Saint-Laurent, I. (2012) Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport sommaire pour la période de référence 2009-2011, Version préliminaire Rapport réalisé dans le cadre du projet Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Institut de recherche et de développement en

agroenvironnement inc. (IRDA), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Québec, Canada. 87 pages et annexes.

Michaud, A., Desjardins, J., Lauzier, R. et Grenier, M. (2009a). Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et Aux Castors. Québec, Institut de recherche et développement en agroenvironnement: 27 p.

Michaud, A., Poirier, S.C., Desjardins, J., Grenier, M. et Saint-Laurent, I. (2009b). Évaluation des exportations de surface et souterraines de phosphore en sol drainé. Québec, IRDA: 41 p.

Michaud, A.R., Giroux, M., Beaudin, I., Desjardins, J., Gagné, G., Duchemin, M., Deslandes, J., Landry, C., Beaudet, P. et Lagacé, J. (2008a) ODEP; un Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada.

Michaud, A., Seydoux, S., Beaudin, I. et Gombault, C. (2008b) Combinaisons de pratiques de gestion bénéfiques et qualité de l'eau : Étude par modélisation hydrologique de deux bassins versants en Montérégie (Québec). Rapport final présenté à Environnement Canada. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA). 87 p. et annexes.

Michaud, A., Deslandes, J. et Beaudin, I. (2006) Modélisation de l'hydrologie et des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin-versant de la rivière aux Brochets à l'aide du modèle SWAT. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc., Québec, Qc.

Minet, E., Coxon, C.E., Goodhue, R., Richards, K.G., Kalin, R.M. et Meier-Augenstein, W. (2012). Evaluating the utility of ^{15}N and ^{18}O isotope abundance analyses to identify nitrate sources : A soil zone study. *Water Research*, 46(12): 3723-3736.

Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec (MAMROT) (2010a) Décret de population pour l'année 2011. Gouvernement du Québec, MAMROT décembre 2010, URL : www.mamrot.gouv.qc.ca/organisation-municipale/decret-de-population.

Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec (MAMROT) (2010b) Portrait provincial en aménagement du territoire. Gouvernement du Québec, MAMROT, base de données géospatiales distribuée en 2010.

Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec (MAMROT) (2010c) Localisation des immeubles. MAMROT, Direction du bureau municipal, de la géomatique et de la statistique, Mars 2010, 1 p.

Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) (2011a) Base de données sur les productions agricoles. Gouvernement du Québec, données tabulaires provenant du système de Gestion Intégrée des Ressources en Milieu Agricole (GIRMA) et distribuées en 2011.

Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) (2011b) Communications personnelles. Données de Plan d'accompagnement agroenvironnemental par sous-bassins versants.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2013) Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. Gouvernement du Québec, Direction des politiques de l'eau, URL : www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2012) Guide d'interprétation du Règlement sur la qualité de l'eau potable. Gouvernement du Québec, Direction des politiques de l'eau, 144 p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2011a) Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ). Gouvernement du Québec, Direction du Patrimoine Écologique et des Parcs, version préliminaire, base de données géospatiales distribuée en juin 2011.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2011b) Données du système de gestion des prélèvements d'eau (GPE). Gouvernement du Québec, Direction des politiques de l'eau, données distribuées en 2011.

Ministère du Développement durable, Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2011c) Répertoire des réseaux municipaux de distribution d'eau potable. Gouvernement du Québec, URL : www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/distribution.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2011d) Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA). Gouvernement du Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, données tabulaires distribuées en 2011.

Ministère du Développement durable, Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2011e) Répertoire des dépôts de sols et de résidus industriels. Gouvernement du Québec, URL : www.mddefp.gouv.qc.ca/sol/residus_ind.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2009) Système d'information hydrogéologique (SIH). Gouvernement du Québec, Direction des politiques de l'eau, base de données géospatiales distribuée en 2009.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2008a) Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires. Contribution 2003016 de la Commission Géologique du Canada, réalisée conjointement avec l'INRS-Géoressources (maintenant INRS-Eau, Terre et Environnement), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, la MRC de Portneuf et l'université Laval. Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51189-2 (pdf), 101 p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2008b) Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées. Commission Géologique du Canada, INRS-Eau, Terre et Environnement, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51190-8 (pdf), 162 p.

Ministère du Développement durable, Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (2006) Guide de conception des installations de production d'eau potable.

Gouvernement du Québec, MDDEFP, Direction des politiques de l'eau, URL : www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/guide.

Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) (1981) Étude hydrogéologique du bassin versant de la Richelieu. Direction générale des inventaires et de la recherche, Service des eaux souterraines, rapport E.E.-4, 129 p.

Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) (1984) Courbes bathymétriques du Réservoir Choinière. Gouvernement du Québec, Service des eaux de surface, carte C-9729.

Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1969) Courbes bathymétriques du Lac Brome. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte B-7276-1.

Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1970) Courbes bathymétriques du Lac Waterloo. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-7406.

Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1973a) Courbes bathymétriques du Lac Argent. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-7770.

Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1973b) Courbes bathymétriques du Lac Orford. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-7763.

Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1974) Courbes bathymétriques du Lac Trousers. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-7876.

Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1975) Profondeurs du Lac Boivin. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-7966.

Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1978) Étude hydrogéologique du bassin versant de la Yamaska. Service des eaux souterraines, rapport E.B.-3, 63 p.

Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) (2003) Système d'information écoforestière (SIEF). Gouvernement du Québec, Direction des inventaires forestiers, échelle 1/20 000, fichiers en format shapefile distribués en juin 2010.

Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) (2005) Affleurements de compilation. Gouvernement du Québec, Direction générale de l'information géographique, extrait de base de données géospatiales datant de 2005 et distribué en 2009.

Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) (2008a) Système d'informations géominières du Québec (SIGEOM). Gouvernement du Québec, Direction générale de l'information géographique, extrait de base de données géospatiales distribué en 2008.

Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) (2008b) Base de données géochimiques du Québec (BADGEQ). Gouvernement du Québec, Direction générale de l'information géographique, données tabulaires distribuées en 2008.

Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) (2009) Cahier de géofiche. Gouvernement du Québec, Direction générale de l'information géographique, rapport DV 2009-04, 9 p.

Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) (2010) Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG). Gouvernement du Québec, Direction du bureau des hydrocarbures, extrait de base de données tabulaires distribué en 2010.

Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) (2012a) Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA) à l'échelle 1/20 000. Gouvernement du Québec, Direction générale de l'information géographique, base de données géospatiales distribuée en mai 2012.

Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) (2012b) Base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT) à l'échelle 1/100 000. Gouvernement du Québec, Direction générale de l'information géographique, base de données géospatiales distribuée en mai 2012.

Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche (MTCP) (1967a) Baie Missisquoi – Lac Champlain. Gouvernement du Québec, Service de d'Aménagement de la Faune, carte bathymétrique.

Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche (MTCP) (1967b) Rivière Richelieu - Bassin de Chambly. Gouvernement du Québec, Service de d'Aménagement de la Faune, carte bathymétrique.

Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche (MTCP) (1969) Lac Selby. Gouvernement du Québec, Service de la Faune, carte bathymétrique.

Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche (MTCP) (1970) Lac Davignon (Lac Cowansville). Gouvernement du Québec, Service de d'Aménagement de la Faune, carte bathymétrique.

Ministère des Transports du Québec (MTQ) (2009) Bases de données géotechniques. Ministère des Transports du Québec (MTQ), Service de la géotechnique et de la géologie, extraits des bases de données BDG, ForLog et Geotech distribués en 2009.

Ministère des Transports du Québec (MTQ) (2011) Glissement de terrain du 10 mai 2010, Saint-Jude, Montérégie - Rapport sur les caractéristiques et les causes. Ministère des Transports du Québec (MTQ), Service de la géotechnique et de la géologie, Rapport MT11-01, novembre 2011, 123 p.

Molson, J. et Frind, E.O. (2010) FLONET/TR2 User Guide - Two-Dimensional Groundwater Flownet and Contaminant Transport Model, version 3.0 (February 2010). University of Waterloo. (available at http://www.science.uwaterloo.ca/~molson/).

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3):885-900.

Morin, R., Godin, R., Nastev, M. et Rouleau, A. (2007) Hydrogeologic controls imposed by mechanical stratigraphy in layered rocks of the Chateauguay River Basin, a US-Canada transborder aquifer. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 112(B4): 12.

Nastev, M., Lefebvre, R., Rivera, A. et Martel, R. (2006) Quantitative assessment of regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada. *Water Resources Management*, 20 (1), 1-18.

Natural Ressources Conservation Service (NRCS) (2010) Ranges of AWC in Relation to Soil Texture and Organic Matter. Document disponible en ligne, site internet consulté en juillet 2010: www.mo10.nrcs.usda.gov/references

Neitsch, S. L., Arnold, J.G., et Srinivasan, R. (2002a) Pesticides fate and transport predicted by the Soil and Water Assessment tool (SWAT) : Atrazine, Metolachlor and Trifluralin in the Sugar Creek Watershed. Grassland, Soil & Water Research Laboratory, USDA-ARS, Blackland Research Center, Texas, BRC Publication No. 2002-03, 96 p.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., William, J.R. et King, K.W. (2002b) Soil and Water Assessment tool Theoretical Documentation. Grassland, Soil & Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas, 458 p.

OBVBM (2011) Plan directeur de l'eau - Portrait du bassin versant de la baie Missisquoi. Organisme de bassin versant de la baie Missisquoi (OBVBM), document no. 3, mars 2011, 190 p.

O'Callaghan, J.F. et Mark, D.M. (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 323-344 (1984).

Parent, M. et Occhietti, S. (1988) Late Wisconsinan deglaciation and Champlain Sea invasion in the St. Lawrence Valley, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 42, 215-246.

Pedosphere (2009) weather.nmsu.edu/Teaching_Material/soil456/soilwater.html

Peel, M. C., Finlayson, B.L. et McMahon, T. A. (2007) Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Science Journal*, 11, 1633–1644.

Poirier, C., Fortier-Filion, T.-C., Turcotte, R. et Lacombe, P. (2012). Apports verticaux journaliers estimés de 1900 à 2010 – Version 2012. Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique, contribution au Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES), 112 p.

Poirier, C. (2012) Estimation préliminaire des débits de base à des sites de stations hydrométriques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique, contribution au Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES), données numériques identifiées sous la version beta_v2 2012-10-02.

Pontlevoy, O. (2004) Modélisation hydrogeologique pour supporter la gestion du systeme aquifère de la région de Ville-Mercier. M.Sc. Thesis, Institut National de la Recherche Scientifique - Eau, Terre et Environnement, Québec, 98 pp.

Posavec K., Bačani A. et Nakić Z. (2006) A visual basic spreadsheet macro for recession curve analysis. *Ground Water*, 44: 764-767.

Prichonnet, G. (1984) Étude quaternaire de la région de Granby, Québec. Commission géologique du Canada, étude 83-30, 8 pages.

Priest, S.D. (1993) Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, London.

Publications du Québec (2003) Guide de caractérisation des terrains. Ministère de l'Environnement du Québec, publié en 2003, 130 p.

Pugin, A.J.-M., et Pullan, S.E. (2013) High-resolution Shallow Seismic Reflection Profiles for Groundwater Studies in the Montérégie region, east of Montreal, Quebec; Geological Survey of Canada, Open File 7346, 15 p and 11 plates. doi:10.4095/292393.

Pugin, A.J.-M., Pullan, S.E. et Duchesne, M.J. (2013) Regional hydrostratigraphy and insights into fluid flow through a clay aquitard from shallow seismic reflection data. *The Leading Edge*, July 2013, 742-748.

Pugin, A.J-M., Pullan, S.E. et Hunter, J.A. (2009) Multicomponent high-resolution seismic reflection profiling. *The Leading Edge*, 28 (10): 1248-1261.

R Core Team (2013) R: A Language and Environment for Statistical Computing, version 2.15.3 (2013-03-01). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (available at http://www.R-project.org).

Roller, K. et Trepmann, C.A. (2011) Stereo 32 Software. Ruhr Universitat Bochum, Bochum, Germany.

Rousseau, A.N., Mailhot, A., Slivitzky, M., Villeneuve, J.-P., Rodriguez, M.J. et Bourque, A. (2004) Usages et approvisionnement en eau dans le sud du Québec - Niveau des connaissances et axes de recherche à privilégier dans une perspective de changements climatiques. *Canadian Water Resources Journal*, 29(2): 121-134.

Roy, D.W., Verreault, N. et Pino, D.S. (2011) Correction de Terzaghi, Graduated Course, Analyse Structurale, Université du Québec à Chicoutimi.

Sanford, W. (2010) Calibration of models using groundwater age. *Hydrogeology Journal*, 19, 13-16.

Sangrey, D.A, Harrops-Williams, K.O. et Klaiber, J.A. (1984) Predicting groundwater response to precipitation. *ASCE Journal Geotechnical Engineering*, 110(7): 957-975.Santé Canada (2012) Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada - Tableau sommaire. Santé Canada, Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Ottawa, Ontario, 24 p.

Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R. et Hauck, L.M. (2001) Validation of the SWAT Model on a Large River Basin With Point and Nonpoint Sources, AWRA No. 00044, 37(5), 1169-1188.

Scanlon, B.R., Healy, R.W. et Cook, P.G. (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 18-39.

Schroeder, P.R., Aziz, N.M., Lloyd, C.M. et Zappi, P.A. (1994) The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering documentation for version 3. EPA/600/R-94/168b. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C., 126 pp.

Sejourne, S. et Malo, M. (2007) Pre-, syn- and post-imbrication deformation of carbonate slices along the southern Quebec Appalachian front – Implications for hydrocarbon exploration. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 44: 543-564.

Séjourné, S., Lefebvre, R., Malet, X. et Lavoie, D. (2013) Synthèse géologique et hydrogéologique du Shale d'Utica et des unités sus-jacentes (Lorraine, Queenston et dépôts meubles), Basses-Terres du Saint-Laurent, Province de Québec. Commission géologique du Canada, Dossier Public 7338, 163 p.

Simoneau, M. (1993) Qualité des eaux de la rivière Richelieu, 1979-1991. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la qualité des cours d'eau, envirodoq no EN930016, rapport no QEN/QE-83-1, 180 p., 6 annexes.

Simoneau, M. et Thibault, G. (2009) État de l'écosystème aquatique du bassin versant de la rivière Richelieu : faits saillants 2005-2007. Gouvernement du Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-56454-6 (fichier pdf), 23 p.

Slivitzky, A. et St-Julien, P. (1987) Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, Rapport MM 85-04, 48 p., 1 carte au 250 000.

Société de l'eau souterraine d'Abitibi-Témiscamingue (SESAT) (2010) Gouvernance des eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue - État de situation 2010. Décembre 2010, 262 p.

Soilmoisture Equipment Corp. (2010) Model 2800K1 Guelph Permeameter. Operating Instructions. Soilmoisture Equipment Corp, Santa Barbara, California, 52 p.

Spoelstra, J., Schiff, S.L., Hazlett, P.W., Jeffries, D.S. et Semkin, R.G. (2007). The isotopic composition of nitrate produced from nitrification in a hardwood forest floor. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 3757-3771.

Srinivasan, R. (2000) Hydrologic unit model for the United States (Humus), Texas Agricultural Experiment Station, Blackland Research Center, Internet: srph.brc.tamus.edu/hamus

Stones Environmental (2011) Identification of critical source area of phosphorus within the Vermont sector of the Missisquoi Bay Basin. Final Report. Stone Project ID 092156-G, December 2001. 242p.

Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G. et Rompré, M. (1990) Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec – Région agricole 6, Richelieu, Saint-Hyacinthe. Gouvernement du Québec, Publication no. 91-0025. Québec, Canada, 199 p.

Tallaksen, L.M. (1995) A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165: 349-370.

TechnoRem (2008) Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des MRC Les Maskoutains, Rouville et Brome-Missisquoi - Montérégie Est. Projet réalisé dans le cadre du Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ), rapport PR07-30, mars 2008, 339 p.

Terzaghi, R.D. (1965) Sources of error in joint surveys. Geotechnique, 15 (3): 287-304.

Theis, C.V., Brown, R.H. et Meyer, R.R. (1963) Estimating the transmissibility of aquifers from the specific capacities of wells. In: Bentall, R. (Ed.), Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown. U.S.G.S. Water-Supply Paper 1536-I, pp. 331-341.

Thériault, R. (2013) Identification des sources de nitrate et des facteurs contrôlant sa distribution dans les sols agricoles et les eaux souterraines des bassins versant Ewing et Walbridge (Montérégie Est), Institut national de recherche scientifique, Québec, 163 pp.

Tremblay, L., Lefebvre, R., Paradis, D. et Gloaguen, E. (2013) Conceptual model of leachate migration in a granular aquifer from the integration of detailed characterization data. HJ-2012-2516, accepté pour publication le 3 août 2013 par *Hydrogeology Journal*.

UNESCO (2002) A methodological guide – Groundwater contamination inventory. Alexander Zaporozec, IHP-VI, Series on Groundwater No. 2, International Hydrological Programme within Project 3.1., 160 pages.

United States Department of Agriculture (USDA) (1972) National Engineering Handbook - Hydrology section – Chapters 4 – 10. USDA Soil Conservation Service publication, 79 p.

United States Department of Agriculture (USDA) (2003) Vermont Watershed and Subwatershed hydrologic unit boundaries. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, vector digital data set based on 1/24 000 scale topographic quadrangle and Digital Raster Graphic images, available through Vermont Center for Geographic Information (vcgi.vermont.gov).

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (1991) Managing groundwater contamination sources in wellhead protection areas : a priority setting approach. EPA Office of Water – WH-550, EPA 570/9-91-023, 286 pages.

United States Geological Surveu (USGS) (2011) Surface Water Annual Statistics - 04294000 Missisquoi river at Swanton, VT. Unites States Geological Survey (USGS), Water Resources Data, available through National Water Information System (waterdata.usgs.gov/nwis).

Vigneault, H., Paradis, D., Ballard, J.-M. et Lefebvre, R. (2007) Numerical modelling of the evolution of groundwater nitrate concentrations under various Climate Change scenarios and agricultural practices for Prince Edward Island. In Savard, M.M. & Somers, G., ed., Consequences of climatic changes on contamination of drinking water by nitrates on Prince-Edward-Island, Geological Survey of Canada, Agriculture and Agri-Food Canada, PEI Environment, Energy & Forestry, Report to Natural Resources Canada, Climate Change Action Fund: Impacts & Adaptation, Contribution A881/A843, March 20, 2007, 93-109.

Vrba, J. et Lipponen, A., ed. (2007) Groundwater Resources Sustainability Indicators. Groundwater Indicators Working Group, UNESCO, IAEA, IAH, IPH-VI Series on Groundwater No. 14.

Williams, H. (1979) Appalachian Orogen in Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16 : 792-807.

Williams, J.R., Nicks, A.D. et Arnold, J.G. (1985) Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(6): 970-986.

Williams, J.R., Jones, C.A. et Dyke, P.T. (1984) A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE*, 27(1), 129-144.

Annexe 1 :
Atlas hydrogéologique

Annexe 1 - Liste des cartes de l'atlas hydrogéologique (échelle 1/500 000)

Cartes générales

Localisation
Précipitations annuelles moyennes
Température moyenne annuelle

Livrables PACES

Topographie
Routes, limites administratives et toponymie
Modèle altimétrique numérique
Pente du sol
Hydrographie
Limites de bassins et sous-bassins
Occupation du sol
Couverture végétale
Milieux humides
Affectation du territoire
Pédologie
Géologie des formations superficielles - Légende
Géologie des formations superficielles
Géologie simplifiée du roc - Légende
Géologie simplifiée du roc
Coupe stratigraphique simplifiée des formations quaternaires
Coupes geologiques conceptuelles du roc
Épaisseur totale des dépôts meubles
Épaisseur des dépôts meubles – Sédiments argileux
Épaisseur des dépôts meubles – Sédiments sous-jacents à l'argile
Épaisseur des dépôts meubles – Sédiments sus-jacents à l'argile
Topographie du roc
Conditions de confinement
Contextes hydrogéologiques
Piézométrie dans les dépôts meubles
Piézométrie de l'aquifère régional de roc fracturé
Paramètres hydrauliques – Conductivité hydraulique
Vulnérabilité de l'aquifère régional de roc fracturé (drastic)
Indice de densité des activités anthropiques
Qualité de l'eau souterraine (critères pour l'eau potable) - Arsenic
Qualité de l'eau souterraine (critères pour l'eau potable) - Baryum
Qualité de l'eau souterraine (critères pour l'eau potable) - Chrome
Qualité de l'eau souterraine (critères pour l'eau potable) - Fluorure
Qualité de l'eau souterraine (critères pour l'eau potable) - Nitrate

Annexe 1 - Liste des cartes de l'atlas hydrogéologique (échelle 1/500 000) (suite)

Qualité de l'eau souterraine (critères pour l'eau potable) - Uranium

Compilation historique des concentrations en nitrates ($N\text{-}NO_3$) dans l'aquifère de roc fracturé

Compilation historique des concentrations en nitrates ($N\text{-}NO_3$) dans les aquifères granulaires

Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques) – Matières dissoutes totales

Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques) – Chlorure

Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques) – Sodium

Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques) – Fer

Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques) – Manganèse

Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques) – Dureté

Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques) – Sulfate

Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques) – Sulfure

Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques) – pH

Utilisation de l'eau - Approvisionnement

Utilisation totale d'eau par MRC

Utilisation de l'eau souterraine par MRC

Zones potentielles de recharge et de résurgence préférentielles de l'aquifère régional de roc fracturé

Recharge distribuée pour l'aquifère régional de roc fracturé

Cartes complémentaires

Bilan hydrologique par contexte

Bilan hydrologique par MRC

Bilan hydrologique par bassin

Indicateurs relatifs à la gestion des ressources en eau souterraine

Modèles conceptuels

Localisation

Contexte géologique – Secteur des Appalaches externes (piedmont) et de la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (basses-terres)

Conditions d'écoulement – Secteur des Appalaches externes (piedmont) et de la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (basses-terres)

Vulnérabilité et qualité d'eau – Secteur des Appalaches externes (piedmont) et de la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (basses-terres)

Contexte géologique – Secteur de la Plate-forme du Saint-Laurent (basses-terres) à travers le mont Rougemont

Conditions d'écoulement – Secteur de la Plate-forme du Saint-Laurent (basses-terres) à travers le mont Rougemont

Vulnérabilité et qualité d'eau – Secteur de la Plate-forme du Saint-Laurent (basses-terres) à travers le mont Rougemont

Annexe 2 :
Cartes thématiques

Annexe 2 - Liste des cartes thématiques (échelle 1/100 000)

Livrable 01: Topographie
Livrable 02: Routes, limites administratives et toponymie
Livrable 03: Modèle altimétrique numérique
Livrable 04: Pente du sol
Livrable 05: Hydrographie
Livrable 06: Limites de bassins et sous-bassins
Livrable 07: Occupation du sol
Livrable 08: Couverture végétale
Livrable 09: Milieux humides
Livrable 10: Affectation du territoire
Livrable 11: Pédologie
Livrable 12: Géologie des formations superficielles
Livrable 13: Géologie du roc
Livrable 14: Coupes stratigraphiques simplifiées des formations quaternaires
Livrable 15: Épaisseur totale des dépôts meubles
Livrable 16: Topographie du roc
Livrable 17: Conditions de confinement
Livrable 18: Contextes hydrogéologiques
Livrable 20: Piézométrie de l'aquifère régional de roc fracturé
Livrable 21: Paramètres hydrauliques – Conductivité hydraulique
Livrable 22: Vulnérabilité de l'aquifère régional de roc fracturé (DRASTIC)
Livrable 23: Indice de densité des activités anthropiques
Livrable 24: Qualité de l'eau souterraine (critères pour l'eau potable)
Livrable 25: Qualité de l'eau souterraine (critères esthétiques)
Livrable 26: Utilisation de l'eau - Approvisionnement
Livrable 27: Stations météorologiques, hydrométriques et puits d'observation
Livrable 28A: Zones potentielles de recharge et de résurgence préférentielles de l'aquifère régional de roc fracturé
Livrable 28B: Recharge distribuée pour l'aquifère régional de roc fracturé

Annexe 3 :
Protocoles méthodologiques

Annexe 3 - Liste des protocoles méthodologiques

Protocole de numérisation et d'archivage des documents compilés

Protocole sur la validation et la fiabilité des données de forage

Protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine

Protocole pour la préparation du livrable 04 - Pente

Protocole pour la préparation du livrable 11 - Pédologie

Protocole pour la préparation du livrable 14 - Coupes stratigraphiques

Protocole pour la préparation des livrables 15 et 16 - Épaisseur des dépôts meubles et Topographie du roc

Protocole pour la préparation des livrables 19 et 20 - Piézométrie

Protocole pour la préparation du livrable 21 - Propriétés hydrogéologiques

Protocole pour la préparation du livrable 22 - Vulnérabilité

Protocole pour la préparation du livrable 23 - Activités anthropiques

Protocole pour la préparation des livrables 24 et 25 - Qualité de l'eau souterraine

Protocole pour la préparation du livrable 26 - Utilisation d'eau

Annexe 4 :
Résultats des travaux de terrain

Annexe 4 - Liste des résultats de terrain

Certificats des analyses chimiques
Diagraphies (campagne de la CGC)
Diagraphies (campagne de l'USGS)
Hydrogrammes de puits
Journaux de forages conventionnels
Journaux de forages rotosonic
Journaux de forages rotosonic avec analyses XRF
Journaux de sondages CPT
Journaux de sondages RPSS
Levés sismiques

Annexe 5 :
Description des champs et librairies de la base de données

Annexe 6 :
Estimés d'utilisation d'eau à l'échelle municipale

Annexe 7 :
Liste des activités anthropiques sélectionnées