

Rapport final (version révisée)

**Portrait des ressources en eau souterraine en
Chaudière-Appalaches, Québec, Canada**

Déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les
changements climatiques, dans le cadre du
Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines

Par

Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement,
Institut de recherche et développement en agroenvironnement et
Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches

Rapport de recherche INRS R-1580

Mars 2015

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 et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). 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:

Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Vigneault, H., Beaudry, C., Berthot, L., Légaré-Couture, G., Parent, M., Laurencelle, M., Malet, X., Therrien, A., Michaud, A., Desjardins, J., Drouin, A., Cloutier, M.H., Grenier, J., Bourgault, M.-A., Larocque, M., Pellerin, S., Graveline, M.-H., Janos, D. et Molson, J. (2015) Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Rapport final INRS R-1580, soumis au MDDELCC en mars 2015.

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 les cartes ou des données y étant rattachées.

Pour nous joindre:



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 d'un projet réalisé conjointement par le Centre Eau Terre Environnement de l'INRS (INRS-ETE), par l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et par le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA). Le *Projet d'acquisition de connaissances sur l'eau souterraine en Chaudière-Appalaches* a été supporté financièrement par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), par la Conférence régionale des élus (CRÉ) de la Chaudière-Appalaches et par l'IRDA ainsi que par des contributions en nature des organismes partenaires du projet. Les travaux réalisés s'intègrent dans le *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines* (PACES) du MDDELCC. 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 région d'étude couvre la Chaudière-Appalaches (14 600 km²), excluant toutefois Lévis qui a été couvert par le projet PACES de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). Huit (8) des neuf (9) municipalités régionales de comté (MRC) et la Conférence régionale des élus (CRÉ) de la Chaudière-Appalaches sont partenaires du projet. Ce territoire couvre, en tout ou en partie, les territoires de six (6) OBV qui sont aussi partenaires du projet.

La compilation des données existantes a permis d'extraire de l'information sur près de 30 000 puits à partir du Système d'information hydrogéologie (SIH) du MDDELCC. Des données ont aussi été extraites de plus de 350 rapports obtenus des municipalités et des agences gouvernementales. Les données existantes ont été complétées par des levés de terrain ciblés. La foreuse de l'INRS a permis de faire 11 sondages au piézocône et 24 sondages par rotoperçusion ainsi que l'installation de 19 puits d'observation de petit diamètre (2.5 cm) dans les dépôts meubles. De plus, une foreuse conventionnelle a été utilisée pour installer neuf (9) puits de 150 mm (6 po) de diamètre ouverts au roc qui complètent les 20 puits déjà existants du réseau de suivi du MDDELCC dans la région d'étude. Des essais hydrauliques ont été réalisés dans les nouveaux puits d'observation. Une campagne d'échantillonnage d'eau souterraine a permis de récolter 125 échantillons provenant principalement de puits résidentiels. Ces échantillons ont été analysés principalement pour les ions majeurs et mineurs, ainsi que les gaz dissous (méthane) et plusieurs isotopes (²H, ¹⁸O, ³He, ¹⁴C) pour un sous-groupe représentatif. Plus de 260 autres analyses chimiques ont été obtenues d'études antérieures ou en voie de réalisation dans la région d'étude.

La province géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent couvre une étendue restreinte dans la moitié nord-ouest de la MRC de Lotbinière, alors que le reste de la région fait partie des Appalaches, incluant les zones de Humber interne et externe, la zone de Dunnage et la ceinture de Gaspé. Le roc fracturé représente un aquifère régional continu, alors que des aquifères granulaires d'étendue restreinte se retrouvent par endroits dans les dépôts meubles. Sur la base de la physiographie et de la nature des dépôts meubles, trois contextes hydrogéologiques peuvent être définis dans la région d'étude : 1) basses-terres du St-Laurent, 2) vallées appalachiennes, et 3) hautes-terres appalachiennes. Les basses-terres du St-Laurent se retrouvent sur une bande ayant 10 à 30 km de largeur en bordure du fleuve St-Laurent. On y retrouve une topographie de bas plateau qui a été recouvert par la Mer de Champlain, ce qui fait qu'on y retrouve d'épaisses accumulations de sédiments à grains fins (plus de 10 m). Au sud des basses-terres, on retrouve une topographie de collines, montagnes et vallées. Les hautes-terres appalachiennes ne sont généralement recouvertes que d'une mince couche de till relativement perméable, ce qui en fait une vaste zone de recharge préférentielle de l'aquifère régional. Les vallées appalachiennes peuvent être comblées d'épaisseurs importantes de sédiments (plus de 15 m) mais leur potentiel aquifère est généralement faible. Toutefois, on retrouve par endroits des sédiments fluvioglaciaires qui peuvent avoir un potentiel aquifère local. La conductivité hydraulique décroît avec la profondeur et les puits montrent des valeurs très variables, étant généralement de l'ordre de 10⁻⁸ à 10⁻⁵ m/s. Globalement, la recharge de l'aquifère rocheux est de 166 mm/an, avec des valeurs distinctes pour les hautes-terres appalachiennes (186 mm/an), les

vallées appalachiennes (192 mm/an) et les basses-terres du St-Laurent (85 mm/an). La vulnérabilité suit généralement la même tendance, mais elle n'atteint généralement pas un niveau absolu élevé.

L'agriculture occupe 27% du territoire et se retrouve surtout dans les basses-terres du St-Laurent et les vallées appalachiennes, alors que 65% du territoire est forestier. L'usage total annuel de l'eau dans la région d'étude a été évalué à 109 million de m³, dont 42% provenait de l'eau souterraine. Globalement, les usages résidentiel (38%), agricole (32%) et industriel-commercial-institutionnel (30%) sont équilibrés, mais il y a des variations importantes entre les MRC. En tout, 36% de la population totale de la région d'étude, qui s'élève à 278 180 personnes (sans Lévis), s'alimente en eau à partir d'un puits privé, alors que le reste de la population est desservie par un réseau d'aqueduc municipal ou privé (20 personnes et plus). 60% des réseaux municipaux sont approvisionnés par de l'eau souterraine grâce à plus de 300 puits d'approvisionnement en eau. Bien que l'eau souterraine soit généralement de bonne qualité, on y retrouve localement certains éléments naturels à des concentrations excédant les normes de potabilité de l'eau de consommation (F, Ba, As). Sept (7) types d'eau ont été définis sur la base des proportions des ions majeurs. Certains de ces types d'eau représentent l'évolution géochimique naturelle de l'eau souterraine. Toutefois, d'autres types d'eau semblent indiquer une dégradation anthropique de la qualité de l'eau souterraine qui pourrait être reliée à différentes activités, telles que l'agriculture, le sel déglaçant ou les eaux usées. Les concentrations associées à ces types d'eau n'excèdent généralement pas les normes de potabilité. La présence de fortes concentrations en nitrite-nitrates est généralement associée à l'agriculture mais, malgré l'importance de ces activités en Chaudière-Appalaches, un seul échantillon a présenté des concentrations excédant le critère de potabilité et les concentrations atteignent rarement des niveaux importants. Dans la partie nord-ouest de la région à l'intérieur de la zone prospective pour le gaz de shale, 44 (59%) des 74 échantillons d'eau analysés ont montré des concentrations en méthane quantifiables. Onze (11) échantillons (15%) ont présenté des concentrations excédant le seuil d'alerte de 7 mg/L. Le méthane n'a pas d'incidence sur la santé. Ce méthane est d'origine biogénique prédominante, c'est-à-dire qu'il a été formé en place à faible profondeur.

En plus des livrables prévus par le PACES, des travaux spécifiques ont été réalisés par des étudiants de 2^e et 3^e cycles sur des thèmes d'intérêt pour les ressources en eau souterraine de la région. Les résultats initiaux de ces travaux sont documentés dans le présent rapport. Ces travaux comprennent la cartographie des sédiments superficiels et la définition des événements géologiques au Quaternaire, l'étude des milieux humides présents dans la zone du Chêne et de leur interaction avec les eaux souterraines, la modélisation de l'écoulement régional et de l'évolution géochimique de l'eau souterraine, et la modélisation hydrologique de l'écoulement de l'eau de surface ainsi que de la recharge des nappes.

Enfin, le projet PACES en Chaudière-Appalaches a fourni les connaissances requises pour assurer la bonne gouvernance de l'eau souterraine. Une section du rapport met en relation les préoccupations sur les eaux souterraines exprimées par les acteurs de la région et l'éclairage apporté sur ces préoccupations par les connaissances acquises dans le cadre du présent projet. 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 et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) ainsi que tous les organismes partenaires du projet pour leurs contributions de même que leur collaboration à la collecte de d'information données au cours du projet. Plus particulièrement, nous voulons souligner la contribution financière de la CRÉ de la Chaudière-Appalaches et les contributions en ressources humaines des organismes partenaires suivants :

- les municipalités régionales de comté (MRC) suivantes : Lotbinière, La Nouvelle-Beauce, Robert-Cliche, Beauce-Sartigan, Bellechasse, Les Etchemins, Montmagny et L'Islet
- les organismes de bassins versants (OBV) partenaires du projet : OBV de la zone du Chêne, Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC), Conseil de bassin de la rivière Etchemin (CBE), OBV de la Côte-du-Sud, Groupe de concertation des bassins versants de la zone Bécancour (GROBEC), OBV du fleuve Saint-Jean, et Conseil de la gouvernance de l'eau des bassins de la rivière Saint-François (COGESAF)

Les auteurs veulent également remercier les organismes suivants de leur appui au projet :

- les Fédérations de l'Union des producteurs agricoles (UPA) de la Chaudière-Appalaches (Lotbinière-Mégantic, Lévis-Bellechasse, Beauce, Côte-du-Sud)
- le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) - Direction régionale de la Chaudière-Appalaches

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

- le ministère des Transports du Québec (MTQ)
- le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN)
- le ministère du Développement durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MDDELCC) - Direction régionale de la Chaudière-Appalaches
- le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)
- la Commission régionale sur les ressources naturelles et le territoire (CRRNT) de la Chaudière-Appalaches
- l'Université Laval
- l'Université du Québec à Montréal
- le Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES)
- 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

Nous tenons aussi à remercier nos collaborateurs scientifiques :

- Dr. Christine Rivard, Commission géologique du Canada (CGC), responsable du projet réalisé dans la région de Saint-Édouard-de-Lotbinière dans le cadre duquel nous avons échangé des données
- Dr. John Molson, Université Laval, qui a encadré le projet de maîtrise de Debora Janos sur la modélisation de l'écoulement régional et de la géochimie de l'eau souterraine
- Dr. Marie Larocque, UQAM, qui a encadré le projet de doctorat de Marc-André Bourgault sur les échanges entre les milieux humides en tête de bassin et les eaux souterraines

Enfin, nous remercions les résidents de la Chaudière-Appalaches ainsi que les municipalités qui ont collaboré au projet en donnant accès à leur propriété ou à leur puits, afin de réaliser des travaux de terrain.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte du projet	1
1.2	Objectifs du projet PACES Chaudière-Appalaches	2
1.3	Contenu et structure du rapport	2
1.4	Équipe de réalisation et partenaires.....	3
1.5	Présentation du territoire à l'étude	5
1.5.1	<i>Localisation</i>	<i>5</i>
1.5.2	<i>Description du milieu naturel.....</i>	<i>8</i>
1.5.3	<i>Population et territoire.....</i>	<i>31</i>
2	ACQUISITION DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION	37
2.1	Compilation de l'information existante	37
2.1.1	<i>Acquisition de bases de données existantes</i>	<i>37</i>
2.1.2	<i>Acquisition de données géomatiques existantes.....</i>	<i>38</i>
2.1.3	<i>Acquisition de séries de données existantes</i>	<i>38</i>
2.1.4	<i>Acquisition de données à partir des documents existants.....</i>	<i>39</i>
2.1.5	<i>Faits saillants de la collecte</i>	<i>40</i>
2.2	Travaux de caractérisation.....	42
2.2.1	<i>Cartographie des formations superficielles</i>	<i>43</i>
2.2.2	<i>Sondages au piézocône (CPT).....</i>	<i>46</i>
2.2.3	<i>Forages conventionnels.....</i>	<i>47</i>
2.2.4	<i>Installation de capteurs de pression.....</i>	<i>49</i>
2.2.5	<i>Essais de perméabilité.....</i>	<i>50</i>
2.2.6	<i>Levés de sismique réflexion.....</i>	<i>51</i>
2.2.7	<i>Échantillonnage d'eau souterraine</i>	<i>53</i>
2.3	Saisie, validation et archivage des données	59
2.3.1	<i>Développement de la base de données à référence spatiale.....</i>	<i>59</i>
2.3.2	<i>Vérification et validation des données.....</i>	<i>62</i>
3	CONTEXTES GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES	69
3.1	Géologie du socle rocheux	69
3.1.1	<i>Histoire géologique.....</i>	<i>69</i>
3.1.2	<i>Stratigraphie et lithologies</i>	<i>71</i>
3.1.3	<i>Tectonique et structure</i>	<i>74</i>
3.2	Géologie du Quaternaire	76
3.2.1	<i>Description de la carte des formations superficielles</i>	<i>76</i>
3.2.2	<i>Histoire du Quaternaire.....</i>	<i>78</i>
3.2.3	<i>Stratigraphie et distribution des sédiments du Quaternaire.....</i>	<i>80</i>
3.2.4	<i>Architecture des sédiments.....</i>	<i>81</i>
3.2.5	<i>Couverture de dépôts meubles.....</i>	<i>83</i>
3.3	Conditions de confinement	90
3.4	Contextes hydrogéologiques	93
4	CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES	95
4.1	Propriétés hydrauliques	95

4.1.1	<i>Méthodologie d'analyse</i>	95
4.1.2	<i>Résultats de l'analyse des propriétés hydrauliques</i>	99
4.2	Piézométrie et écoulement	104
4.3	Recharge et bilan hydrologique	106
4.4	Zones de recharge et de résurgence	109
4.5	Vulnérabilité des nappes	112
4.6	Géochimie de l'eau souterraine	118
4.6.1	<i>Travaux, objectifs et méthodologie</i>	118
4.6.2	<i>Définition et nature des groupes d'eau</i>	118
4.6.3	<i>Implications sur la dynamique du système aquifère</i>	136
4.7	Synthèse des conditions hydrogéologiques	137
5	RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE	143
5.1	Sources d'approvisionnement et potentiel d'exploitation	143
5.1.1	<i>Sources d'approvisionnement en eau municipale</i>	143
5.1.2	<i>Propriétés hydrauliques des puits municipaux</i>	145
5.2	Usage des ressources en eau souterraine	148
5.2.1	<i>Sources et traitement des données</i>	148
5.2.2	<i>Approche générale</i>	149
5.2.3	<i>Portrait de l'utilisation d'eau en Chaudière-Appalaches</i>	150
5.3	Activités potentiellement polluantes	159
5.4	Qualité de l'eau	161
5.4.1	<i>Qualité de l'eau souterraine</i>	161
5.4.2	<i>Qualité de l'eau de surface</i>	169
5.5	Gestion durable des ressources en eau souterraine	176
5.5.1	<i>Principes de gestion durable</i>	176
5.5.2	<i>Préoccupations régionales et état des ressources en eau souterraine</i>	184
5.6	Réseau de surveillance	189
5.6.1	<i>Réseau de puits d'observation</i>	189
5.6.2	<i>Stations hydrométriques</i>	191
5.6.3	<i>Stations météorologiques</i>	191
6	TRAVAUX SPÉCIFIQUES	192
6.1	Cartographie des dépôts meubles à l'aide du LiDAR	192
6.2	Étude des milieux humides dans la zone du Chêne	194
6.2.1	<i>Milieux humides de la zone du Chêne</i>	194
6.2.2	<i>Travaux réalisés en 2013 et 2014</i>	197
6.2.3	<i>Caractérisation des fonctions hydriques et biologiques des complexes tourbeux</i>	199
6.2.4	<i>Système d'évaluation des terres humides de l'Ontario (OWES)</i>	200
6.2.5	<i>Méthode de caractérisation fonctionnelle et écosystémique (WESP)</i>	201
6.2.6	<i>Contextes hydrogéomorphologiques des complexes tourbeux</i>	202
6.2.7	<i>Perspectives</i>	205
6.3	Modélisation régionale hydrogéologique et hydrogéochimique	205
6.3.1	<i>Contextes géologiques et hydrogéologiques</i>	206
6.3.2	<i>Approche de modélisation</i>	207
6.4	Modélisation hydrologique	208

6.4.1	<i>Description du modèle SWAT</i>	208
6.4.2	<i>Zone d'étude</i>	212
6.4.3	<i>Paramétrage de SWAT</i>	212
6.4.4	<i>Résultats</i>	219
7	CONCLUSIONS	230
8	RÉFÉRENCES	232

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Équipe de réalisation du projet	4
Tableau 1.2 : Partenaires du projet	4
Tableau 1.3 : Collaborateurs scientifiques du projet	5
Tableau 1.4 : Liste des MRC de la Chaudière-Appalaches	7
Tableau 1.5 : Stations météorologiques actives en Chaudière-Appalaches	11
Tableau 1.6 : Liste des stations météorologiques actives en périphérie de la zone d'étude	12
Tableau 1.7 : Liste des principaux bassins versants en Chaudière-Appalaches	14
Tableau 1.8 : Liste des principaux cours d'eau en Chaudière-Appalaches.....	16
Tableau 1.9 : Liste des principaux plans d'eau en Chaudière-Appalaches.....	16
Tableau 1.10 Liste des stations hydrométriques en Chaudière-Appalaches	22
Tableau 1.11 : Types et superficies des peuplements forestiers en Chaudière-Appalaches	24
Tableau 1.12 : Types et superficies des milieux humides	26
Tableau 1.13 : Études pédologiques utilisées pour la cartographie pédologique.....	28
Tableau 1.14 : Types de sol rencontrés dans la zone d'étude.....	30
Tableau 1.15 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude.....	31
Tableau 1.16 : Utilisation du territoire en Chaudière-Appalaches	36
Tableau 2.1 : Résumé de l'ensemble des données acquises via les bases de données provinciales	38
Tableau 2.2 : Résumé des données extraites des documents existants ou de projets antérieurs	40
Tableau 2.3 : Statistiques sur les rapports obtenus des MRC	41
Tableau 2.4 : Analyses effectuées sur les échantillons d'eau souterraine et de gaz dissous	56
Tableau 2.5 : Synthèse des données hydrogéochimiques dans la région d'étude.....	57
Tableau 2.6 : Données ayant servies à la réalisation des livrables après validation	68
Tableau 3.1 : Étapes de l'histoire géologique de la région d'étude (modifié de Globensky, 1987).....	70
Tableau 3.2 : Critères pour la définition des conditions de confinement.....	91
Tableau 4.1 : Conductivité hydraulique K (m/s) du roc par contexte géologique (livrable 21).....	100
Tableau 4.2 : Bilan hydrologique et recharge obtenus de HELP par contexte hydrogéologique	109
Tableau 4.3 : Cotes DRASTIC des contextes de la région.....	115
Tableau 4.4 : Règles quantitatives définissant les 7 groupes d'eau, basées sur les proportions ioniques relatives exprimées en pourcentage (% meq/L)	119
Tableau 4.5 : Statistiques descriptives (25 ^e , 50 ^e et 75 ^e percentiles) des paramètres physiques et des éléments majeurs, calculées par groupe d'eau	122
Tableau 4.6 : Valeur de chacun des 13 paramètres pour les 5 premières composantes de l'ACP	125
Tableau 4.7 : Statistiques descriptives (25 ^e , 50 ^e et 75 ^e percentiles) des isotopes radioactifs et isotopes du carbone inorganique par groupe d'eau	133
Tableau 4.8 : Synthèse des contextes hydrogéologiques de la Chaudière-Appalaches	139
Tableau 5.1 : Diamètre des puits municipaux et privés par rapport à l'aquifère capté	144
Tableau 5.2 : Statistiques des types d'approvisionnement en eau par municipalité	148
Tableau 5.3 : Utilisation d'eau par MRC en Chaudière-Appalaches.....	151
Tableau 5.4 : Statistiques sur les dépassements des normes de qualité d'eau	162
Tableau 5.5 : Caractéristiques géochimiques des groupes d'eau et qualité d'eau.....	168

Tableau 5.6 : Localisation et description des suivis associés aux stations d'échantillonnage des rivières Boyer, Etchemin et Chaudière (d'après MDDEFP, 2011).....	171
Tableau 5.7 : Indicateurs de développement durable pouvant être dérivés des projets PACES.....	180
Tableau 6.1 : Statistiques sur les milieux humides de la zone du Chêne	196
Tableau 6.2 : Critères biologiques et hydrologiques pour la caractérisation fonctionnelle OWES et WESP des complexes tourbeux	200
Tableau 6.3 : Contexte hydrostratigraphique des complexes tourbeux étudiés sur la zone du Chêne	204
Tableau 6.4 : Localisation et périodes d'opération des stations hydrométriques utilisées dans la modélisation hydrologique	215
Tableau 6.5 : Sources de données utilisées pour préparer la carte d'utilisation du sol.....	216
Tableau 6.6 : Classes d'utilisation du sol utilisées en support à la modélisation hydrologique	216
Tableau 6.7 : Données pédologiques utilisées dans le paramétrage du modèle hydrologique	217
Tableau 6.8 : Indicateurs d'ajustement du modèle hydrologique aux 10 stations hydrométriques mises à contribution dans le calage du modèle hydrologique pour la période comprise entre 2001 et 2012	220
Tableau 6.9 : Bilans hydriques annuels moyens simulés pour la région d'étude entre 2001 et 2012.....	223
Tableau 6.10 : Comparaison des séparations des débits observés et simulés aux exutoires des micro-bassins Fourchette Amont (no.31) et Aval (no.29)	224
Tableau 6.11 : Comparaison des débits totaux et débits de base (ou recharge) de HELP et du CEHQ ...	227
Tableau 6.12 : Comparaison des composantes du bilan hydrologique obtenues de HELP et de SWAT pour la région modélisée par SWAT (mais pour des périodes de temps différentes).....	228

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Couverture des projets PACES.....	1
Figure 1.2 : Carte de la région d'étude en Chaudière-Appalaches montrant les MRC et les OBV.....	6
Figure 1.3 : Topographie représentée par le modèle altimétrique numérique (MAN) (carte 3).....	9
Figure 1.4 : Pente du terrain (carte 4).....	10
Figure 1.5 : Hydrographie et bassins versants (cartes 5 et 6).....	13
Figure 1.6 : Localisation des stations hydrométriques.....	21
Figure 1.7 : Couverture végétale en Chaudière-Appalaches (carte 8).....	25
Figure 1.8 : Milieux humides (carte 9).....	27
Figure 1.9 : Types de sols (carte 11).....	29
Figure 2.1 : Feuillet SNRC avec une cartographie de la géologie du Quaternaire en 2013-2014.....	44
Figure 2.2 : Compilation des affleurements rocheux dans la zone d'étude.....	45
Figure 2.3 : Travaux de forages avec la foreuse Geotech 605D de l'INRS.....	46
Figure 2.4 : Emplacement des sondages CPT et RPSS ainsi que des forages conventionnels.....	48
Figure 2.5 : Exemple de fluctuations du niveau d'eau au puits PO-04, situé à St-Anselme.....	50
Figure 2.6 : Instrumentation pour l'essai de perméabilité pneumatique sur un puits.....	51
Figure 2.7 : Photo des capteurs à trois composantes des ondes sismiques.....	52
Figure 2.8 : Localisation des levés sismiques de l'automne 2013 avec, en arrière-plan, la dérivée première du levé aéromagnétique régional.....	52
Figure 2.9 : Exemple d'un profil de sismique réflexion.....	53
Figure 2.10 : Pompes utilisées pour la purge et l'échantillonnage des puits d'observation.....	55
Figure 2.11 : Illustration de diverses procédures d'échantillonnage et d'analyse in-situ.....	55
Figure 2.12 : Localisation des échantillons d'eau souterraine selon le type d'aquifère (roc fracturé ou granulaire) et la source des données.....	58
Figure 2.13 : Représentation du modèle de prise de données sur le terrain (Carrier et al., 2013a).....	60
Figure 2.14 : Localisation d'un objet (Carrier et al., 2013a).....	60
Figure 2.15 : Observations effectuées se rattachant à un objet (Carrier et al., 2013a).....	61
Figure 2.16 : Représentation schématique de la base de données commune (Carrier et al., 2013a).....	62
Figure 3.1 : Colonne stratigraphique schématique pour la Plate-forme du Saint-Laurent (d'après Globensky, 1987 et Lavoie, 1994).....	71
Figure 3.2 : Contextes géologiques (carte 13).....	73
Figure 3.3 : Modèle structural conceptuel (A1) (Séjourné et al., 2013) (livrable 14B).....	75
Figure 3.4A : Géologie des formations superficielles (carte 12) (compilation de sources diverses décrites à la section 2.2.1; Parent et al., 2015).....	77
Figure 3.4B : Légende simplifiée de la géologie des formations superficielles.....	78
Figure 3.5 : Emplacement des coupes stratigraphiques simplifiées.....	82
Figure 3.6 : Épaisseur totale des dépôts meubles (carte 15A).....	85
Figure 3.7 : Topographie du roc (carte 16).....	86
Figure 3.8 : Épaisseur des sédiments argileux (carte 15B).....	87
Figure 3.9 : Épaisseur des sédiments sous-jacents à l'argile (carte 15C).....	88
Figure 3.10 : Épaisseur des sédiments sus-jacents à l'argile (carte 15D).....	89

Figure 3.11 : Conditions de confinement (carte 17)	92
Figure 3.12 : Contextes hydrogéologiques avec séquences hydrostratigraphiques (carte 18).....	94
Figure 4.1 : Diagrammes en boîtes et moustaches (gauche) et diagrammes en violons (droite).....	98
Figure 4.2 : Distributions des valeurs de T et K pour les puits dans les aquifères rocheux et granulaires ..	99
Figure 4.3 : Diagrammes en violons résumant les distributions statistiques de la transmissivité T (m^2/s) et de la conductivité hydraulique K (m/s) pour chaque contexte géologique de la région d'étude	100
Figure 4.4 : Dépendance des propriétés hydrauliques à la profondeur dans le roc, par contexte géologique : à gauche, relation $\log_{10} T(z)$; au centre, relation $\log_{10} K(z)$; à droite, densité relative en données par contexte, selon leur profondeur dans le roc (z) (densité normalisée par le maximum).....	101
Figure 4.5 : Diagramme en violons des estimations de l'emmagasinement (S) par type d'aquifère.....	103
Figure 4.6 : Piézométrie de l'aquifère rocheux fracturé régional (carte 20).....	105
Figure 4.7 : Exemple de profil de matériaux utilisé pour estimer la recharge avec HELP et composantes du bilan hydrologique estimées par HELP (Croteau et al., 2010)	107
Figure 4.8 : Recharge de l'aquifère rocheux régional (carte 28B).....	108
Figure 4.9 : Zones de recharge et de résurgence de l'aquifère rocheux régional montrant aussi la nature des liens entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux (carte 28A).....	110
Figure 4.10 : Poids et définitions des paramètres de la méthode de vulnérabilité DRASTIC.....	113
Figure 4.11 : Superficie cumulative des contextes hydrogéologiques en fonction des cotes DRASTIC....	115
Figure 4.12 : Vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional illustrée avec les cotes et couleurs standard DRASTIC (carte 22A).....	116
Figure 4.13 : Vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional illustrée avec les intervalles et couleurs en fonction des valeurs régionales des cotes DRASTIC (carte 22B).....	117
Figure 4.14 : Définition et représentation des 7 groupes d'eau selon leurs proportions d'ions majeurs. A) Diagramme de Piper représentant la composition relative en ions majeurs. B) Diagrammes de Stiff illustrant la composition ionique médiane pour chacun des 7 groupes d'eau	120
Figure 4.15 : Répartition spatiale des groupes d'eau ainsi que des zones géochimiques	121
Figure 4.16 : Relations entre les 7 groupes d'eau selon les valeurs des composantes principales de l'ACP. A) 1 ^{re} composante en fonction de la 2 ^e . B) 2 ^e composante en fonction de la 3 ^e	125
Figure 4.17 : Concentrations relatives des cations majeurs (Ca, Mg, Na, K) en fonction des anions majeurs (HCO_3 , SO_4 , Cl) pour chacun des échantillons identifiés selon leur groupe d'eau respectif.....	126
Figure 4.18 : Concentration en chlorures (Cl^-) en fonction des concentrations en bromures (Br^-) pour les échantillons de chacun des 7 groupes d'eaux. La composition de l'eau de mer est illustrée par une croix (Hem, 1985) et la composition de l'eau de la mer de Champlain (Cloutier et al., 2010) par un cercle. La ligne de dilution de l'eau de mer et la limite des effets anthropiques (surplus en Cl^-) sont indiquées.....	128
Figure 4.19 : Échantillons identifiés par leur groupe d'eau par rapport aux champs reliés à différents effets naturels et anthropiques selon le rapport Cl/Br et les concentrations en Cl (selon Panno et al., 2006)	128
Figure 4.20 : Évidences de l'échange ionique Na-Ca. A) Cl en fonction de Na. B) Na en fonction de Ca.	129
Figure 4.21 : Paramètres physico-chimiques des groupes d'eaux. A) Valeurs médianes de l'oxygène dissous et du pH. B) Évolution du Na par rapport au pH pour les échantillons par groupes d'eau	130
Figure 4.22 : $\delta^{13}C_{CID}$ (‰ PDB) du carbone inorganique dissous (CID) en fonction de l'activité en ^{14}C de l'eau souterraine, $a^{14}C$ (% de carbone moderne, pmC).....	131
Figure 4.23 : Concentrations en tritium en fonction de l'âge ^{14}C corrigé.....	133
Figure 4.24 : Isotope $\delta^{13}C$ du méthane en fonction du rapport molaire méthane/(éthane+propane) (modifié de Bernard et al., 1978)	134

Figure 4.25 : Isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$). A) Comparaison entre les droites météoriques locales de différentes régions et la droite météorique mondiale (<i>GMWL</i>). B) Composition isotopique des échantillons d'eau souterraine par rapport aux droites météoriques.....	136
Figure 4.26 : Répartition des trois contextes hydrogéologiques définis pour Chaudière-Appalaches : les basses-terres du St-Laurent, les hautes-terres appalachiennes et les vallées appalachiennes.....	138
Figure 5.1 : Fréquence cumulative des longueurs d'intervalle ouvert des puits selon l'utilisation (municipale ou privée) et l'aquifère capté (roc ou sédiments).....	144
Figure 5.2 : Distributions statistiques de la transmissivité (<i>T</i>) et de la conductivité hydraulique (<i>K</i>) des puits municipaux selon le type d'aquifère capté.....	146
Figure 5.3 : Dépendance des propriétés hydrauliques à la profondeur dans le roc pour les puits municipaux : à gauche, relation $\log_{10} T(z)$; au centre, relation $\log_{10} K(z)$; à droite, densité relative en données, selon leur profondeur dans le roc (<i>z</i>) (densité normalisée par le maximum)	147
Figure 5.4 : Transmissivité (<i>T</i>) en fonction de la capacité spécifique (Q_s) pour les puits municipaux.....	147
Figure 5.5 : Estimation des usages de l'eau en fonction du type d'utilisation et de la provenance de l'eau	149
Figure 5.6 : Provenance de l'eau des réseaux par municipalité et localisation des captages (carte 26A)	153
Figure 5.7 : Utilisation annuelle totale d'eau des MRC de Chaudière-Appalaches (carte 26B)	154
Figure 5.8 : Utilisation annuelle de l'eau souterraine des MRC de Chaudière-Appalaches (carte 26C) ...	155
Figure 5.9 : Proportion de l'utilisation résidentielle de l'eau souterraine par municipalité (carte 26D)	156
Figure 5.10 : Densité des puits par municipalité (carte 26E).....	157
Figure 5.11 : Utilisation de l'eau souterraine par rapport à la recharge des municipalités de Chaudière-Appalaches (carte 26F)	158
Figure 5.12 : Indice de densité des activités anthropiques (carte 23)	160
Figure 5.13 : Cartes 24A de la répartition des dépassements pour l'un des paramètres de potabilité : Cd, Pb et Sb; F; Ba; As. Les concentrations maximales acceptables de chaque paramètre sont indiquées sur les cartes et les grands symboles colorés représentent les localisations avec des dépassements. Les puits conformes sont illustrés par un symbole noir. Les types de puits sont distingués par la forme des symboles	163
Figure 5.14 : Cartes 25A de la répartition des dépassements pour l'un des paramètres esthétiques : Cl, Na, matières dissoutes totales (MDT) et dureté. Les critères de chaque paramètre sont indiqués sur les cartes et les grands symboles colorés représentent les localisations des dépassements. Les puits conformes sont illustrés par un symbole noir. Les types de puits sont distingués par la forme des symboles	164
Figure 5.14 (suite) : Cartes 25B de la répartition des dépassements pour l'un des paramètres esthétiques : Fe, Mn, S^{2-} , pH. Les critères de chaque paramètre sont indiqués sur les cartes et les grands symboles colorés représentent les localisations avec des dépassements. Les puits conformes sont illustrés par un symbole noir. Les types de puits sont distingués par la forme des symboles	165
Figure 5.15 : Carte 24B de la répartition des concentrations en nitrite et nitrate pour les types de puits qui sont distingués par la forme des symboles. La CMA des nitrite et nitrate est de 10 mg/L	167
Figure 5.16 : Localisation des stations de suivi et d'échantillonnage des eaux de surface pour les rivières Boyer, Etchemin et Chaudière (MDDELCC, 2011b).....	170
Figure 5.17 : Évolution des concentrations en nitrites et nitrates (N-NO_2 et N-NO_3), entre les années 1979 et 2011, pour les rivières Boyer (A), Etchemin (B) et Chaudière (C). La station d'échantillonnage et de suivi associée à chacune des courbes apparaît dans les légendes selon la direction d'écoulement, soit de l'amont (près de la source) vers l'aval (près du fleuve St-Laurent). L'échelle verticale du graph A est trois fois plus grande que celle des graphs B et C	172

Figure 5.18 : Évolution des concentrations en phosphore total dissous (P_{tot} dissous), entre les années 1979 et 2011, pour les rivières Boyer (A), Etchemin (B) et Chaudière (C). La station d'échantillonnage et de suivi associée à chacune des courbes apparaît dans les légendes selon la direction d'écoulement, soit de l'amont (près de la source) vers l'aval (près du fleuve St-Laurent). L'échelle verticale du graph A est deux fois plus grande que celle des graphs B et C	173
Figure 5.19 : Évolution des IQBP moyens annuels, entre les années 1990 et 2011, pour les rivières Boyer (A), Etchemin (B) et Chaudière (C). La station d'échantillonnage et de suivi associée à chacune des courbes apparaît dans les légendes selon la direction d'écoulement, soit de l'amont (près de la source) vers l'aval (près du fleuve St-Laurent).....	175
Figure 5.20 : Indicateurs de gestion durable suggérés par le CCME (Martin et al., 2012)	177
Figure 5.21 : Emplacement des stations de suivi de nappe (partie du livrable 27)	190
Figure 6.1 : Exemple de révision de la cartographie de la géologie du Quaternaire à l'aide du LiDAR. La carte (en haut) montre la couverture LiDAR et les autres cartes montrent une comparaison du MNE (1) (MDDELCC) avec le LiDAR (2) et l'interprétation régionale (Gaucher et al., 1984) (3) comparée à la nouvelle interprétation basée sur le LiDAR (4)	193
Figure 6.2 : Milieux humides de la zone du Chêne (cartographie des milieux humides de CIC, 2012)	195
Figure 6.3 : Proportions des classes de milieux humides sur la zone du Chêne	196
Figure 6.4 : Zones instrumentées à l'aide de piézomètres et emplacement des mesures de niveau statique réalisées à l'intérieur (points noirs) et à l'extérieur du complexe tourbeux (points bleus).....	198
Figure 6.5 : Pointage OWES pour la fonction biologique des complexes tourbeux sur la zone du Chêne	201
Figure 6.6 : Pointage WESP pour la fonction amélioration de la qualité de l'eau.....	203
Figure 6.7 : Pointage WESP pour la fonction capacité d'emmagasinement des eaux pluviales	203
Figure 6.8 : Représentation spatiale des unités de réponse hydrologiques (URH)	209
Figure 6.9 : Composantes hydrologiques du modèle SWAT (adapté d'Eckhardt et Arnold, 2001)	210
Figure 6.10 : Schéma du fonctionnement souterrain de SWAT	211
Figure 6.11 : Localisation des 68 sous-bassins versants retenus pour la modélisation hydrologique	213
Figure 6.12 : Localisation des stations hydrométriques et durée des séries de débit	214
Figure 6.13 : Hauteurs d'eau annuelles moyennes simulées pour la période 2001-2012 pour l'ensemble de la région d'étude.	221
Figure 6.14 : Débits journaliers simulés et observés pour la station du sous-bassin no. 56 (Riv. Chaudière à Saint-Georges) pour la période 2009-2012	222
Figure 6.15 : Localisation des micro-bassins Fourchette Amont (no.31) et Fourchette Aval (no.29) dans le bassin de la Rivière LeBras, tributaire de de la rivière Etchemin (Michaud et al., 2009).....	224
Figure 6.16 : Recharge totale des aquifères et recharge de l'aquifère profond découlant de la modélisation hydrologique de surface appliquée à l'ensemble de la région d'étude.....	225
Figure 6.17 : Cartes des sous-bassins versants correspondant aux stations de jaugeage utilisées pour comparer les résultats de HELP avec ceux du CEHQ.....	226
Figure 6.18 : Comparaison des débits totaux et des débits de base (ou recharge) obtenus de HELP et du CEHQ pour les stations de jaugeage de comparaison (localisation à la figure 6.17)	227

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Rapport vulgarisé sur les livrables PACES en Chaudière-Appalaches

LISTE DES ANNEXES ÉLECTRONIQUES

Annexe 2 : Cartes thématiques PACES

Annexe 3 : Protocoles méthodologiques

Annexe 4 : Résultats des travaux

Annexe 5 : Description des champs et librairies de la base de données

Annexe 6 : Estimé 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 et al., 2004). Malgré l'importance de cette ressource, l'état de la connaissance sur l'eau souterraine est fragmentaire (MDDELCC, 2013). Dans cette perspective, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) a élaboré en 2008 le « Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec » (PACES) (MDDELCC, 2013). Ce programme vise la couverture des territoires municipalisés du Québec méridional. Les objectifs du PACES sont 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.

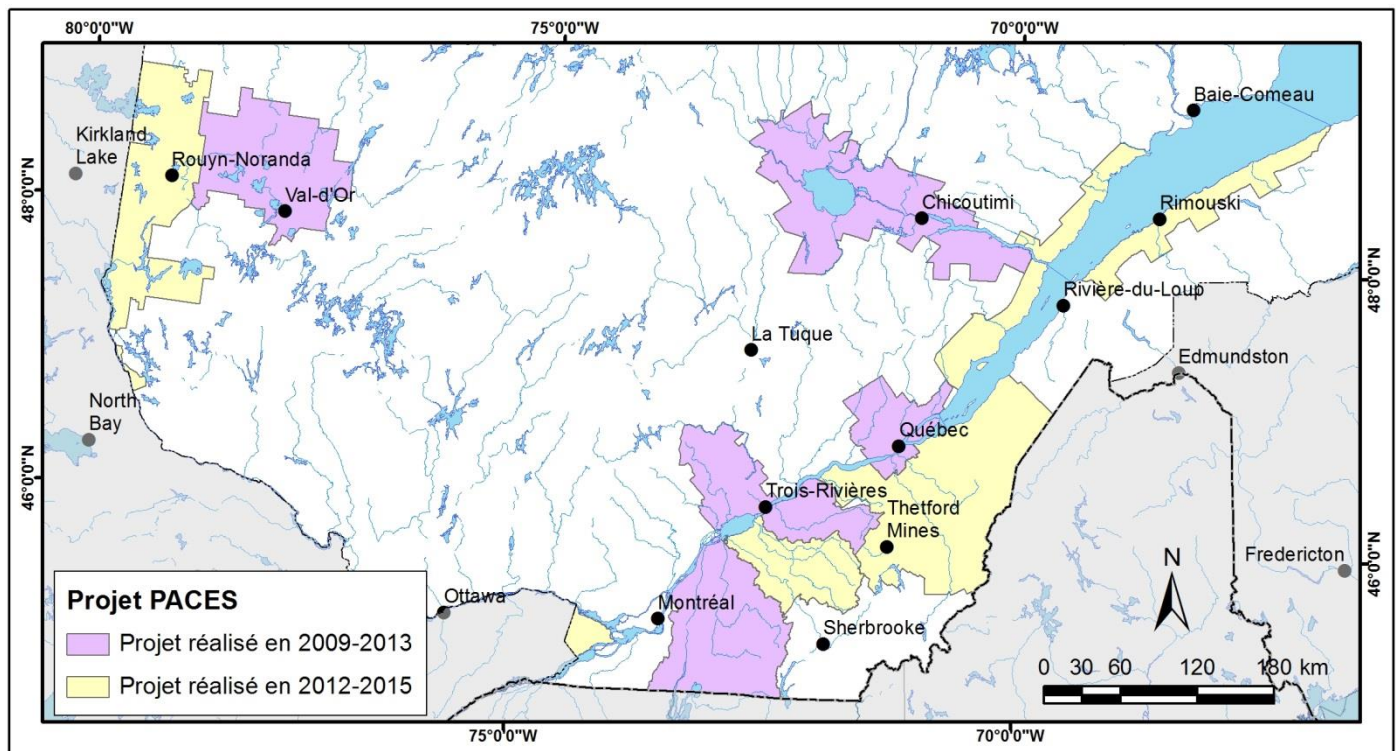


Figure 1.1 : Couverture des projets PACES

Depuis le début de la mise en œuvre du PACES, trois appels de propositions ont été lancés, soient en 2008, 2009 et 2011 pour la réalisation de projets régionaux. Suite à ces trois appels, treize régions, illustrées à la figure 1.1, ont fait l'objet de projets PACES. En 2008, cinq régions ont été retenues : Montérégie Est, Saguenay-Lac St-Jean, Abitibi-Témiscamingue (partie Est), Bécancour et sud-ouest de la Mauricie. En 2009 et 2011, huit régions supplémentaires ont été choisies : Outaouais et Communauté métropolitaine de Québec en 2009, et Bas-Saint-Laurent, Charlevoix, Vaudreuil-Soulanges, bassin de la rivière Saint-François, Abitibi-Témiscamingue (partie Ouest) et Chaudière-Appalaches, en 2011.

1.2 Objectifs du projet PACES Chaudière-Appalaches

Le projet couvre la région administrative de la Chaudière-Appalaches, mais en exclut la ville de Lévis qui a été couverte par le projet PACES de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) (Talbot Poulin et al., 2013). Le principal objectif du présent projet est de regrouper les informations nécessaires pour servir de base à la gestion durable des ressources en eaux souterraines en Chaudière-Appalaches. Une meilleure compréhension de la dynamique du système aquifère, obtenue par l'intégration et l'interprétation des données existantes ainsi que celles qui ont été générées par le projet, devrait aider à l'exploitation durable des ressources en eau souterraine et à la protection à long terme de celles-ci. Le développement d'une base de données regroupant l'information et la rendant disponible, de même que des outils cartographiques permettront de supporter le choix d'actions prioritaires à réaliser pour le développement durable des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches.

Le projet a eu les retombées suivantes :

- Amélioration des connaissances sur les ressources en eau souterraine dans la région, notamment en réalisant les travaux nécessaires pour combler le manque d'information dans certaines zones présentant des particularités ou pour une thématique donnée ;
- Synthèse des connaissances appuyée par des cartes hydrogéologiques et une base de données, tel que spécifié par le PACES ;
- Leg d'infrastructures de surveillance (puits) dans la région qui permettent de suivre l'évolution de la qualité et de la quantité des ressources en eau souterraine ;
- Formation de personnel hautement qualifié par l'implication des professionnels du projet ainsi que par des projets de recherche d'étudiants de 2^e et 3^e cycles ;
- Établissement d'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.

La réalisation de ce projet s'est étalée sur une période de 3 ans, soit d'avril 2012 à mars 2015, en suivant les trois phases établies par le PACES : 1) collecte des données existantes (2012-2013), 2) travaux de terrain ciblés complémentaires (2013-2014) et 3) synthèse et transfert de l'information (2014-2015).

1.3 Contenu et structure du rapport

Ce rapport documente les travaux réalisés dans le cadre du projet PACES de la Chaudière-Appalaches. Il couvre l'ensemble du projet et il 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, ...). La documentation est regroupée en cinq chapitres :

- Chapitre 2 : Acquisition des données et caractérisation
- Chapitre 3 : Contextes géologiques et hydrogéologiques
- Chapitre 4 : Conditions hydrogéologiques
- Chapitre 5 : Ressources en eau souterraine
- Chapitre 6 : Travaux spécifiques

L'acquisition des données s'est surtout faire la première année, incluant la collecte/compilation de données numériques et de données issues de documents (ex. : cartes, rapports, ...) ainsi que le développement d'une base de données. Ce travail a permis de développer une compréhension initiale des conditions géologiques et hydrogéologiques 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. Cet inventaire a permis 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 production de cartes régionales et la préparation de coupes géologiques, ce qui permet de définir les conditions de confinement et les différents contextes hydrogéologiques de la région. Le chapitre sur les conditions hydrogéologiques décrit les propriétés hydrauliques, l'écoulement de l'eau souterraine, la recharge et la vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional et la chimie de l'eau souterraine. Ce chapitre se termine par une synthèse décrivant notre compréhension du fonctionnement du système aquifère régional. La section sur les ressources en eau souterraine traite du potentiel d'exploitation, de l'usage et de la qualité de l'eau souterraine dans une perspective de gestion durable de la ressource. Ce chapitre se termine par une section expliquant comment exploiter les résultats du présent projet pour soutenir la prise de décision liée à la gestion et à la gouvernance des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches.

Les annexes documentent en détail les données, méthodes et résultats du projet. À l'annexe 1, directement intégré au présent rapport, un rapport vulgarisé décrit brièvement les livrables PACES de façon à faciliter la compréhension des résultats. Les autres annexes sont présentées sous forme électronique. L'annexe 2 comprend tous les livrables cartographiques PACES à l'échelle 1/100 000. La production des livrables PACES a suivi des protocoles élaborés au cours des projets PACES précédents qui sont documentés à l'annexe 3. Ces protocoles n'ont pas été édités depuis la phase PACES précédente mais le rapport mentionne les quelques différences de méthodes utilisées pour la production de certains livrables du projet en Chaudière-Appalaches. L'annexe 4 contient les résultats spécifiques de certains travaux : certificats des analyses chimiques; descriptions des forages conventionnels et des sondages CPT et RPSS; levés sismiques; hydrogrammes de puits. L'annexe 4 contient aussi les rapports de travaux spécifiques (Ballard et al., 2014b; Bourgault et al., 2015). L'annexe 5 donne la description des champs et librairies de la base de données. Cette base de données a été transmise au MDDELCC qui rendra ces données accessibles via le Portail de l'eau (MDDELCC, 2015). L'annexe 6 donne les résultats de l'estimation de l'utilisation d'eau (livrable 26) à l'échelle municipale, alors que le rapport présente les résultats pour les MRC. Enfin, l'annexe 7 documente la liste des activités anthropiques sélectionnées pour évaluer l'indice de densité des activités anthropiques (livrable 23).

Des travaux de recherche d'étudiants de 2^e et 3^e cycles ont aussi été réalisés dans le cadre du projet PACES en Chaudière-Appalaches. Sous la direction du Dr. John Molson de l'Université Laval, l'étudiante à la maîtrise Debora Janos a développé un modèle numérique en deux dimensions (2D) représentant l'écoulement régional et l'évolution géochimique de l'eau souterraine. Sous la direction de la Dr. Marie Larocque de l'UQAM, l'étudiant au doctorat Marc-André Bourgault a étudié les échanges entre l'eau souterraine et les milieux humides, notamment en tête du bassin de la rivière du Chêne. Enfin, sous la direction du Dr. Michel Parent de la Commission géologique du Canada à Québec, l'étudiant au doctorat à l'INRS Guillaume Légaré-Couture a développé la cartographie des sédiments superficiels à l'aide de levés LiDAR pour aider à comprendre l'histoire Quaternaire de la région. Ces travaux sont brièvement décrits au chapitre 6 car ils étaient encore en voie de réalisation au moment de rédiger ce rapport. Ces travaux seront documentés en détails dans un mémoire et des thèses ainsi que par des publications scientifiques. Finalement, les travaux modélisation hydrologique réalisés par l'IRDA, qui dépassent les exigences du PACES, sont aussi documentés dans une section du chapitre 6.

1.4 Équipe de réalisation et partenaires

Le tableau 1.1 donne la liste des membres de l'équipe de réalisation du projet, alors que les organismes impliqués et les principaux collaborateurs sont résumés aux tableaux 1.2 et 1.3. Le projet était sous la responsabilité contractuelle de l'INRS avec le MDDELCC. Les activités du projet étaient regroupées sous quatre volets dont la responsabilité était partagée avec les partenaires de réalisation du projet : 1)

Hydrologie et territoire (INRS et IRDA), 2) Quaternaire et hydrostratigraphie (INRS, UQAM et CGC), 3) Caractérisation et synthèse hydrogéologique (INRS) et 4) Utilisation et gestion de la ressource (OBV-CA). La réalisation du projet a aussi été assurée par la collaboration de partenaires régionaux et universitaires.

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, Laureline Berthot, Guillaume Légaré-Couture, Xavier Malet, Annie Therrien, Marc Laurencelle, Marco Boutin
Commission géologique du Canada (CGC) (Ressources naturelles Canada)	Michel Parent
Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA)	Marie-Hélène Cloutier, Annie Ouellet, Julie Grenier
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)	Aubert Michaud, Isabelle Beaudin, Ariane Drouin, Jacques Desjardins

Tableau 1.2 : Partenaires du projet

Organismes
Conférence régionale des élus de la Chaudière-Appalaches (CRÉ CA)
Organisme de bassins versants de la zone du Chêne
Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC)
Conseil de bassin de la rivière Etchemin (CBE)
Organisme de bassins versants de la Côte-du-Sud
Groupe de concertation des bassins versants de la zone Bécancour (GROBEC)
Organisme de bassin versant du fleuve Saint-Jean
MRC de Lotbinière
MRC de la Nouvelle-Beauce
MRC de Robert-Cliche
MRC de Beauce-Sartigan
MRC de Bellechasse
MRC des Etchemins
MRC de Montmagny
MRC de l'Islet
Fédérations de l'UPA de Chaudière-Appalaches
Direction régionale Chaudière-Appalaches du MAPAQ

Tableau 1.3 : Collaborateurs scientifiques du projet

Organismes	Personnes
Université Laval	M.Sc. de Debora Janos supervisé par John Molson
UQAM	Ph.D. de Marc-André Bourgault supervisé Marie Larocque
Commission géologique du Canada	Ph.D. de Guillaume Légaré-Couture supervisé par Michel Parent
UQAM	Étudiants gradués impliqués dans la cartographie quaternaire sous la supervision du Dr. Robert-André Daigneault

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 livrables sont décrit brièvement à l'annexe 1 afin de faciliter la compréhension des résultats tandis que les cartes à l'échelle 1/100 000 sont intégrées en format électronique à l'annexe 2.

1.5.1 Localisation

Le projet couvre la région administrative de la Chaudière-Appalaches, mais en excluant la ville de Lévis qui a été couverte par le projet PACES de la CMQ (Talbot Poulin et al., 2013) (figure 1.2). La région d'étude de 14 600 km² (terre ferme) est bornée au nord-est par la région du Bas-Saint-Laurent, au nord-ouest par le fleuve Saint-Laurent et la région de la Capitale-Nationale, au sud-ouest par les régions du Centre-du-Québec et de l'Estrie et au sud-est par la frontière internationale avec les États-Unis (Maine).

Comme l'illustre la figure 1.2, la Chaudière-Appalaches comprend les municipalités régionales de comté (MRC) suivantes : les Appalaches, Beauce-Sartigan, Bellechasse, les Etchemins, L'Islet, Lotbinière, Montmagny, la Nouvelle-Beauce, et Robert-Cliche. Ces 9 MRC incluent 135 municipalités dans la région d'étude. De plus, la région couvre, en tout ou en partie, les territoires de neuf organismes de bassins versants qui ont formé le Regroupement des organismes de bassins versant de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) pour concerter leurs travaux dans la région. Ce regroupement comprend les OBV suivantes :

- Organisme de bassins versants de la zone du Chêne (OBV du Chêne)
- Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC)
- Conseil de bassin de la rivière Etchemin (CBE)
- Organisme des bassins versants de la Côte-du-Sud (OBV Côte-du-Sud)
- Groupe de concertation des bassins versants de la zone Bécancour (GROBEC)
- Organisme de bassin versant du fleuve Saint-Jean (OBVFSJ)
- Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR)
- Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF)
- Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet (COPERNIC)

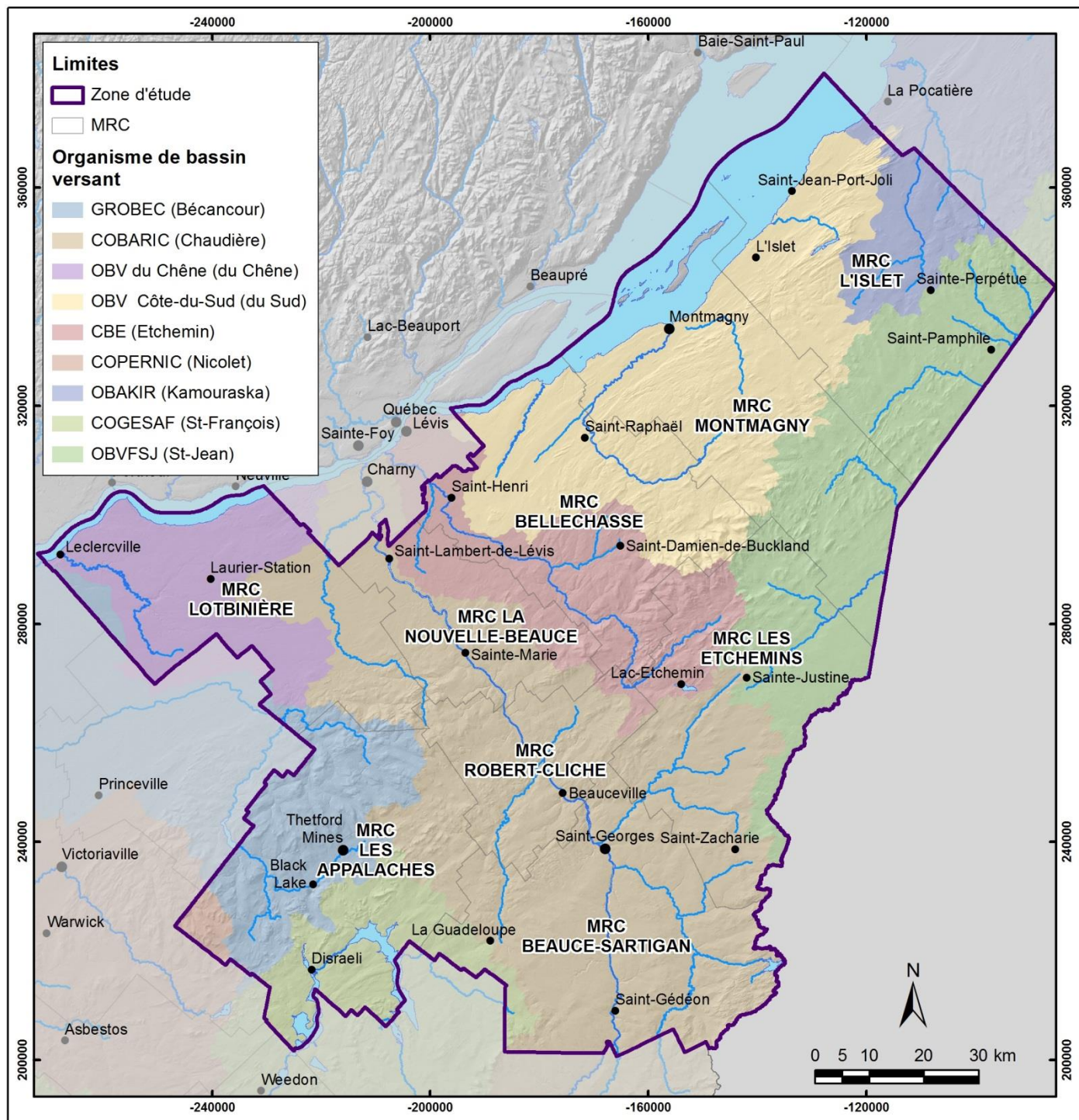


Figure 1.2 : Carte de la région d'étude en Chaudière-Appalaches montrant les MRC et les OBV

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. La **carte 2**, présentée à l'annexe 2, illustre les différentes limites administratives du SDA pour la région 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) décrit plus loin dans le rapport.

Tableau 1.4 : Liste des MRC de la Chaudière-Appalaches

Conférence régionale des élus (CRÉ)	Municipalité régionale de comté (MRC)	Superficie totale (km ²)	Superficie (% de la CA)
Chaudière-Appalaches (CA) (sans Lévis)	Beauce-Sartigan	1 977	12.7 %
	Bellechasse	1 807	11.6 %
	La Nouvelle-Beauce	913	5.9 %
	Les Appalaches	1 987	12.7 %
	Les Etchemins	1 819	11.7 %
	L'Islet	2 448	15.7 %
	Lotbinière	1 751	11.2 %
	Montmagny	2 054	13.2 %
	Robert-Cliche	845	5.4 %
Total (superficie incluant les étendues d'eau)		15 601	100 %

En 2012, la population totale dans la région d'étude était d'environ 276 000 personnes (MAMROT, 2013). Dans la région d'étude, les 10 municipalités les plus importantes (excluant Lévis) sur le plan démographique sont Saint-Georges, Thetford Mines, Sainte-Marie, Montmagny, Beauceville, Saint-Lambert-de-Lauzon, Saint-Apollinaire, Saint-Henri, Saint-Joseph-de-Beauce et Lac-Etchemin. À elles seules, ces municipalités comptent pour plus de 40 % de la population vivant en Chaudière-Appalaches (en excluant Lévis). Ces municipalités jouent un rôle économique régional majeur et desservent de vastes superficies agricoles qui occupent plus de 25 % du territoire de la Chaudière-Appalaches.

Le réseau routier de la région d'étude comprend deux axes principaux, soient les autoroutes 20, et 73. L'autoroute 20 est parallèle au fleuve Saint-Laurent et il assure les échanges avec les régions du Bas Saint-Laurent, à l'est, et celle du Centre-du-Québec, à l'ouest, en passant à proximité des municipalités de Laurier-Station, Montmagny, L'Islet et Saint-Jean-Port-Joli. L'autoroute 73 (Autoroute de la Beauce) relie la ville de Québec, au nord-ouest, avec la frontière des États-Unis, au sud-est, en passant par les principales municipalités de la Beauce, notamment Saint-Lambert-de-Lévis, Sainte-Marie, Beauceville et Saint-Georges. Plusieurs routes nationales et secondaires parcourent également ce territoire. Au niveau des axes nord-sud, la route 269 relie Lévis et Thetford Mines, la route 277 fait le lien entre Saint-Henri et Lac-Etchemin et les routes 279 et 281 permettent d'accéder au Parc régional du Massif du Sud à partir respectivement de Beaumont et de Saint-Vallier.

Le réseau ferroviaire de la Chaudière-Appalaches comprend deux principaux tronçons. Le premier suit l'autoroute 20 et traverse notamment les municipalités de Laurier Station, Charny et Montmagny. Le second tronçon suit l'autoroute 73 de Charny à Vallée-Jonction où il se sépare en deux autres tronçons, l'un continuant vers le sud-est en direction Saint-Georges pour ensuite se diriger vers le nord-est vers les États-Unis et l'autre se dirigeant vers le sud-ouest en direction de Thetford Mines et Sherbrooke. Certains tronçons ne sont plus en opération et sont en voie d'être démantelés (MRC de La Nouvelle-Beauce, 2005). La principale gare de triage de la région est située à Charny.

La région d'étude comprend aussi plusieurs aéroports (ou aérodromes), dont les principaux sont à Saint-Jean-Chrysostome, Saint-Anselme, Saint-Lambert-de-Lauzon, St-Frédéric (entre Vallée-Jonction et Saint-Joseph-de-Beauce), Lac-Etchemin, St-Victor-de-Beauce, Thetford Mines, Sainte-Lucie-de-Beauregard, Saint-Georges, Montmagny et Saint-Jean-Port-Joli. On retrouve aussi un aéroport d'importance à proximité, soit l'aéroport international Jean-Lesage de Québec.

Au niveau du transport maritime, seule la municipalité de Lévis possède des installations portuaires d'importance, permettant notamment le transbordement de produits pétroliers, mais Lévis ne fait pas partie de la région d'étude. Le fleuve Saint-Laurent est la seule voie maritime commerciale donnant accès à la région, mais on y retrouve aussi des marinas utilisées surtout pour la navigation de plaisance.

1.5.2 Description du milieu naturel

1.5.2.1 Topographie et pente du sol

La topographie du territoire (**carte 1**) provient de la Base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT). Le modèle altimétrique numérique (MAN), fourni par la Direction du Patrimoine écologique et des Parcs (DPEP) du MDDELCC, a été développé à partir de courbes de niveau à l'échelle 1/20 000 de la Base de données pour l'aménagement du territoire (BDTQ). Ce MAN a été modifié par la DPEP afin d'en assurer la cohérence avec le réseau hydrographique structuré. La **carte 1** présente les courbes topographiques alors que les **cartes 3 et 4** montrent respectivement le MAN et la pente du sol dérivée du MAN (annexe 2).

La Chaudière-Appalaches comprend trois contextes hydrogéologiques définis, entre autre, par les caractéristiques géomorphologiques de la région ainsi que la limite marine de l'ancienne Mer de Champlain (voir section 3.2). La topographie dans ces trois contextes est distincte (figure 1.3; **cartes 1 et 3**) : 1) on retrouve dans les basses-terres du Saint-Laurent une topographie de bas plateau qui a été recouvert par la Mer de Champlain jusqu'à une élévation variant autour de 180 m par rapport au niveau moyen de la mer (NMM), les basses-terres elles-mêmes ayant une altitude entre 10 et 90 m NMM; 2) les vallées appalachiennes incisent les reliefs montagneux et se trouvent à des élévations généralement inférieures à 325 m NMM; et 3) les hautes-terres appalachiennes peuvent atteindre jusqu'à 915 m NMM d'élévation dans leur partie centrale.

La pente de la surface du sol a été dérivée de la topographie (figure 1.4 ; **carte 4**). On retrouve la même distinction au niveau de la pente que ce qui était apparent pour la topographie : 1) dans les basses-terres du St-Laurent la topographie plane fait en sorte que les pentes y sont en général faibles avec des valeurs moyennes de moins de 2 %; 2) les vallées appalachiennes ont des pentes un peu plus fortes, particulièrement à leur périphéries, et la valeur moyenne se situe autour de 4 %; et 3) les hautes-terres appalachiennes ont quant à elles des pentes généralement fortes qui dépassent souvent 7 %.

1.5.2.2 Climat

Comme ailleurs dans le sud-ouest du Québec, les conditions climatiques en Chaudière-Appalaches sont caractérisées par des écarts saisonniers de température importants, se traduisant par des étés chauds et des hivers froids.

La région compte 38 stations météorologiques, illustrées au **livrable 27** (annexe 2). Leurs coordonnées, de même que leur altitude et les périodes pour lesquelles des données sont disponibles ont été obtenues de la Direction du suivi de l'état de l'environnement (DSEE) du MDDELCC (2012b). Le tableau 1.5 présente la liste stations répertoriées dans la zone d'étude. Parmi les stations présentes dans la zone d'étude, on compte 19 stations actives possédant au moins 30 ans de données (depuis 1980). Les précipitations et températures quotidiennes pour ces 19 stations ont été obtenues d'Environnement Canada (2013a) et elles sont indiquées au tableau 1.5. Le tableau 1.6 présente aussi dix (10) stations sélectionnées en périphérie de la zone d'étude qui ont servi à générer certains des livrables du projet.

Livrables PACES no. 3 : MODÈLE ALTIMÉTRIQUE NUMÉRIQUE

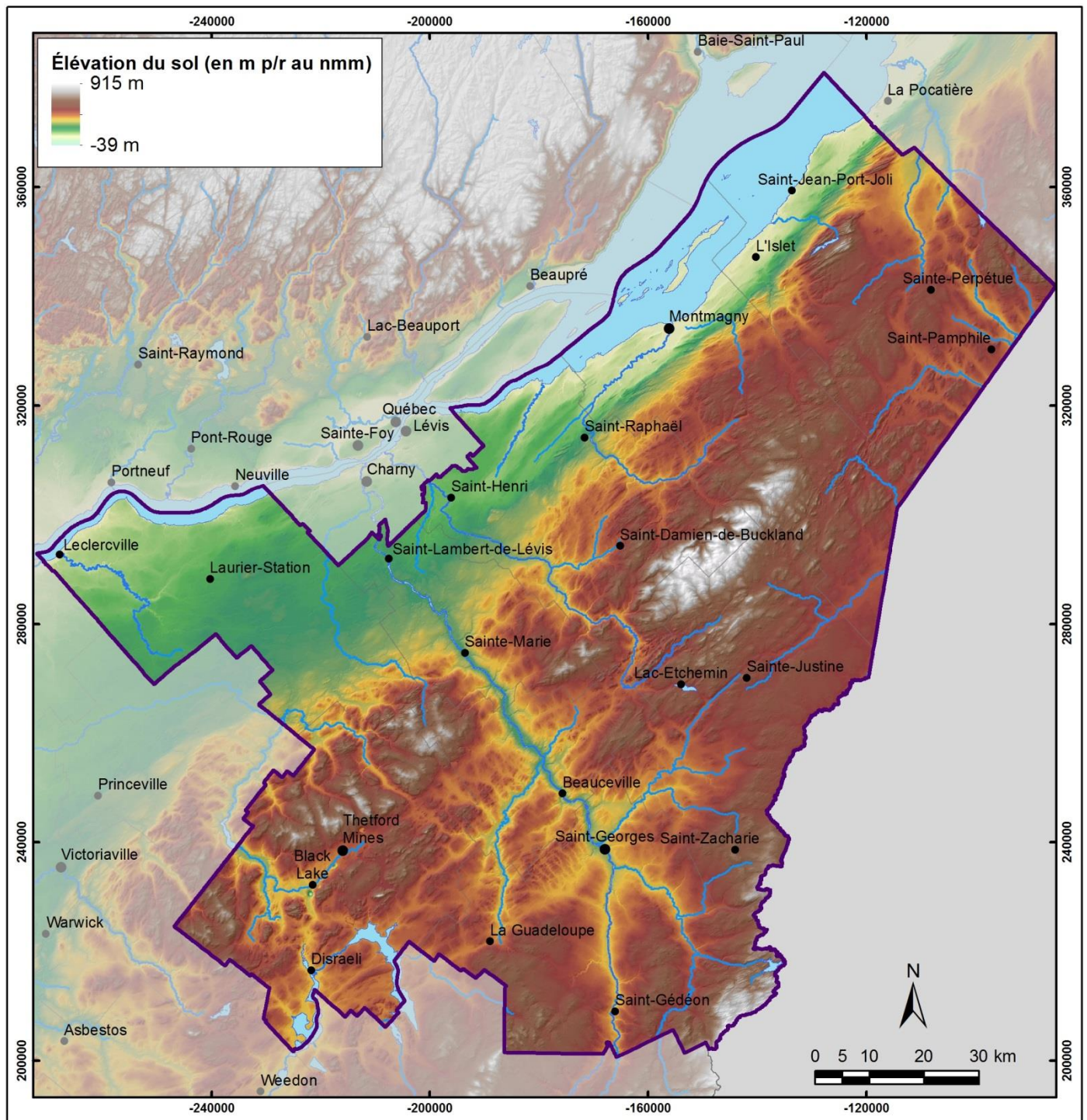


Figure 1.3 : Topographie représentée par le modèle altimétrique numérique (MAN) (carte 3)

Livrable PACES no. 4 : PENTE

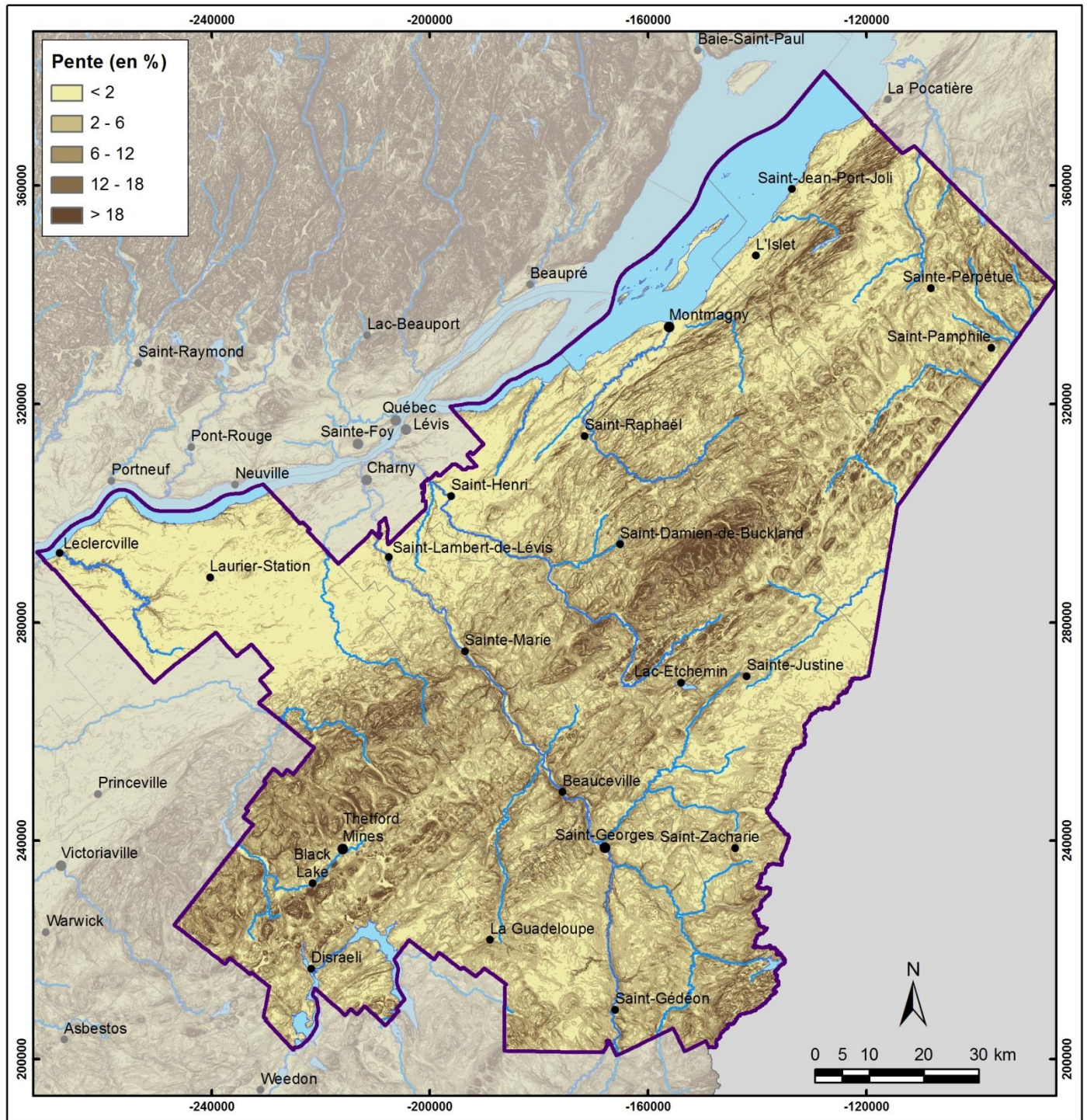


Figure 1.4 : Pente du terrain (carte 4)

Tableau 1.5 : Stations météorologiques actives en Chaudière-Appalaches

Nom de la station	No. de la station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période	Préc. tot. (mm)	T. moy. (°C)
Adstock	7020067	46.0061	-71.1811	361	2007-2012	-	-
Armagh-2	7050241	46.716	-70.6011	323	2007-2012	-	-
Barr. Jules-Allard	7020M48	45.9509	-71.2741	290	1915-2012	1106.6	4.16
Beaurivage	7020566	46.4141	-71.2353	195	2005-2012	-	-
Disraeli-2	7022002	45.904	-71.2664	323	2007-2012	-	-
Frampton-2	7052554	46.4636	-70.7624	380	2005-2012	-	-
Hilaire	7023130	45.8249	-70.8568	500	1990-2012	-	-
Honfleur-2	7053141	46.6746	-70.9072	213	2005-2012	-	-
Jules	70233GH	46.2613	-70.9019	308	2007-2012	-	-
Kinnear's-Mills-2	7023467	46.216	-71.3913	333	2007-2012	-	-
Lamartine-2	7053981	47.0518	-70.3796	68	2007-2012	-	-
Montmagny	7055210	46.9787	-70.5896	15	1958-2012	1177.8	4.95
N.-D.-du-Rosaire	7055405	46.849	-70.4539	425	1989-2012	-	-
Rivière-du-Sud	7056617	46.897	-70.6382	63	2007-2012	-	-
St-Camille	7056930	46.4898	-70.213	402	1963-2012	1247.7	3.11
St-Charles	7056947	46.7206	-70.9336	117	2007-2012	-	-
St-Côme-Linière	7027083	46.0469	-70.5131	254	1965-2012	1022.7	4.22
St-Édouard	7027118	46.5987	-71.7352	79	2007-2012	-	-
Ste-Germaine	7057287	46.4332	-70.5023	497	1945-2012	1224.3	3.2
Ste-Lucie	7057515	46.7359	-70.0272	363	1963-2012	1211.9	2.92
St-Éphrem	7027200	46.0622	-70.9585	322	1929-2012	1125.8	4.23
St-Ferdinand	7027248	46.0991	-71.5146	289	1963-2012	1232.1	4.56
St-Flavien	7027259	46.4738	-71.5411	134	1958-2012	1168.7	4.4
St-Georges	7027283	46.1522	-70.7068	171	1960-2012	1032.6	4.65
St-Honoré	7027315	46.063	-70.7857	305	2007-2012	-	-
St-Jean-Port-Joli	7057397	47.1742	-70.2614	40	2006-2012	-	-
St-Marcel	7057523	46.9276	-70.0158	396	2008-2012	-	-
St-Michel	7057567	46.8309	-70.8847	50	1978-2012	1167.7	4.54
St-Pamphile	7057600	46.9861	-69.7725	366	1950-2012	1091.1	3.37
St-Philémon-2	705765B	46.644	-70.5077	360	2008-2012	-	-
St-Pierre	7027656	46.2463	-71.2098	375	1963-2012	1234	3.97
St-Prosper	7027660	46.1913	-70.4858	304	1940-2012	1116.9	3.75
St-Séverin	7027733	46.3599	-70.9989	351	1964-2012	1278.8	3.59
St-Théophile	7027750	45.9194	-70.5439	435	1950-2012	976.4	4.38
Scott	7027840	46.4978	-71.0776	157	1950-2012	1155.8	4.71
Thetford-Mines	7028441	46.0951	-71.3419	362	1960-2012	1324.5	4.67
Tilly	7028E0T	46.6624	-71.5042	108	2007-2012	-	-
Vallée-Jonction	7028676	46.3583	-70.9279	160	1965-2012	1055.9	4.87

Tableau 1.6 : Liste des stations météorologiques actives en périphérie de la zone d'étude

Nom de la station	No. de la station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période	P. tot. (mm)	T. moy. (°C)
Beauséjour	7020567	46.6646	-71.1661	110	1975-2012	1256.1	4.52
Deschambault	7011982	46.6748	-71.9192	9	1971-2013	1165.1	4.99
Fortierville	7022494	46.4794	-72.0296	65	1972-2013	1094.7	4.82
Isle-aux-Coudres	704CBGH	47.386	-70.3755	24	1968-2013	971.5	4.77
Laurierville	7024250	46.318	-71.6573	148	1937-2013	1179.1	4.94
Lauzon	7024254	46.7552	-71.0885	88	1978-2012	1184.7	4.7
Petite-Riv.-St-Fr.	7046004	47.2958	-70.5694	12	1971-2013	1247	5.35
St-Bruno-de-K.	7056922	47.4534	-69.7782	201	1964-2013	1016.7	3.39
St-Ludger	7027516	45.7593	-70.6717	329	1964-2013	1087.2	4.42
St-Sébastien	7027725	45.7749	-70.9547	447	1960-2013	1243.8	4

Notes : Les stations surlignées en gris correspondent aux stations avec plus de 30 ans de données en 2012; pour fins de comparaison, les précipitations totales et températures moyennes de ces stations sont indiquées pour la période 1980-2012.

Les normales climatiques mensuelles pour les précipitations sous forme de pluie et de neige ainsi que pour les températures minimale et maximale ont été calculées pour les 19 stations actives avec plus de 30 ans de données. Pour l'ensemble de ces stations, les précipitations totales annuelles sont d'environ 1 160 mm/an en moyenne. Un peu plus de 76 % des précipitations totales est sous forme de pluie, dont la majorité tombe généralement au cours des mois de juin, juillet, août et septembre. Les précipitations totales les plus élevées sont observées à la station de Thetford Mines (~ 1 324 mm/an) et les plus faibles à la station de Saint-Théophile (~ 976 mm/an). La température annuelle moyenne dans la région d'étude est de 4.2 °C, variant de 2.9 à 5.0 °C, tandis que les températures mensuelles moyennes fluctuent entre -13.6 et 19.4 °C. Les températures mensuelles minimales sont observées en janvier (-19.7 à -15.6 °C) tandis que les températures mensuelles maximales sont observées en juillet (22.1 à 25.2 °C). Les températures les plus élevées sont généralement observées à la station de Montmagny et les plus faibles à la station de Sainte-Lucie.

1.5.2.3 Hydrographie et bassins versants

Le réseau hydrographique, présenté sur la **carte 5** (annexe 2), est tiré du Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) développé par la Direction du Patrimoine écologique et des Parcs (DPEP) du MDDELCC (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 sur la **carte 6** (annexe 2).

La figure 1.5 combine, de façon simplifiée, les informations présentées sur les **cartes 5 et 6**. Tel que mentionné précédemment, la région de la Chaudière-Appalaches est couverte par les territoires de neuf (9) OBV, dont les superficies à l'intérieur de la région sont compilées au tableau 1.7. Les plans directeurs de ces OBV donnent des informations détaillées sur ces bassins versants. Les territoires des OBV du Chêne, Etchemin et Côte-du-Sud (bassins des rivières Boyer et du Sud) sont presque complètement compris dans la région d'étude. Aussi, seule la partie la plus amont (incluant le lac Mégantic) du grand bassin de la rivière Chaudière n'est pas comprise dans la région.

Livrables PACES no. 5 et 6 : HYDROGRAPHIE et BASSINS VERSANTS

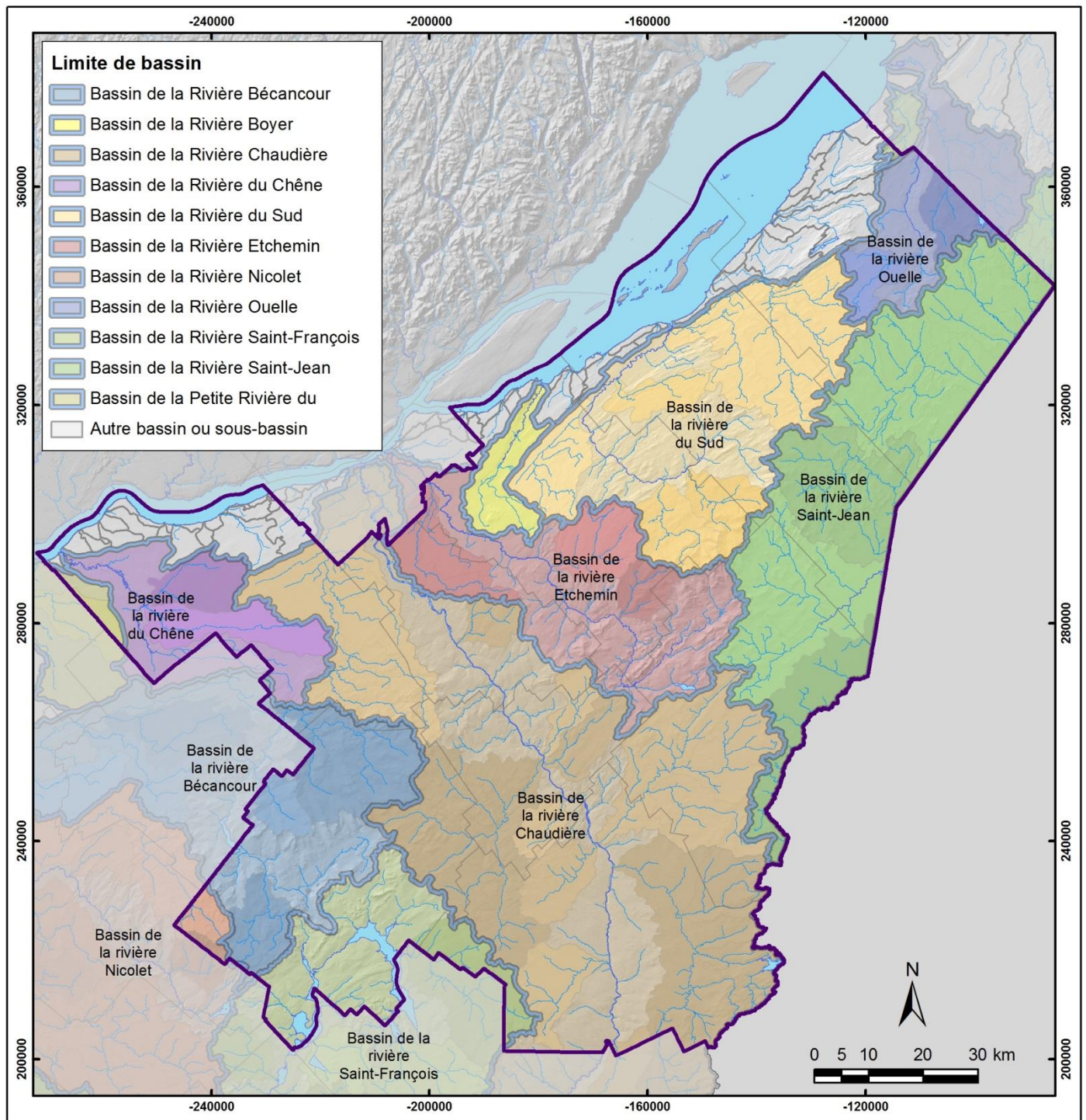


Figure 1.5 : Hydrographie et bassins versants (cartes 5 et 6)

Tableau 1.7 : Liste des principaux bassins versants en Chaudière-Appalaches

Bassin versant (niveau 1)	Sous-bassin (niveau 2)	Superficie (km ²)		% dans la zone d'étude
		Totale ^{(1) (2)}	Zone d'étude	
Bécancour	au Pin	164	155	94.6 %
	Bullard	92	81	88.9 %
	Palmer	408	394	96.4 %
	Total (Bécancour)	2 589	1 020	39.4 %
Boyer	Total (Boyer)	217	217	100 %
Chaudière	Beaurivage	716	716	100 %
	Bras Saint-Victor	728	728	100 %
	Calway	85	85	100 %
	Chasse	77	77	100 %
	de la Grande Coudée	167	167	99.6 %
	des Plantes	121	121	100 %
	du Loup	894	731	81.8 %
	du Moulin	78	78	100 %
	Famine	713	713	100 %
	Pozer	151	151	100 %
	Samson	217	16	7.2 %
	Total (Chaudière)	6 690	5 006	74.8 %
du Chêne	Henri	212	212	100 %
	Huron	146	146	100 %
	Total (du Chêne)	803	691	86.1 %
du Sud	Bras Saint-Michel	195	195	100 %
	Bras Saint-Nicolas	651	651	100 %
	de la Fourche	169	169	100 %
	du Pin	142	142	100 %
	Morigeau	108	108	100 %
	Total (du Sud)	1 920	1 920	100 %
Etchemin	à l'Eau Chaude	92	92	100 %
	des Abénaquis	181	181	100 %
	le Bras	227	227	100 %
	Total (Etchemin)	1 463	1 463	100 %
Nicolet	Bulstrode	593	61	10.3 %
	des Vases	81	17	21.3 %
	Total (Nicolet)	3 411	80	2.3 %
Ouelle	Bras de la Rivière Ouelle	107	107	100 %
	Grande Rivière	391	119	30.3 %
	Total (Ouelle)	838	473	56.4 %
Petite Rivière du Chêne	aux Ormes	131	32	24.3 %
	Total (P. Riv. du Chêne)	451	61	13.5 %

Tableau 1.7 : Liste des principaux bassins versants en Chaudière-Appalaches (suite)

Bassin versant (niveau 1)	Sous-bassin (niveau 2)	Superficie (km ²)		% dans la zone d'étude
		Totale	Zone d'étude	
Saint-François	aux Bleuets	362	146	40.3 %
	Total (Saint-François)	10 622 (8 702)	774	7.3 %
Saint-Jean	Total (Saint-Jean)	72	12	16.4 %
Saint-Jean (fleuve)	Daaquam	684 (641)	641	93.7 %
	Grande Rivière Noire	1627 (960)	899	55.3 %
	Saint-Jean Nord-Ouest	615 (475)	474	77.1 %
	Saint-Jean Sud-Ouest	554 (291)	291	52.5 %
	Total (Saint-Jean-fleuve)	54 752 (7180)	2 305	4.2 %

Notes :

⁽¹⁾ : Les superficies totales des bassins de niveau 1 incluent les superficies de tous les sous-bassins (niveaux 2 à 6), même si ceux-ci ne sont pas indiqués dans le tableau

⁽²⁾ : Les superficies totales des bassins des rivières Saint-François et Saint-Jean incluent la portion hors Québec ; les valeurs indiquées entre parenthèses correspondent à la portion des superficies totales située au Québec.

Même si son étendue excède largement les limites de la Chaudière-Appalaches, le bassin du fleuve Saint-Jean couvre une grande partie du territoire dans un secteur montagneux et généralement boisé. A noter que la superficie totale du bassin du fleuve Saint-Jean, incluant la portion au Nouveau-Brunswick et aux États-Unis, est d'environ 54 752 km² (NOAA, 2010), dont environ 13% est situé au Québec. Les rivières importantes sont évidemment les principaux cours d'eau des cinq bassins versants principaux : la rivière du Chêne, la rivière Chaudière, la rivière Etchemin, la rivière du Sud et la rivière Saint-Jean. Les rivières Boyer, Nicolet, Saint-François, Bécancour et Ouelle possèdent elles aussi des bassins versants d'importance mais dont la superficie est plus restreinte à l'intérieur de la région d'étude (voir tableau 1.7). Le réseau hydrographique est plus dense dans les Appalaches que sous la limite marine dans les basses-terres du St-Laurent, étant donné la topographie plus accidentée de la région appalachienne. Toutefois, ce réseau hydrographique est aussi caractérisé par la présence de drains agricoles, particulièrement dans la région des basses-terres. Ce drainage agricole peut influencer de façon significative le régime hydrique et la qualité de l'eau de surface.

Le tableau 1.8 présente la longueur et le débit des principales rivières de la zone d'étude ; les informations présentées ont respectivement été obtenues du CRHQ (MDDELCC, 2011a) pour la longueur et du CEHQ (2012) pour les données hydrométriques. A noter que les débits indiqués dans le tableau 1.8 sont des débits annuels moyens et que les variations de débits quotidiens observées peuvent être beaucoup plus importantes. Les débits indiqués peuvent également être influencés par la présence de barrages. Par ailleurs, étant donné l'emplacement des stations hydrométriques disponibles, les débits indiqués au tableau 1.8 ne sont pas toujours représentatifs des débits réels des cours d'eau à leur exutoire, qui peuvent être plus élevés.

Au total, on dénombre plus de 5 400 plans d'eau sur la région d'étude, dont les principaux sont le Lac Saint-François, le Lac Aylmer et le Lac du Portage. La superficie, la profondeur et l'exutoire de ces plans d'eau sont présentés au tableau 1.9 et proviennent respectivement des données du CRHQ (MDDELCC, 2011a) et des cartes bathymétriques du Gouvernement du Québec (MEQ, 1993, 1992a, 1992b, 1992c et 1988; MRN, 1984, 1983a, 1983b, 1983c, 1983d, 1982a, 1982b, 1982c, 1982d, 1982e, 1982f, 1980, 1977a, 1977b, 1976a, 1976b et 1968; MTCP, 1976, 1963a, 1963b, 1963c et 1952).

Tableau 1.8 : Liste des principaux cours d'eau en Chaudière-Appalaches

Bassin versant	Cours d'eau	Longueur (km) ⁽¹⁾	Débit annuel moyen (m ³ /s)			
			Moyenne	Plage	Station	Période
Bécancour	Bécancour	203	52.9	1.6-850	024007	1975-2001
Boyer	Boyer	33.6	4.3	0.03-83.2	023004	1996-2010
Chaudière	Chaudière	196	116.9	3-2 140	023402	1915-2010
du Chêne	du Chêne	87.3	-	-	-	-
du Sud	du Sud	73.5	20.2	0.1-458	023106	1972-2010
Etchemin	Etchemin	132	27.1	0.7-368	023303	1980-2010
Ouelle	Ouelle	75.1	15.7	0.2-427	022704	1982-2010
St-François	St-François	254	190 ⁽³⁾	-	-	-

Notes :

⁽¹⁾ : Les longueurs représentent la somme des tronçons dont l'ordre de Strahler est égal ou supérieur à 2

⁽²⁾ : Sauf indication contraire, les débits moyens annuels ont été calculés à partir des données hydrométriques pour les stations les plus en aval du cours d'eau considéré.

Tableau 1.9 : Liste des principaux plans d'eau en Chaudière-Appalaches

Bassin versant (niveau 1)	Plan d'eau	Superficie (km ²)	Profondeur (m)	Exutoire
Bécancour	Lac Breeches	2.5	31	Riv. Blanche
	Lac à la Truite	1.2	40	Riv. Bécancour
	Lac Bécancour	1	2	Riv. Bécancour
	Lac de l'Est	0.8	18	Riv. au Pin
Boyer	Lac Saint-Charles	0.6	8	Riv. Boyer
Chaudière	Lac du Portage	4.2	N/D	Riv. du Portage
	Lac Fortin	1.6	13	Riv. du Moulin
	Lac des Abénaquis	1.2	4	Riv. des Abénaquis
	Lac des Îles	1	1	Riv. de la Grande Coudée
	Lac à la Raquette	0.8	11	Riv. Famine
	Lac Algonquin	0.8	2	Riv. Veilleux
	Lac Poulin	0.7	26	Riv. Pozer
	Lac Champagne	0.6	N/D	Riv. du Portage
	Lac Douglas	0.6	N/D	Riv. du Petit Portage
des Mères	Lac aux Canards	1.1	N/D	Riv. des Mères
du Sud	Lac des Plaines	0.6	3	Bras Saint-Nicolas
Etchemin	Lac Etchemin	2.4	31	Riv. Etchemin
Ouelle	Lac Sainte-Anne	2.7	N/D	Riv. Sainte-Anne
	Lac Therrien	1.4	2	Bras de la Riv. Ouelle

Tableau 1.9 (suite) : Liste des principaux plans d'eau en Chaudière-Appalaches

Bassin versant (niveau 1)	Plan d'eau	Superficie (km ²)	Profondeur (m)	Exutoire
Saint-François	Lac Saint-François	50.5	40	Riv. Saint-François
	Lac Aylmer	33.3	36	Riv. Saint-François
	Lac à la Truite	2.4	40	Riv. de l'Or
	Lac du Huit	2.4	20	Riv. de l'Or
	Lac Caribou	1.4	5	Riv. Ashberham
	Lac Bolduc	1.1	5	Riv. Muskrat
	Petit lac Saint-	1.1	15	Riv. Ashberham
	Lac aux Grelots	0.5	2	Riv. aux Bleuets
Saint-Jean	Lac Leverrier	1.7	N/D	Riv. Leverrier
	Lac Frontière	1.1	5	Riv. Noire Nord-Ouest
	Lac Talon	0.8	1	Petite Riv. Noire
	Lac Falardeau	0.6	4	Riv. Saint-Jean Sud-Ouest
	Lac Joli	0.5	3	Riv. Saint-Jean Sud-Ouest
Trois Saumons	Lac Trois Saumons	2.7	18	Riv. Trois Saumons

Les sections suivantes décrivent brièvement les caractéristiques des principaux bassins versant occupant une portion importante de la région d'étude. On y décrit la nature du territoire et de son occupation, de même que la qualité de l'eau de surface.

Territoire de l'Organisme de bassins versants de la zone du Chêne (OBV du Chêne) :

Le territoire d'intervention de l'OBV du Chêne couvre 1 180 km² sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent à une quarantaine de kilomètres en amont de la ville de Québec. Ce territoire est bordé par le Fleuve, au nord, et s'étend d'est en ouest depuis Lévis (secteur Saint-Nicolas) jusqu'à Leclercville et au sud jusqu'à Sainte-Agathe-de-Lotbinière. Vingt (20) municipalités sont présentes sur le territoire, dont sept (7) complètement incluses dans la zone. Le territoire de l'OBV du Chêne se trouve à 86% dans la MRC de Lotbinière, et respectivement à 9% et 5% sur ceux de la MRC de l'Érable (Centre-du-Québec) et de la ville de Lévis. L'OBV du Chêne fait partie des basses-terres du Saint-Laurent. De 255 m NMM au pied des Appalaches au sud, l'altitude décroît progressivement vers le nord pour atteindre 10 m au pied de l'escarpement du Saint-Laurent. Le haut de l'escarpement est à environ 40 m d'altitude.

Plus de la moitié du territoire est couvert de forêts dont près du tiers sont des milieux humides (tourbière boisée, ombrotrophe, minérotrophe, marécage, marais, prairie humide, eau peu profonde), qui à eux seuls occupent 18% du territoire. Un tiers de la zone du Chêne est voué à l'agriculture. Les terres agricoles se concentrent principalement au nord de la zone, en bordure du Fleuve dans les terres argileuses et limoneuses; dans le sud, à la tête des rivières Huron, à Saint-Flavien et du Chêne, à Sainte-Agathe-de-Lotbinière, elles occupent des terrains plus sablonneux. Les infrastructures et les agglomérations villageoises occupent 6% du territoire. La répartition de l'occupation du sol n'est pas uniforme dans la zone; elle varie d'un sous-bassin à l'autre.

L'ensemble du réseau hydrographique de la zone du Chêne est caractérisé par une grande densité de cours d'eau, une abondance de milieux humides et une quasi absence de lacs. Les cours d'eau ont un faible débit, sauf en période de crue ou lors de fortes précipitations estivales alors qu'ils se gonflent

rapidement et débordent parfois. À ce jour, il n'existe aucune station hydrométrique sur le territoire de la zone du Chêne. De façon générale, l'eau des cours d'eau de la zone du Chêne est de qualité mauvaise à très mauvaise. Les principaux paramètres physico-chimiques déclassant sont le phosphore, les matières en suspension et la turbidité. Deux indices mènent à ces constats, soit l'Indice de diatomées de l'est du Canada (IDEC) et l'Indice de qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQBP).

Territoire du Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC) :

La rivière Chaudière est située sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent. Elle prend sa source dans le lac Mégantic et coule en direction nord sur 185 km pour se jeter dans le fleuve Saint-Laurent aux environs de la ville de Lévis (secteur Saint-Romuald). Le bassin versant de la rivière Chaudière draine un vaste territoire d'une superficie de 6 695 km². Le bassin versant de la rivière Chaudière chevauche deux régions naturelles: les Appalaches, qui occupent 95% de la superficie du bassin versant, et les basses-terres du Saint-Laurent, qui constituent 5% du territoire.

Le bassin versant de la rivière Chaudière chevauche en partie deux régions administratives (Estrie et Chaudière-Appalaches), touche sept (7) municipalités régionales de comté (MRC) et inclut la Ville de Lévis (ville hors MRC). On y trouve 78 municipalités dont 41 sont entièrement incluses dans le bassin versant et 37 qui ne le sont que partiellement. La population du bassin versant de la rivière Chaudière était de 180 000 en 2006, soit 27 habitants par km². La population a augmenté de 43% depuis 1976, principalement dans la partie nord du bassin versant dans la région administrative de Chaudière-Appalaches. Sur le territoire concerné par le projet actuel, on dénombre un total de 58 municipalités. Les principales agglomérations sont Lévis (45 500 habitants), Sainte-Marie (11 700 habitants) et Saint-Georges (30 000 habitants). Le bassin versant de la rivière Chaudière est dominé par la forêt qui occupe 68% du territoire. Les terres agricoles couvrent, quant à elles, près du quart du territoire, soit 23%. La forêt est concentrée dans la portion amont du bassin versant, tandis que les terres agricoles sont principalement localisées dans la portion aval (de Saint-Georges à Lévis). Les milieux humides représentent 2% du territoire, les sols nus 4 %, l'eau 2 % et les autres utilisations 1%.

La qualité de l'eau du bassin versant de la rivière Chaudière est étroitement liée aux activités humaines. Sur le cours d'eau principal, les eaux sont de qualité satisfaisante à la tête du bassin jusqu'à Saint-Joseph-de-Beauce. À partir de ce point, les activités agricoles, qui occupent une place importante au nord, exercent une influence sur la qualité de l'eau jusqu'à l'embouchure. Les rivières Bras Saint-Victor, Savoie, Beurivage, des îles Brûlées et Bras d'Henri ainsi que le tronçon Scott-Saint-Romuald de la Chaudière présentent des niveaux significatifs de pollution liés, entre autres, à l'augmentation des éléments nutritifs. Même si les travaux d'assainissement sont très avancés à l'échelle du bassin versant, les objectifs de qualité de l'eau ne sont toujours pas atteints dans certains tronçons et affluents. Des efforts supplémentaires devront être consentis par les usagers afin de réduire les apports dans la partie nord du bassin versant.

Territoire du Conseil de bassin de la rivière Etchemin (CBE) :

Le CBE couvre la zone Etchemin/Lévis-est qui fait 1581 km² et est située du côté sud du fleuve Saint-Laurent face à la ville de Québec. Ce territoire est borné par le fleuve Saint-Laurent, au nord, à l'ouest par le bassin de la rivière Chaudière et au nord-est par les bassins de la rivière du Sud, de la rivière Boyer et du ruisseau de l'Église. La physiographie de ce territoire est marquée par la présence de trois ensembles différents, parallèles au fleuve Saint-Laurent et disposés vers l'intérieur des terres de façon successive, en fonction de l'altitude et des formes du relief. La Plaine du Nord est caractérisée par les basses-Terres du Saint-Laurent, le piémont constituant la zone de transition entre les basses-terres et la zone de plateau et de collines des Appalaches, et le Plateau appalachien et les collines affiliées à la chaîne des Monts Notre-Dame. Le CBE couvre plusieurs territoires hydrographiques répartis en deux secteurs distincts: le secteur

Etchemin (1466 km²) pour le bassin versant de la rivière Etchemin et le secteur Lévis-est (115 km²) pour les bassins versants des rivières À la Scie, Rouge, Lecours, Lallemand et Ville-Guay.

Les principales routes sont l'autoroute 20 et la 132, qui longent le fleuve (axe Est-Ouest) de même que la 277 et la 279 (axe Nord-Sud). Le territoire du CBE est majoritairement dominé par les forêts (environ 64 %, soit 1008 km²). Ces dernières étant évidemment concentrées dans le secteur amont de la zone. L'agriculture occupe quant à elle 486 km², soit 31 % du territoire. Elle se concentre particulièrement dans la région naturelle des basses-terres du Saint-Laurent ainsi que secondairement dans le secteur du piémont. Les activités urbaines utilisent environ 46 km², soit 3 % du territoire. Les étendues d'eau et les milieux humides ne représentent que 29.5 km², soit moins de 2 % de la zone. La répartition de l'occupation du sol n'est pas uniforme dans la zone; elle varie d'un secteur à l'autre. La zone Etchemin/Lévis-est est entièrement intégrée à la région administrative de Chaudière-Appalaches, où la zone représente approximativement 10.4 % de la superficie totale. Le territoire du CBE couvre les MRC de Bellechasse, de La Nouvelle-Beauce, des Etchemins et de Robert-Cliche ainsi que de la grande ville de Lévis (quartiers Saint-Romuald, Saint-Jean-Chrysostome, Desjardins et Pintendre/St-Joseph de la Pointe Lévy). Vingt-cinq (25) municipalités sont présentes sur le territoire, dont cinq (5) entièrement dans la zone.

Au niveau de la qualité des eaux de surface, le portrait est distinct pour chacun des deux secteurs : soit Etchemin et Lévis-Est. De façon générale, la qualité de l'eau des cours d'eau est étroitement liée à l'occupation du territoire sur les bassins versants. Le secteur situé en amont de l'Etchemin, occupé en majeure partie par la forêt et les Appalaches, montre une eau de bonne qualité. Une dégradation de la qualité de l'eau est observée dans la portion terminale de ce bassin versant où l'Indice de qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQBP) est passé de douteuse, en 2001-2003, à mauvaise en 2006-2008, notamment en raison de sa turbidité très changeante, signe d'une grande influence à la contamination d'origine diffuse. Cette portion, qui repose sur les basses-terres du Saint-Laurent, est plus densément peuplée et plus largement utilisée à des fins agricoles.

Peu d'information existe sur les eaux souterraines de la zone Etchemin/Lévis-Est. Il est connu du CBE que plusieurs municipalités peinent à trouver des sources d'approvisionnement en eau souterraine pouvant répondre aux besoins actuels et futurs de certaines communautés. Plusieurs puits sont affectés par des concentrations significatives de manganèse, de fer et de sulfures. L'eau souterraine est utilisée par un grand nombre de personnes en milieu rural dans la Zone Etchemin/Lévis-Est. Dans plusieurs petites localités de la Zone, elle constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable. En excluant le secteur de Lévis-est, on estime que 26 % de la population s'approvisionne en eau potable de puits individuels ou par des réseaux de moins de 50 personnes, systèmes non-soumis au contrôle réglementaire de l'eau consommée.

Territoire de l'Organisme des bassins versants de la Côte-du-Sud (OBV de la Côte-du-Sud) :

Le territoire de l'OBV de la Côte-du-Sud est dans sa quasi-totalité compris dans la région de la Chaudière-Appalaches. Son territoire s'étend de Lévis, à l'ouest, à Saint-Roch-des-Aulnaies, à l'est, et jusqu'à St-Philémon, au sud. Il a une superficie totale d'environ 2 800 km². L'OBV de la Côte-du-Sud s'étend sur deux provinces géologiques : les basses-terres du Saint-Laurent (le long du fleuve) et les Appalaches.

Les principales routes sont l'autoroute 20 et la 132, qui longent le fleuve (axe Est-Ouest), ainsi que la 279, la 281, la 283, et la 285 (axe Nord-Sud). Le territoire de l'OBV de la Côte-du-Sud est majoritairement boisé (environ 65 %, soit 1 829 km²). Les terres agricoles couvrent quant à elles environ 839 km², soit 30 % du territoire. La part d'urbanisation (villes et villages) s'élève à 0,67 % du territoire (18,6 km²), alors que les milieux humides et les tourbières représentent 2,55 % (71 km²) du territoire. Finalement, les étendues d'eau occupent une superficie totale de 0,94 % (26,35 km²). Trois (3) MRC se partagent la majeure partie du territoire : la MRC de Montmagny (37,4 % du territoire, soit 1 044 km²), la MRC de Bellechasse (36,9 %, soit 1 033 km²), et la MRC de L'Islet (24,6 %, soit 688 km²). Trente-neuf (39) municipalités sont comprises

en totalité ou en partie dans l'OBV. La municipalité la plus peuplée est Montmagny, avec plus de 11 000 des 50 000 habitants de ce territoire.

Il est possible de définir 2 zones de qualité des eaux de surface dans l'OBV Côte-du-Sud. Les eaux de la partie appalachienne de l'OBV sont de bonne qualité, selon l'indice de qualité bactériologique et physicochimique. Les stations situées dans les basses-terres du St-Laurent, où il y a plus d'activités agricoles, montrent généralement une qualité d'eau dégradée, variant de « douteuse » à « très mauvaise ». La quantité d'eau de surface ne semble pas être un problème, bien que certaines pénuries d'eau aient été rapportées au cours des dernières années. Les eaux souterraines alimentent environ 63 % de la population du territoire de l'OBV.

Territoire de l'Organisme de bassin versant du fleuve Saint-Jean (OBV fleuve Saint-Jean) :

Le bassin versant du fleuve Saint-Jean est localisé sur le versant Sud-Est des Appalaches, à 40% dans la région administrative de la Chaudière-Appalaches et à 60% dans celle du Bas-Saint-Laurent. C'est un bassin versant interprovincial et international : 14% du bassin étant au Québec, alors que la partie en aval est partagée entre le Maine et le Nouveau-Brunswick. L'OBV du fleuve Saint-Jean couvre le territoire de la portion québécoise de ce bassin versant qui est entièrement incluse dans la province naturelle des Appalaches et couvre plus 7000 km².

La zone sud-ouest (portion Chaudière-Appalaches du bassin versant) est traversée par des routes secondaires telles que les routes 204, 283 et 285. Cette zone est caractérisée par plusieurs petites municipalités rurales dévitalisées dont l'économie est surtout basée sur la première et deuxième transformation du bois et des produits de la forêt, telle que l'acériculture. L'agriculture est présente mais très marginale, occupant environ 5% de la superficie, tandis que la forêt en occupe près de 90%. Cette zone du bassin versant du fleuve Saint-Jean se caractérise par l'omniprésence de milieux humides de qualité: tourbières, marais et marécages arbustifs, dont plusieurs semblent en très bonne condition. Ces milieux pourraient être potentiellement d'importantes zones de recharge pour les aquifères sous-jacents. Cette zone se caractérise aussi par la présence de nombreux petits lacs peu profonds que la végétation colonise peu à peu. Cette zone du bassin versant est localisée dans "l'arrière-pays" des MRC de l'Islet, Montmagny et les Etchemins, occupant approximativement 40% de leurs territoires respectifs.

Aucune station permanente de suivi de la qualité de l'eau de surface n'est présente dans la zone sud-ouest du bassin du fleuve Saint-Jean. Plusieurs mesures ponctuelles témoignent cependant d'une bonne qualité d'eau. Au niveau des lacs et cours d'eau, à l'exception de quelques signes ponctuels d'eutrophisation et de dégradation des habitats aquatiques, les eaux de surfaces sont de bonne qualité.

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. Sur le territoire à l'étude, le CEHQ a opéré ou opère 32 stations de jaugeage des débits (figure 1.6). Le tableau 1.10 présente des informations sur les stations hydrométriques mesurant le débit des cours d'eau. Pour les stations de la zone d'étude, ce tableau montre 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, aire drainée par le cours d'eau, régime du cours d'eau (naturel ou influencé) et statut de la station. Parmi les 32 stations disponibles, 21 stations sont inactives, incluant 6 qui possèdent un historique de données de 3.5 à 9 ans se terminant après l'année 2000. Des 11 stations encore ouvertes, 7 stations possèdent un historique de plus de 30 ans. 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 et Arnold \(2001\)](#) ont également été obtenus ([Poirier, 2012](#)) (voir tableau 1.10). Les données de débit servent aussi à caler la modélisation hydrologique, qui a été réalisée à l'aide du simulateur SWAT dans certains sous-bassins spécifiques de la zone d'étude (section 6.4).

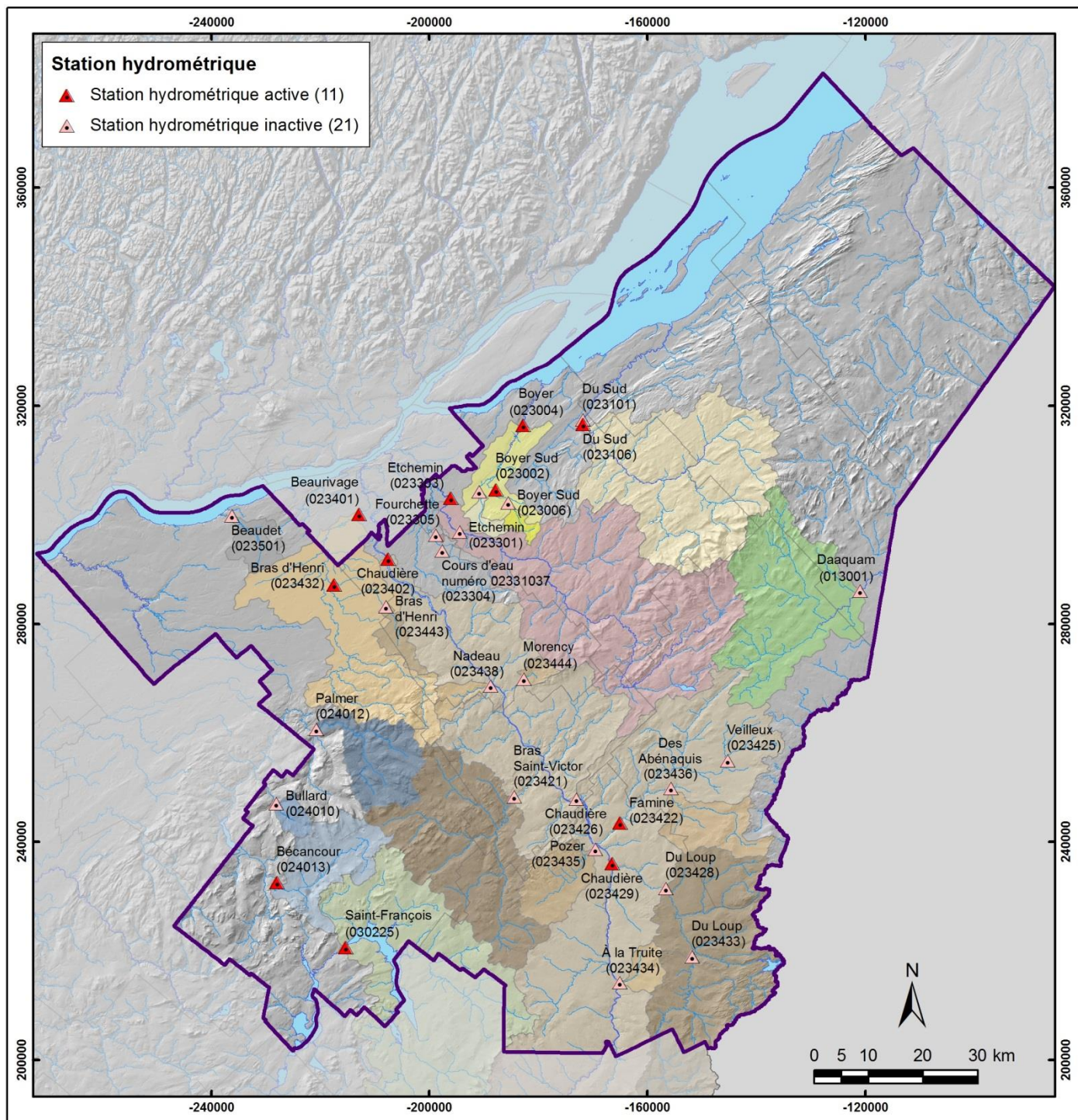


Figure 1.6 : Localisation des stations hydrométriques

Tableau 1.10 Liste des stations hydrométriques en Chaudière-Appalaches

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			
Daaquam	013001	46.5575	-70.0806	345.5	1967-1977	-	-	-	-	586.1	Naturel	Inactive
Boyer Sud	023002	46.7075	-70.9605	80.7	1993-2010	-	-	-	-	60.9	Naturel	Active
Boyer	023004	46.8158	-70.9006	31	1996-2010	4.3	0.03-83.2	0.5	0.02-6.2	190.8	Naturel	Active
Boyer Nord	023005	46.703	-71.002	73.9	1996-2006	-	-	-	-	28	Naturel	Inactive
Boyer Sud	023006	46.687	-70.9308	105.3	1999-2006	-	-	-	-	21.4	Naturel	Inactive
Du Sud	023101	46.8278	-70.7575	59	1923-1966	20.1	0-436	9.1	0-91.6	819.6	Influencé (j)	Inactive
Du Sud	023106	46.82	-70.7561	69.8	1966-2010	20.2	0.1-458	5.9	0.1-39	818.4	Influencé (j)	Active
Etchemin	023301	46.6356	-71.0442	117.3	1927-1981	27.5	0.65-481	8	0.54-63.4	1117.3	Influencé (j)	Inactive
Etchemin	023303	46.6913	-71.068	82	1980-2010	27.1	0.73-368	8.1	0.59-48.3	1150.1	Influencé (j)	Active
Riv. 02331037	023304	46.6037	-71.0846	130.4	2001-2007	-	-	-	-	3.7	Naturel	Inactive
Fourchette	023305	46.6292	-71.1023	104.7	2001-2007	-	-	-	-	2	Naturel	Inactive
Beaurivage	023401	46.6589	-71.2876	73.7	1925-2010	14.3	0.09-317	4.1	0.06-96.3	706.5	Naturel	Active
Chaudière	023402	46.5869	-71.2136	120	1915-2010	116.9	3-2140	35	1.66-790	5821.8	Influencé (j)	Active
Bras St-Victor	023421	46.2017	-70.8934	186.6	1964-1972	13	0.32-272	1.3	0.06-10.8	663.2	Naturel	Inactive
Famine	023422	46.1639	-70.6392	189.2	1964-2010	15	0.04-345	1.5	0.04-13.1	695.5	Naturel	Active
Veilleux	023425	46.272	-70.3875	339.5	1938-1946	-	-	-	-	108	Naturel	Inactive
Chaudière	023426	46.2011	-70.7445	156.4	1965-1981	85.7	1.98-1370	16.9	1.06-126	4105.2	Influencé (j)	Inactive
Du Loup	023428	46.0584	-70.5261	230.8	1967-1972	15.4	0.14-242	5.8	0.11-51.9	806.1	Naturel	Inactive
Chaudière	023429	46.0964	-70.6544	176.3	1979-2010	60.6	0.11-1324	11.8	0.1-77.2	3078.6	Influencé (j)	Active
Bras d'Henri	023432	46.5402	-71.3401	118.1	1988-2010	-	-	-	-	153.4	Naturel	Active
Du Loup	023433	45.9467	-70.4592	303.4	1972-1986	-	-	-	-	379.7	Naturel	Inactive
À la Truite	023434	45.9003	-70.6289	257.7	1972-1978	-	-	-	-	47.9	Naturel	Inactive
Pozer	023435	46.1195	-70.6959	178.9	1972-1978	-	-	-	-	148.6	Naturel	Inactive
Des Abénaquis	023436	46.2234	-70.5208	256.4	1972-1978	-	-	-	-	153.5	Naturel	Inactive
Nadeau	023438	46.3831	-70.9578	154.9	1972-1978	-	-	-	-	40.2	Naturel	Inactive
Bras d'Henri	023443	46.5083	-71.215	149.5	1999-2006	1.1	0.01-57.8	0.4	0.01-57.8	47.4	Naturel	Inactive

Tableau 1.10 : Liste des stations hydrométriques en Chaudière-Appalaches (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			
Morency	023444	46.3966	-70.8794	283.6	2002-2006	-	-	-	-	23.6	Naturel	Inactive
Beaudet	023501	46.6478	-71.5928	50	1973-1978	-	-	-	-	67	Naturel	Inactive
Bullard	024010	46.1756	-71.4573	261.8	1977-1995	-	-	-	-	35.9	Naturel	Inactive
Palmer	024012	46.3006	-71.3695	210.3	1973-1978	-	-	-	-	214	Naturel	Inactive
Bécancour	024013	46.0453	-71.4473	208	1979-2010	6.1	0.46-331.2	2.3	0.23-46	229	Naturel	Active
St-François	030225	45.9426	-71.2785	279.7	1968-2010	-	-	-	-	1218.8	Influencé	Active

Notes : Les stations surlignées en gris correspondent aux stations actives dont les données disponibles couvraient plus de 30 ans en 2010; les valeurs moyennes de débit et de débit de base ont été calculées pour la période indiquée dans le tableau, pour les stations dont les données étaient disponibles.

1.5.2.5 Couverture végétale

Les différents types de peuplements forestiers sont présentés à la **carte 8** (annexe 2) ainsi qu'à la figure 1.7. Les données sont issues du Système d'information écoforestière (SIEF) du Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN, 2007) et sont résumées au tableau 1.11. Les peuplements forestiers ont été regroupés en trois classes afin de simplifier la représentation cartographique : feuillus, résineux et mélangés (mixte). Les forêts mixtes occupent la plus grande partie du territoire (31.6%), suivi des conifères (18.3%) et des feuillus (15.2%). Au total, 64% du territoire est ainsi forestier.

Tableau 1.11 : Types et superficies des peuplements forestiers en Chaudière-Appalaches

Peuplement forestier	Sous-catégorie	Superficie (km ²)	Proportion de la zone d'étude (%)
Feuillus (> 75 % de la surface)	Bétulaie	113.6	0.7 %
	Érablière	1768.6	11.3 %
	Feuillus indifférenciés	274.3	1.8 %
	Frênaie	0.2	< 0.1 %
	Hêtraie	1.2	< 0.1 %
	Peupleraie	207.5	1.3 %
	Total (feuillus)	2365.4	15.2 %
Mixte (25-75 % de résineux)	Bétulaie avec résineux	534.1	3.4 %
	Cédrière avec feuillus	50.2	0.3 %
	Chênaie avec résineux	0.1	< 0.1 %
	Érablière avec résineux	1048.6	6.7 %
	Feuillus indifférenciés avec résineux	843	5.4 %
	Frênaie avec résineux	0.3	0 %
	Mélézin avec feuillus	16	0.1 %
	Pessière avec feuillus	156	1 %
	Peupleraie avec résineux	524.6	3.4 %
	Pinède avec feuillus	10.6	0.1 %
	Prucheraie avec feuillus	11.5	0.1 %
	Résineux indifférenciés avec feuillus	612.8	3.9 %
	Sapinière avec feuillus	1121.2	7.2 %
Total (mixte)	4928.8	31.6 %	
Résineux (> 75 % de la surface)	Cédrière	175.1	1.1 %
	Mélézin	84.1	0.5 %
	Pessière	672.1	4.3 %
	Pinède	5	< 0.1 %
	Prucheraie	1.1	0 %
	Résineux indifférenciés	1069.3	6.9 %
	Sapinière	842.3	5.4 %
	Total (résineux)	2848.9	18.3 %
Non forestier	Total (non forestier)	5457.9	36 %

Livrable PACES no. 8 : COUVERTURE VÉGÉTALE

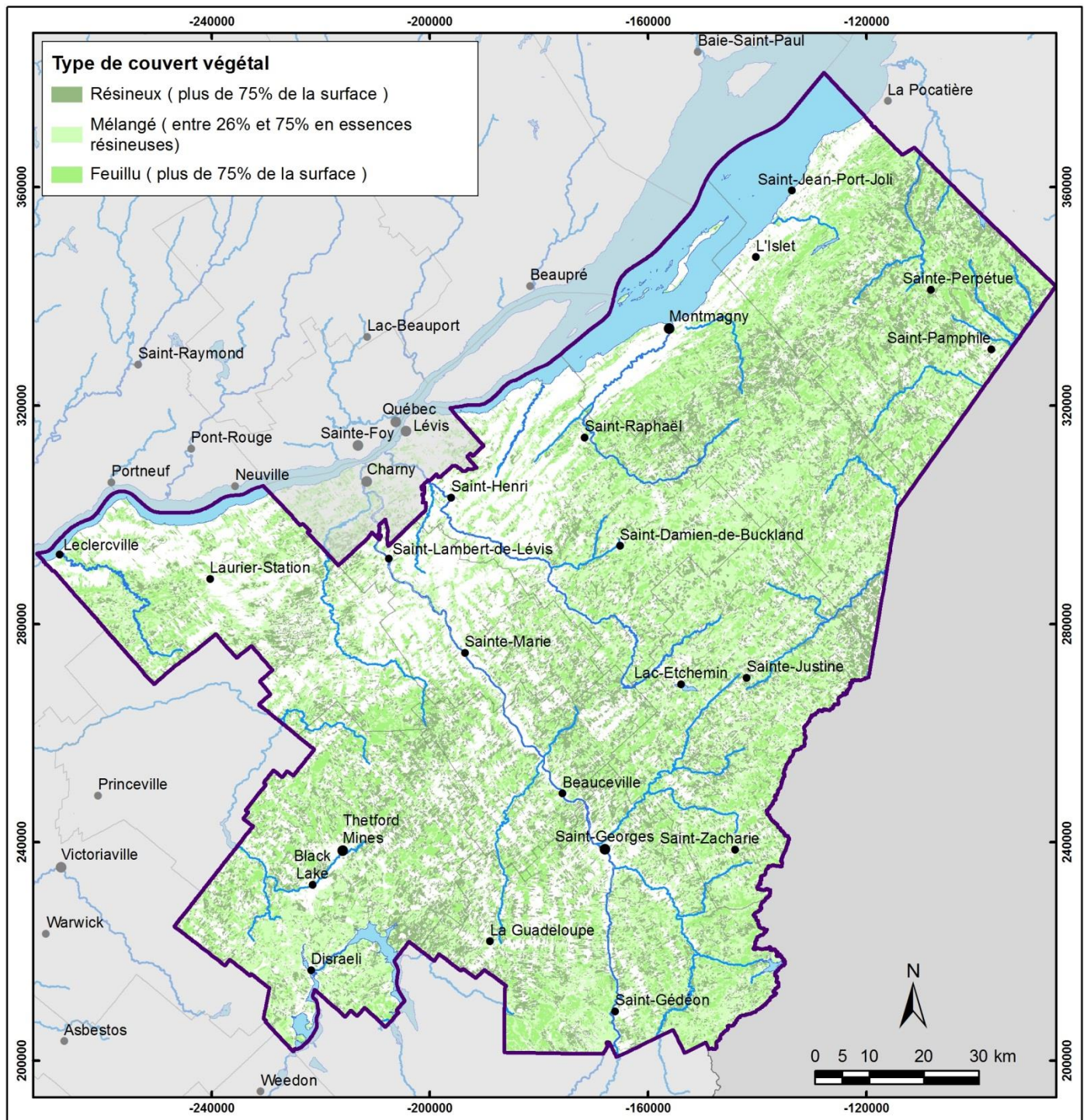


Figure 1.7 : Couverture végétale en Chaudière-Appalaches (carte 8)

1.5.2.6 Milieux humides

La **carte 9** (annexe 2) présente la localisation et la différenciation des milieux humides lorsque l'information est disponible. Ceux-ci ont aussi été intégrés à la **carte 7** (Occupation du sol), mais sans différenciation et à l'intérieur de la classe « friche » incluant les sites dénudés ou semi-dénudé secs et humides. Les données sur les milieux humides potentiels et détaillés, lorsque disponibles, ont été obtenues du MDDELCC. Pour la majeure partie de la région de Chaudière-Appalaches, seuls les milieux humides potentiels non différenciés ([MDDEFP, 2011c](#)) sont disponibles, à l'exception de la région de Lotbinière pour laquelle la cartographie des milieux humides détaillés a été réalisée dans le cadre d'un projet de collaboration entre le [MDDEFP et Canards illimités \(2012\)](#). Les différents types de milieux humides illustrés sur figure 1.8 sont résumés au tableau 1.12 avec leur superficie respective. La définition complète de chaque type de milieu est disponible dans le rapport synthèse sur la cartographie des milieux humides des basses-terres du Saint-Laurent et de la plaine du Lac Saint-Jean ([MDDEFP et Canards illimités, 2012](#)). Au total, les milieux humides (potentiels et détaillés) couvrent 12.3 % de la région d'étude.

Tableau 1.12 : Types et superficies des milieux humides

Type de milieu humide	Superficie (km ²)	Proportion (%)	
		Milieux humides	Zone d'étude
Eau peu profonde	22.2	1.2 %	0.14 %
Marais	10	0.5 %	0.06 %
Marécage	76.9	4 %	0.5 %
Milieu humide potentiel	1548.6	80.5 %	9.9 %
Prairie humide	0.6	0.03 %	< 0.01 %
Tourbière	79.4	4.1 %	0.2
	182.9	9.5 %	0.8
	2.6	0.1 %	0.01
Total	1923.2	100 %	12.3 %

Les milieux humides se retrouvent dispersés dans la région d'étude, mais on distingue quelques milieux humides plus importants en termes de superficie dans les MRC Les Etchemins et Lotbinière. Par ailleurs, bien que les relations potentielles entre les milieux humides et les eaux souterraines de la zone d'étude n'aient pas été établies pour l'ensemble de la région d'étude, 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 »). Des travaux spécifiques sur les relations entre les milieux humides et les aquifères ont par ailleurs été réalisés dans le cadre d'un projet doctoral dans le bassin de la rivière du Chêne (section 6.2; rapport en annexe de [Bourgault et al., 2015](#)).

Livrable PACES no. 9 : MILIEUX HUMIDES

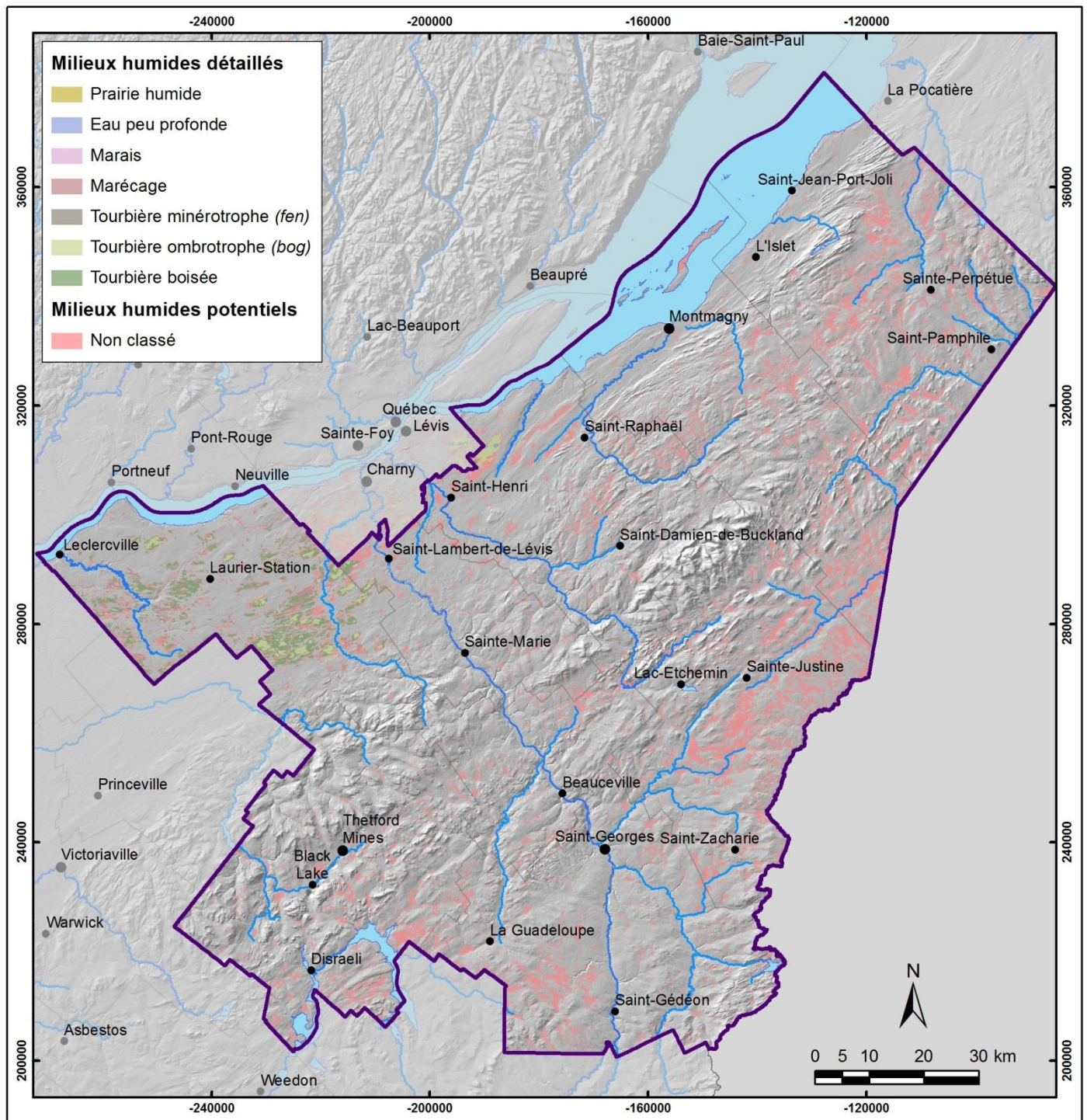


Figure 1.8 : Milieux humides (carte 9)

1.5.2.7 Pédologie

La carte pédologique numérique présentée à la **carte 11** (figure 1.9) a été constituée à partir des études pédologiques de comté publiées dans les différentes régions au fil des années, 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 la **carte 11** est disponible dans les rapports pédologiques indiqués au tableau 1.13 et accessibles sur le site internet de l'IRDA (2008).

Tableau 1.13 : Études pédologiques utilisées pour la cartographie pédologique

Numéro d'étude	Échelle	Comté
4	50 000	Arthabaska
6	50 000	Beauce
8	63 360	Bellechasse-Montmagny
18	126 720	Compton-Richmond-Sherbrooke-Stanstead
19	50 000	Dorchester
21	40 000	Frontenac
33	63 360	Lévis
34	63 360	L'Islet
35	63 360	Lotbinière
39	50 000	Mégantic
43	63 360	Nicolet
44	50 000	Portneuf
58	50 000	Wolfe
60	20 000	Île d'Orléans

Il est important de mentionner que bien que les unités cartographiques identifiées sur les cartes numériques se composent généralement 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, disponibles sur le site internet de l'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. Plusieurs études pédologiques ont également été consultées afin d'en 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 six catégories de texture (sableux, loameux, argileux, graveleux, tills et autres) et sept classes de drainage (très rapidement drainé, rapidement drainé, bien drainé, modérément bien drainé, mal drainé et très mal drainé). La figure 1.9 présente les types de sols et le tableau 1.14 résume les types de sol rencontrés dans la zone d'étude pour cette classification.

Livrable PACES no. 11 : PÉDOLOGIE

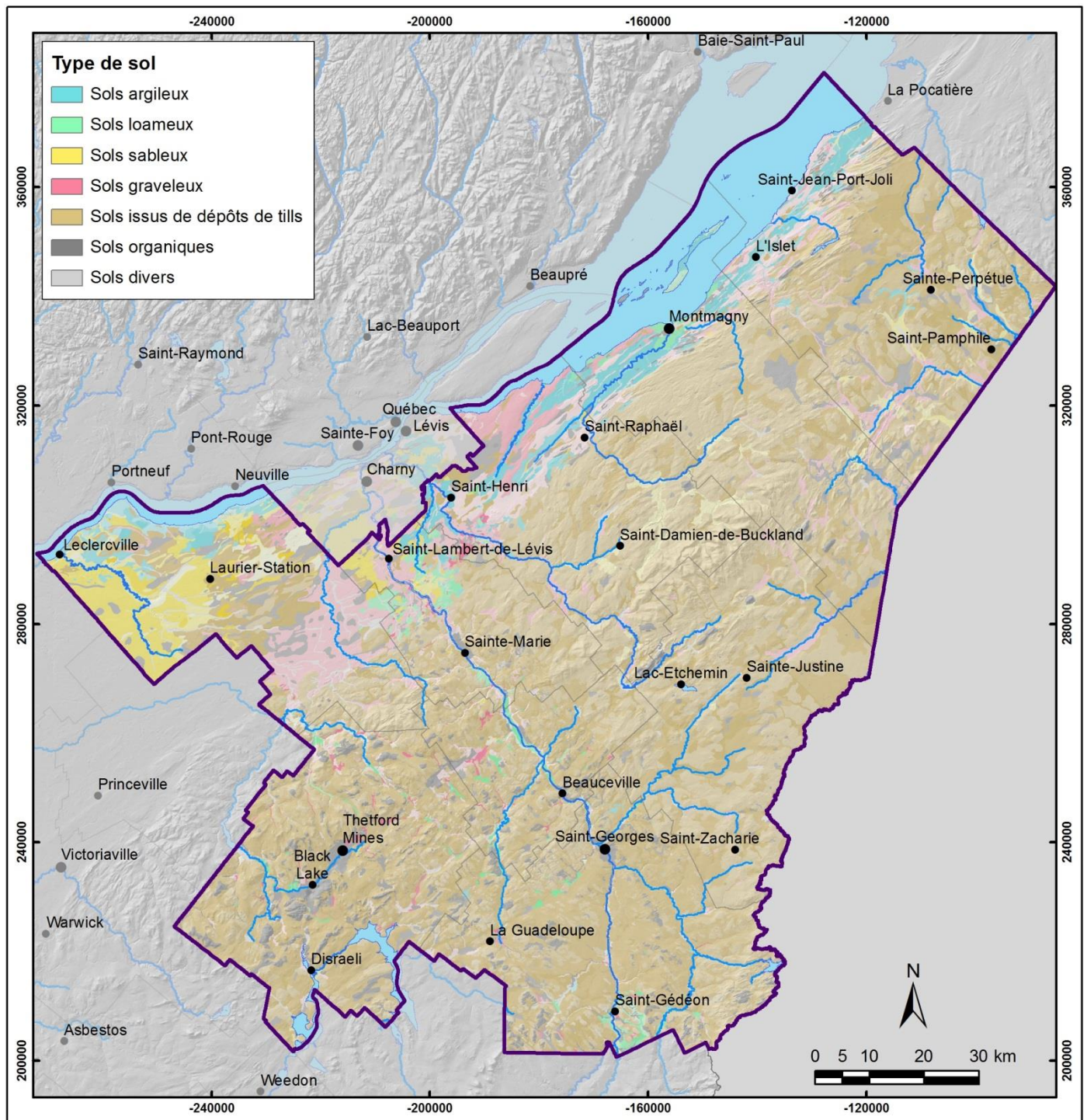


Figure 1.9 : Types de sols (carte 11)

Tableau 1.14 : Types de sol rencontrés dans la zone d'étude

Type de sol	Classe de drainage	Superficie (km ²)	Proportion de la zone d'étude (%)
Sols argileux	Bien drainé	4.8	< 0.1 %
	Modérément bien drainé	48.8	0.3 %
	Imparfaitement drainé	185.8	1.2 %
	Mal drainé	266.6	1.7 %
	Total (argileux)	506	3.2 %
Sols loameux	Bien drainé	13.8	0.1 %
	Modérément bien drainé	80.3	0.5 %
	Imparfaitement drainé	56	0.4 %
	Mal drainé	61.1	0.4 %
	Total (loameux)	211.2	1.4 %
Sols sableux	Très rapidement drainé	92.8	0.6 %
	Rapidement drainé	174.4	1.1 %
	Bien drainé	157.2	1.0 %
	Imparfaitement drainé	300.6	1.9 %
	Mal drainé	39	0.2 %
	Ne s'applique pas	23.9	0.2 %
	Total (sableux)	787.9	5.1 %
Sols graveleux	Très rapidement drainé	425	2.7 %
	Rapidement drainé	662.5	4.2 %
	Bien drainé	180.3	1.2 %
	Modérément bien drainé	3.9	< 0.1 %
	Imparfaitement drainé	8.2	0.1 %
	Mal drainé	53	0.3 %
	Total (graveleux)	1 332.9	8.5 %
Sols issus de dépôts de till	Rapidement drainé	49.4	0.3 %
	Bien drainé	5 098.1	32.7 %
	Modérément bien drainé	680.9	4.4 %
	Imparfaitement drainé	3 705.1	23.7 %
	Mal drainé	924.9	5.9 %
	Total (Sols issus de till)	10 458.4	67 %
Sols organiques	Très mal drainé	533.5	3.4 %
Sols divers	Ne s'applique pas	1 771.3	11.4 %

1.5.3 Population et territoire

La population totale des municipalités incluses dans la zone d'étude est présentée au tableau 1.15. Les chiffres ont été obtenus du décret de population de 2012 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 2012 par l'Institut de la Statistique du Québec (MAMROT, 2013). 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 de superficie totale pour chaque municipalité.

La population totale de la zone d'étude est estimée à 275 991 habitants lorsqu'on considère toutes les MRC faisant partie de la Chaudière-Appalaches, mais excluant Lévis qui ne fait pas partie de la région d'étude. Parmi les municipalités incluses dans la zone d'étude, on dénombre 8 municipalités avec une population supérieure à 5 000 habitants, représentant 6 % des 135 municipalités et 38 % (105 590) de la population totale dans la région d'étude. Ces huit (8) municipalités de plus de 5 000 habitants sont Saint-Henri (5 235), Saint-Apollinaire (5 280), Beauceville (6 363), Saint-Lambert-de-Lauzon (6 454), Montmagny (11 569), Sainte-Marie (13 159), Thetford Mines (25 794) et Saint-Georges (31 736). Pour l'ensemble de la zone d'étude, la densité moyenne de la population des MRC est de 17.7 personnes/km² tandis que les valeurs minimales et maximales de densité à l'échelle des MRC sont respectivement de 7.6 personnes/km² (MRC L'Islet) et de 39.3 personnes/km² (MRC La Nouvelle-Beauce).

Tableau 1.15 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude

MRC	Municipalité	Superficie (km ²)	Population	Densité (pers./km ²)
Beauce-Sartigan	La Guadeloupe	32.7	1 808	55.3
	Lac-Poulin	1.6	138	87.2
	Notre-Dame-des-Pins	25	1 288	51.5
	Saint-Benoît-Labre	86.9	1 655	19
	Saint-Côme - Linière	152.2	3 253	21.4
	Saint-Éphrem-de-Beauce	119	2 569	21.6
	Saint-Évariste-de-Forsyth	112	530	4.7
	Saint-Gédéon-de-Beauce	200	2 272	11.4
	Saint-Georges	202.4	31 736	156.8
	Saint-Hilaire-de-Dorset	189.4	100	0.5
	Saint-Honoré-de-Shenley	133.7	1 613	12.1
	Saint-Martin	119.9	2 482	20.7
	Saint-Philibert	56.6	368	6.5
	Saint-René	61.4	685	11.2
	Saint-Simon-les-Mines	47.3	523	11.1
	Saint-Théophile	436.9	739	1.7
	Total (Beauce-Sartigan)	1 977	51 759	26.2

Tableau 1.15 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude (suite)

MRC	Municipalité	Superficie (km²)	Population	Densité (pers./km²)
Bellechasse	Armagh	170.1	1 476	8.7
	Beaumont	44.7	2 537	56.8
	Honfleur	50.7	782	15.4
	La Durantaye	34.3	762	22.2
	N.-D.-Auxiliatrice-de-Buckland	96.6	787	8.2
	Saint-Anselme	74.9	3 598	48.1
	Saint-Charles-de-Bellechasse	94.7	2 265	23.9
	Saint-Damien-de-Buckland	82.7	2 069	25
	Sainte-Claire	89.1	3 361	37.7
	Saint-Gervais	90	2 112	23.5
	Saint-Henri	124.2	5 235	42.2
	Saint-Lazare-de-Bellechasse	85.7	1 198	14
	Saint-Léon-de-Standon	136.2	1 161	8.5
	Saint-Malachie	103.2	1 528	14.8
	Saint-Michel-de-Bellechasse	44.7	1 847	41.4
	Saint-Nazaire-de-Dorchester	51.6	361	7
	Saint-Nérée	76.3	756	9.9
	Saint-Philémon	148	755	5.1
	Saint-Raphaël	123.3	2 492	20.2
	Saint-Vallier	60.5	1 051	17.4
Total (Bellechasse)		1 807	36 133	20
La Nouvelle-Beauce	Frampton	151.5	1 380	9.1
	Saint-Bernard	90.6	2 158	23.8
	Sainte-Hénédine	51.2	1 229	24
	Saint-Elzéar	87.1	2 163	24.8
	Sainte-Marguerite	83.1	1 098	13.2
	Sainte-Marie	108.9	13 159	120.8
	Saint-Isidore	102.4	2 987	29.2
	Saint-Lambert-de-Lauzon	109.5	6 454	58.9
	Saints-Anges	69.5	1 155	16.6
	Scott	32.1	2 122	66
	Vallée-Jonction	25.9	1 965	75.8
Total (La Nouvelle-Beauce)		912.9	35 870	39.3
Les Appalaches	Adstock	305.8	2 718	8.9
	Beaulac-Garthby	93.9	848	9
	Disraeli	8.2	2 484	303.7
	Disraeli	97.5	1 142	11.7
	East Broughton	8.9	2 242	252.8

Tableau 1.15 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude (suite)

MRC	Municipalité	Superficie (km²)	Population	Densité (pers./km²)
Les Appalaches (suite)	Irlande	112.1	956	8.5
	Kinnear's Mills	93.1	372	4
	Sacré-Coeur-de-Jésus	104.4	562	5.4
	Saint-Adrien-d'Irlande	53	388	7.3
	Sainte-Clotilde-de-Beauce	60.8	656	10.8
	Sainte-Praxède	155	382	2.5
	Saint-Fortunat	76.6	277	3.6
	Saint-Jacques-de-Leeds	83.2	700	8.4
	Saint-Jacques-le-Majeur-de-	61.6	191	3.1
	Saint-Jean-de-Brébeuf	79.5	352	4.4
	Saint-Joseph-de-Coleraine	134.5	1 877	14
	Saint-Julien	82.8	408	4.9
	Saint-Pierre-de-Broughton	148.5	908	6.1
	Thetford Mines	227.7	25 794	113.3
	Total (Les Appalaches)	1 986.9	43 257	21.8
Les Etchemins	Lac-Etchemin	161.6	4 073	25.2
	Saint-Benjamin	112.5	888	7.9
	Saint-Camille-de-Lellis	251.5	856	3.4
	Saint-Cyprien	94.2	553	5.9
	Sainte-Aurélie	79.9	918	11.5
	Sainte-Justine	126.4	1 839	14.5
	Sainte-Rose-de-Watford	115.7	776	6.7
	Sainte-Sabine	68	385	5.7
	Saint-Louis-de-Gonzague	118.5	425	3.6
	Saint-Luc-de-Bellechasse	159.5	493	3.1
	Saint-Magloire	208.7	721	3.5
	Saint-Prosper	134.1	3 630	27.1
	Saint-Zacharie	188.8	1 753	9.3
	Total (Les Etchemins)	1 819.3	17 310	9.5
L'Islet	L'Islet	176.3	4 059	23
	Saint-Adalbert	217.9	528	2.4
	Saint-Aubert	100.9	1 402	13.9
	Saint-Cyrille-de-Lessard	231.4	751	3.2
	Saint-Damase-de-L'Islet	249.6	602	2.4
	Sainte-Félicité	94.1	400	4.3
	Sainte-Louise	77.1	698	9.1
	Sainte-Perpétue	292.4	1 776	6.1
	Saint-Jean-Port-Joli	240.9	3 377	14

Tableau 1.15 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude (suite)

MRC	Municipalité	Superficie (km ²)	Population	Densité (pers./km ²)
L'Islet (suite)	Saint-Marcel	180.1	444	2.5
	Saint-Omer	122.4	302	2.5
	Saint-Pamphile	137.9	2 692	19.5
	Saint-Roch-des-Aulnaies	162.4	975	6
	Tourville	165.1	623	3.8
	Total (L'Islet)	2 448.4	18 629	7.6
Lotbinière	Dosquet	64.5	912	14.1
	Laurier-Station	12	2 654	221.6
	Leclercville	135.5	499	3.7
	Lotbinière	100	875	8.8
	N.-D.-du-Sacré-Coeur-d'Issoudun	60.6	858	14.1
	Saint-Agapit	64	3 782	59
	Saint-Antoine-de-Tilly	59.6	1 641	27.5
	Saint-Apollinaire	97.9	5 280	53.9
	Sainte-Agathe-de-Lotbinière	166.7	1 170	7
	Sainte-Croix	72.4	2 426	33.5
	Saint-Édouard-de-Lotbinière	98.5	1 271	12.9
	Saint-Flavien	65.8	1 614	24.5
	Saint-Gilles	180.8	2 256	12.5
	Saint-Janvier-de-Joly	111.4	989	8.9
	Saint-Narcisse-de-Beaurivage	60.8	1 131	18.6
	Saint-Patrice-de-Beaurivage	85.5	1 077	12.6
	Saint-Sylvestre	148.1	1 045	7.1
	Val-Alain	102.9	959	9.3
	Total (Lotbinière)	1 750.6	30 439	17.4
Montmagny	Berthier-sur-Mer	26.8	1 459	54.5
	Cap-Saint-Ignace	205.8	3 079	15
	Lac-Frontière	51.3	198	3.9
	Montmagny	145	11 569	79.8
	Notre-Dame-du-Rosaire	163.1	388	2.4
	Saint-Antoine-de-l'Isle-aux-Grues	24.1	145	6
	Sainte-Apolline-de-Patton	257.6	603	2.3
	Ste-Euphémie-sur-Rivière-du-Sud	93.2	337	3.6
	Sainte-Lucie-de-Beauregard	81.8	304	3.7
	Saint-Fabien-de-Panet	188.8	998	5.3
	St-François-de-la-Rivière-du-Sud	96.5	1 632	16.9
	Saint-Just-de-Bretonnières	133.1	715	5.4
Saint-Paul-de-Montminy	163.8	808	4.9	

Tableau 1.15 : Population des municipalités et MRC dans la zone d'étude (suite)

MRC	Municipalité	Superficie (km ²)	Population	Densité (pers./km ²)
Montmagny (suite)	Saint-Pierre-de-la-Rivière-du-Sud	91.6	938	10.2
	Total (Montmagny)	2 053.6	23 173	11.3
Robert-Cliche	Beauceville	166.2	6 363	38.3
	Saint-Alfred	43.9	503	11.4
	Saint-Frédéric	72.3	1 082	15
	Saint-Joseph-de-Beauce	116	4 756	41
	Saint-Joseph-des-Érables	52.4	423	8.1
	Saint-Jules	55.7	583	10.5
	Saint-Odilon-de-Cranbourne	130.5	1 466	11.2
	Saint-Séverin	58.7	270	4.6
	Saint-Victor	121.8	2 489	20.4
	Tring-Jonction	27.3	1 486	54.4
	Total (Robert-Cliche)	845	19 421	23
Total (superficie incluant les plans d'eau)		15 601	275 991	17.7

1.5.3.1 Utilisation du territoire

L'utilisation (ou occupation) du territoire présentée à la **carte 7** (annexe 2) a été préparée par l'IRDA à partir de deux principales sources de données. La première est une compilation réalisée à partir d'images Landsat 7 dans le cadre d'un projet commun entre le Service canadien de la faune (SCF), la Société de la faune et des parcs du Québec (FAPAQ), Canards Illimités Canada (CIC), le Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN), le Ministère de l'Agriculture des pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) et Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). À cette compilation a été ajoutée la base de données sur les cultures assurées (BDCA) (FDAQ, 2011). Cette base de données présente l'ensemble des cultures assurées pour l'année 2011 en Chaudière-Appalaches. Puisque seules les superficies assurées sont représentées dans la BDCA, la **carte 7** présente aussi des champs pour lesquels le type de culture n'est pas défini et qui entrent dans la catégorie « agricole non classifiée » de l'occupation du territoire.

Le tableau 1.16 résume les données tirées de cette carte et indique que plus de la moitié du territoire (65%) est en zone forestière et que la zone agricole occupe un peu plus du quart du territoire (26.7%). Dans la zone agricole couvrant près de 4 200 km², les cultures agricoles indifférenciées et les pâturages occupent la majeure partie (respectivement 40 % et 39 %), suivies par le maïs (6.7 %), les céréales (6.6 %) et le soya (6 %). Le reste du territoire, soit environ 1 280 km², est occupé par les zones d'activités anthropiques (1.8 %), les milieux humides (6.3 %) et les activités non différenciées (0.1 %). La superficie occupée par les milieux humides qui est rapportée dans le tableau 1.12 est plus faible que celle indiquée au tableau 1.16 puisque cette dernière inclut en majeure partie des milieux humides potentiels pour lesquels le statut reste à confirmer.

Tableau 1.16 : Utilisation du territoire en Chaudière-Appalaches

Regroupement d'utilisation du territoire	Type d'utilisation du territoire	Superficie (km ²)	Proportion de la zone d'étude (%)	Proportion du regroupement (%)
Zones forestières	Forêt de résineux	2 894.4	18.6 %	28.5 %
	Forêt de feuillus	2 369.7	15.2 %	23.3 %
	Forêt mixte	4 887.3	31.3 %	48.1 %
	Total (zones forestières)	10 151.4	65.1 %	100 %
Zones humides	Milieus humides	5.8	0.04 %	0.6 %
	Eau	986.6	6.3 %	99.4 %
	Total (zones humides)	992.4	6.4 %	100 %
Zones urbaines	Urbain - Densité faible	15.1	0.1 %	5.5 %
	Urbain - Densité élevée	177	1.1 %	64.4 %
	Urbain – Industriel/transport	25.1	0.2 %	9.1 %
	Carrière, grav./sabl. et mine	57.8	0.4 %	21 %
	Total (zones urbaines)	275.1	1.8 %	100 %
Zones agricoles	Friche	756.6	4.9 %	4.9 %
	Agricole / herbacé	1 357.6	8.7 %	39.9 %
	Maïs	226.4	1.5 %	6.7 %
	Maraîcher	2.8	0.02 %	0.08 %
	Pâturage	1 333.3	8.6 %	39.2 %
	Soya	205.4	1.3 %	6 %
	Céréales	225.3	1.4 %	6.6 %
	Cultures annuelles	47.9	0.3 %	1.4 %
	Vergers et fruits	2.5	0.02 %	0.1 %
	Canneberge	1.1	0.01 %	0.03 %
Total (zones agricoles)	4 158.9	26.7 %	100 %	
Autres	Autre	12.5	0.1 %	100 %
	Total (autres)	12.5	0.1 %	100 %

1.5.3.2 Affectation du territoire

Les grandes affectations du territoire présentées à la **carte 10** (annexe 2) 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 à la **carte 7**). La grande majorité du territoire de la Chaudière-Appalaches est à vocation agricole (36.7 %), forestière (31.4 %) et agroforestière (19.9 %). Les principales zones urbaines sont situées dans la vallée de la rivière Chaudière et la vallée de la rivière Etchemin ainsi qu'autour de la municipalité de Thetford Mines et le long de l'autoroute 20 (ex. : Saint-Appolinaire, Montmagny, ..). Plusieurs zones d'affectation récréative sont également réparties sur le territoire à l'étude, notamment dans le secteur du Massif du Sud et du Lac Saint-François. Finalement, les zones d'affectation industrielle couvrent une superficie relativement faible (< 1 %) et sont surtout concentrées dans les centres urbains, avec une majorité localisées à proximité de Thetford Mines.

2 ACQUISITION DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION

2.1 Compilation de l'information existante

La compilation des informations existantes est une étape importante puisqu'elle constitue la base des connaissances hydrogéologiques et géologiques du territoire étudié dans le cadre d'une étude régionale. Cette activité a débuté en mai 2012 et s'est poursuivie jusqu'à la fin de 2014. Elle consistait principalement en l'acquisition de bases de données existantes et de séries de données, ainsi que la saisie de données à partir de documents existants collectés. L'acquisition de données géomatiques existantes a également été faite et les résultats ont été décrits au chapitre 1. Les données recueillies incluent, entre autres, des valeurs de profondeur de la nappe dans les puits, des données de stratigraphie, des valeurs de profondeur du roc, des données de géochimie de l'eau souterraine et des valeurs de conductivité hydraulique (K) et de transmissivité (T). Dans certains cas, les travaux de compilation et traitement ont impliqué le reformatage de données, la numérisation de documents et de données ainsi que d'autres opérations nécessaires à l'assemblage des jeux de données requis pour la préparation des livrables du projet.

Au-delà des travaux prévus par les projets PACES, les différentes cartes disponibles de sédiments de surface ont fait l'objet d'une compilation puisque, parallèlement à cette étude hydrogéologique, la cartographie des formations quaternaires à l'échelle 1/50 000 a été réalisée par l'UQAM pour Géologie Québec en 2013-2014. L'UQAM a refait la cartographie de la moitié sud de Chaudière-Appalaches, mais, contrairement à ce qui était prévu initialement, l'UQAM n'a pas reçu le support requis pour compléter l'ensemble de la cartographie de la Chaudière-Appalaches en 2014-2015. Ceci a fait en sorte que l'équipe du projet ont dû compléter la cartographie pour les parties de la région non couvertes par l'UQAM.

Les sous-sections suivantes fournissent davantage de détail sur certaines des activités et travaux liés à l'acquisition et à la compilation des données existantes.

2.1.1 Acquisition de bases de données existantes

Le MDDELCC a fourni ou facilité l'acquisition des bases de données suivantes pour la zone à l'étude :

- Système d'information hydrogéologique (SIH), appartenant au MDDELCC
- Base de données géotechniques du Ministère des Transports (MTQ) du Québec (incluant les bases de données FORLOG, BDG et GEOTECH)
- Système d'informations géominières du Québec (SIGEOM) du Ministère des Ressources naturelles (MRN) du Québec
- Base de données géochimiques du Québec (BADGEQ) du Ministère des Ressources naturelles (MRN) du Québec
- Base de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA) du MDDELCC

Les données du SIH et les données du MTQ ont été intégrées en totalité à la base de données terrain du projet. Ces dernières ont été utilisées pour la réalisation des livrables après leur vérification et validation (voir section 2.3). Les données géochimiques du BADGEQ n'ont pas été utilisées car elles ne couvraient qu'une petite partie du territoire et, pour la plupart, étaient redondantes avec les données géochimiques du SIH. De plus, ces données géochimiques étaient relativement incomplètes par rapport au programme analytique du PACES. Le tableau 2.1 présente l'ensemble des données obtenues des différentes bases de données provinciales. À noter que les totaux présentés incluent aussi les données à l'extérieur de la zone d'étude et qui ont été fournies par les projets PACES de la CMQ et de Bécancour (voir section 2.3). Les données les plus nombreuses proviennent du SIH, suivi des sondages géotechniques. 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 de l'ensemble des données acquises via les bases de données provinciales

Base de données	Source	Nombre
Système d'information hydrogéologique (prof. totale du puits, niveau d'eau, stratigraphie, prof. du roc, géochimie)	MDDELCC	30 189 puits ou forages
Base de données géotechniques (profondeur du forage, stratigraphie)	MTQ	1 271 forages
Système d'informations géominières (profondeur du forage, stratigraphie)	MRN-SIGEOM	2 641 forages
Données de forages géothermiques (profondeur du forage, profondeur au roc)	CCEG	148 forages
BQMA (stations, conductivité électrique, chlorures, fer, nitrates, solides en suspension, phosphore total et température)	MDDELCC	52 stations
Base de données sur les débits de rivière (stations ouvertes de jaugeage et de débits quotidiens)	CEHQ	227 stations

En plus de ces données provenant de base de données, d'autres données existantes ont été acquises et compilées dans la phase 2 du projet, notamment les données suivantes :

- Données d'utilisation d'eau souterraine (INRS/OBV-CA)
- Données LiDAR pour la mise à jour de la cartographie des formations superficielles (INRS/CGC)
- Affleurements rocheux provenant de différentes compilations et cartes (INRS)
- Données liées à la géologie du roc
- Données de forages géothermiques de la Coalition canadienne de l'énergie géothermique (CCEG)
- Données météorologiques et hydrométriques (IRDA/INRS)
- Données pédologiques (IRDA)
- Données d'analyses géochimiques de l'eau souterraine des projets antérieurs et en cours (CGC)
- Données extraites de documents collectés, dont des rapports de consultants

2.1.2 Acquisition de données géomatiques existantes

Parallèlement à l'acquisition de bases de données existantes, des données géomatiques ont été acquises afin de produire des cartes thématiques. Ces données ont été obtenues essentiellement via le MDDELCC. Ces données ont été complétées par celles obtenues auprès des partenaires du projet, notamment l'IRDA, le COBARIC, la Conférence régionale des Élus (CRÉ) et les MRC de la Chaudière-Appalaches.

2.1.3 Acquisition de séries de données existantes

Le projet a également bénéficié de séries de données climatiques et de niveaux d'eau dans les puits fournies par le MDDELCC et de données hydrologiques et géochimiques fournies par le CEHQ et l'IRDA. Le CEHQ a fourni des données de débits de rivière et de débits de base estimés à l'aide de la méthode de séparation d'hydrogramme d'Eckhardt et Arnold (2001) (section 1.6.2). Le travail sur l'évaluation des débits de base avec la méthode de séparation d'hydrogramme d'Eckhardt est documenté dans un rapport du CEHQ (Poirier et al., 2012). Le CEHQ a aussi fourni des données d'apports verticaux, qui 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.

Les données météorologiques de 28 des 71 stations présentes dans la zone d'étude ont été obtenues du MDDELCC, soient les stations actives avec plus de 30 ans de données. Ces données incluent les valeurs

quotidiennes de température et de précipitation (neige et pluie) ainsi que des normales mensuelles de 1980 à 2010 pour les mêmes variables en plus de l'évapotranspiration. Ces stations couvrent relativement bien le territoire (section 1.6.2).

Par ailleurs, il existait vingt-deux (22) puits de surveillance provinciaux du niveau d'eau dans la région ou à proximité avant le début de cette étude. La période du suivi de ces puits est très variable. Les données ont été téléchargées via le site internet du MDDELCC (www.mddep.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm).

2.1.4 Acquisition de données à partir des documents existants

Plusieurs documents existants ont été obtenus auprès des partenaires du projet, notamment l'IRDA, les OBV, la Conférence régionale des Élus (CRÉ), les MRC de la Chaudière-Appalaches. Ces documents ont été consultés et les données pertinentes extraites afin d'aider à produire des cartes thématiques et les livrables du projet. Les informations extraites de documents de référence tels que la pédologie, des descriptions stratigraphiques de forages, des caractéristiques de puits et des résultats géochimiques ont été intégrées dans la base de données.

2.1.4.1 Élaboration de la librairie de documents

Les documents et ouvrages de référence obtenus ont été recueillis principalement sous forme de cartes et de rapports et d'études hydrogéologiques et géotechniques provenant de consultants ou d'organismes gouvernementaux. De plus, ont également été recueillis des études existantes, des articles scientifiques et des thèses (16 références), quelques références sur le web (3) ainsi que différentes cartes et figures thématiques (266 références), provenant pour la plupart des municipalités. Les rapports et différents documents ont été compilés jusqu'à la fin 2014.

La collecte de documents a débuté aux archives du MDDEFP en mai 2012. Nous avons récupéré 119 rapports provenant des archives du MDDEFP. Ces références ont tout de même été intégrées dans la librairie puisqu'elles constituent des sources d'informations potentielles pouvant être retrouvées ultérieurement. Les travaux de collecte ont été poursuivis par l'OBV-CA qui a fait parvenir une demande écrite aux municipalités et MRC du territoire étudié (ou adjacent au territoire étudié) afin d'obtenir une plus grande variété d'information. De plus, les partenaires du projet, tels que l'UPA, l'IRDA, le MAPAQ, la Commission géologique du Canada ainsi que d'autres organismes de bassins versants, ont également contribué de l'information qui a été ajoutée à la librairie. Chacun des ouvrages de référence est numérisé, identifié par un numéro d'enregistrement et compilé dans une librairie ou bibliothèque virtuelle créée à l'aide du logiciel « EndNote » et ce, conformément au « Protocole de numérisation et d'archivage ». Ce protocole a été élaboré par le Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES) formé des universités responsables des projets d'acquisition de connaissances (UQAM, UQAC, UQAT, UQTR, UQAR, INRS, polytechnique de Montréal, et Université Laval) (annexe 3).

2.1.4.2 Extraction des informations

Les documents de la librairie sont lus afin d'en extraire les informations pertinentes liées aux forages, aux puits, à la stratigraphie, aux essais de pompage, ainsi qu'aux analyses géochimiques. Ces informations sont compilées de façon détaillée directement dans un questionnaire en ligne, pour être intégrées directement dans la base de données, ou à partir d'un fichier format « Microsoft Excel » en vue d'être par la suite transférées dans la base de données. Chacun des puits ou forages (désignés en tant qu'« objet ») a été référencé à l'aide d'un identifiant unique sous la forme « CA0000 » tel que stipulé dans le « Protocole de numérisation et d'archivage ».

Les documents pertinents ont été identifiés avec l'aide des municipalités, des MRC et de la Direction régionale de la Chaudière-Appalaches du MDDELCC. Le travail d'acquisition, de compilation et d'intégration des données extraites de documents collectés s'est poursuivi du début du projet jusqu'à la fin

de 2014 avec l'aide des OBV-CA qui coordonnent la recherche d'information auprès des partenaires du projet et 135 municipalités de la zone d'étude. Plus de 370 documents, principalement des rapports hydrogéologiques, ont été recueillis, numérisés et traités pour en extraire les données pertinentes au projet. Pour chaque rapport, une autorisation d'utilisation a été obtenue auprès du propriétaire des données. Les données extraites de ces documents sont jugées fiables et elles permettent de valider les données provenant d'autres sources qui sont généralement jugées moins fiables. Le tableau 2.2 présente le bilan des données extraites des documents et le nombre d'objets relatifs aux différentes données (ex. : données stratigraphiques, essais de pompage, résultats analytiques d'échantillons d'eau souterraine). Au total, 526 forages et puits ont été extraits des documents collectés dont certains correspondent à des ouvrages de captage municipaux. Au total, l'information provenant de 1 269 objets a été compilée à l'aide des différents documents pour l'ensemble du territoire étudié ainsi que sur les territoires limitrophes. Les documents collectés auprès des municipalités ont également permis de numériser et de compiler 155 aires d'alimentation des puits municipaux pour lesquelles des informations sont disponibles.

Tableau 2.2 : Résumé des données extraites des documents existants ou de projets antérieurs

Type de données	Nombre
Forages et puits avec données extraites	779
Aires d'alimentation des puits municipaux	155
Données stratigraphiques	490
Niveaux d'eau dans les puits	265
Essais de pompage	203
Échantillons d'eau souterraine (incluant 84 paramètres analytiques différents)	304

2.1.5 Faits saillants de la collecte

La collecte de données de différentes sources a permis de constater plusieurs problèmes, qui sont résumés dans les paragraphes suivants.

Couverture des MRC

Pour chaque MRC de la région, le tableau 2.3 fait la synthèse de la répartition des documents collectés par municipalité et indique le nombre de réseaux municipaux approvisionnés par de l'eau souterraine (ou une source mixte) ainsi que le nombre de puits d'approvisionnement des municipalités. Considérant les municipalités approvisionnées par de l'eau souterraine, les rapports obtenus permettent de bien représenter les conditions hydrogéologiques des puits d'approvisionnement municipaux de la région.

Tableau 2.3 : Statistiques sur les rapports obtenus des MRC

MRC	Nombre de municipalités	Municipalités avec réseau mixte ou eau souterraine	Puits municipaux	Rapports obtenus ¹	Municipalités avec rapports
Appalaches	19	10	52	33	7
Beauce-Sartigan	16	11	38	31	10
Bellechasse	20	16	44	71	17
Etchemins	13	9	28	25	11
L'Islet	14	5	15	12	6
Lotbinière	18	13	40	45	15
Montmagny	14	8	25	22	8
Nouvelle-Beauce	11	10	30	36	10
Robert-Cliche	10	6	26	25	8
Total :	135	88	298	300	92

1: au total, 378 rapports ont été obtenus; 78 rapports non compilés dans ce tableau sont des rapports régionaux (pas associés à une municipalité spécifique) ou des rapports portant sur un secteur en dehors de la région d'étude.

Doublons

Parmi les puits et forages compilés, certains éléments apparaissent deux fois ou plus dans la base de données. Dans une première étape, tous les puits ont systématiquement été compilés, sans égard à leur présence ou non dans la base de données du SIH (Système d'Information hydrogéologique) du MDDELCC. L'identification de doublons est difficile à faire à cause de l'imprécision des coordonnées géographiques, surtout pour les puits datant de plus de 10 ans (avant l'utilisation courante du GPS), mais aussi à cause des descriptions stratigraphiques parfois imprécises. De plus, certains puits peuvent avoir fait l'objet d'essais de pompage ou d'échantillonnage à plusieurs reprises et dans le cadre de plus d'une étude, ce qui fait qu'ils apparaissent plus d'une fois dans les bases de données ou documents existants. Pour les mêmes raisons, il est possible qu'un même puits apparaisse sous deux identifiants différents. L'exercice de repérage des doublons a été réalisé à la toute fin des travaux de compilation de façon à intégrer l'ensemble des données disponibles.

Localisation spatiale des éléments d'intérêt

La plus grande difficulté rencontrée lors de la compilation des puits et forages était principalement liée à la localisation géographique des éléments. En effet, plusieurs rapports datant de plus d'une dizaine d'années ne comprenaient pas de plans de localisation ou présentaient des plans manuscrits imprécis. Dans ce cas, la localisation des éléments d'intérêt devait être déduite ou estimée. Par exemple, une carte sans aucune coordonnée peut être géo-référencée à l'aide d'un logiciel de cartographie, ou encore la localisation géographique d'éléments sur une carte manuscrite peut être déduite à l'aide de repères visuels communs à une carte topographique à l'échelle 1/50 000 ou 1/20 000. Ces démarches peuvent toutefois entraîner de plus grandes incertitudes sur la localisation des éléments d'intérêt. Afin de distinguer les données précises des données estimées, une cote de fiabilité a été attribuée à chacune des données.

Signification de la géochimie de l'eau souterraine

L'extraction des informations relatives à la géochimie a permis de constater que très peu de certificats d'analyses mentionnent si l'échantillon a préalablement été filtré ou non. Ainsi, il devient impossible de distinguer les résultats « totaux » des résultats « dissous ». 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. Notons qu'il a été précisé dans la base de données lors de l'extraction des données, si l'échantillon a été filtré, s'il n'a pas été filtré ou si le rapport n'en fait simplement pas mention. Toutefois, pour l'interprétation géochimique (section 4.6), nous avons utilisé uniquement des données provenant de nos travaux ou d'études antérieures ou en cours dont les protocoles d'échantillonnage et d'analyse avaient été documentés.

Exactitude des descriptions lithologiques

Les descriptions lithologiques issues des rapports sont souvent imprécises ou improbables et disponibles uniquement à partir des journaux de forage (*logs*) présentés en annexe des rapports. Lors de l'extraction de ces informations, les descriptions originales ont été rapportées textuellement. Cependant, un ajustement ou une interprétation peut avoir été faite lors de l'attribution des codes des faciès, issus d'une librairie géologique développée par la CGC.

2.2 Travaux de caractérisation

La caractérisation hydrogéologique conventionnelle est basée surtout 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 (Blouin et al., 2013; Bélanger et al. 2010). Bien que les forages soient nécessaires car ils représentent 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 d'aquifères régionaux à des coûts réalistes.

Ce projet a exploité une approche de caractérisation hydrogéologique novatrice qui implique 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, pour fournir des mesures plus détaillées et continues latéralement et verticalement, pour le vaste territoire étudié. De telles données détaillées permettent de mieux caractériser la stratigraphie sur le territoire étudié. Des forages conventionnels réalisés dans le cadre de ce projet ont tout de même 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 à long terme l'évolution de la qualité et de la quantité d'eau souterraine.

Les travaux de caractérisation sur le terrain se sont principalement déroulés des mois de mai à novembre 2013 et ont permis de couvrir l'ensemble du territoire d'étude. Toutes les données issues de ces travaux ont été intégrées à la base de données terrain et leur interprétation s'est faite principalement au cours de la dernière année du projet. Voici un sommaire des activités réalisées :

- Sondages au piézocône (11) et sondage par rotopercussion (24) avec la foreuse de l'INRS pour définir la séquence de sédiments et valider l'interprétation des levés géophysiques; certains puits d'observation peu profonds ont également été installés dans les dépôts meubles par enfoncement lors de ces travaux;
- Neuf (9) forages conventionnels, mais aménagement de 8 puits d'observation au roc qui ont été légués au MDDEFP de façon à accroître le Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec et ainsi suivre l'évolution du niveau de l'eau souterraine à long terme dans la région d'étude (1 puits foré était coulant et n'a pas été repris par le MDDELCC ; il a été gardé par le propriétaire du site);

- Mise en place de capteurs de pression dans les puits d'observation pour suivre les fluctuations du niveau d'eau souterraine;
- Essais de perméabilité dans les puits accessibles;
- Échantillonnage de l'eau souterraine dans les puits aménagés dans le cadre du projet et dans plusieurs puits résidentiels répartis sur le territoire à l'étude (165 échantillons incluant 32 duplicatas); ces échantillons ont été analysés pour définir la composition chimique de l'eau souterraine, mais aussi, pour certains échantillons, les compositions isotopiques (^{14}C , tritium, ^2H , ^{18}O) ainsi que la concentration en méthane dissous et sa signature isotopique;
- Réalisation d'environ 4 km de levés géophysiques de sismique réflexion.

L'ensemble de ces travaux est décrit plus en détail ci-dessous. Chaque sous-section couvre l'objectif des travaux, la méthodologie employée et fait une synthèse des travaux réalisés avec, dans certains cas, un exemple de résultats. Des travaux non prévus de cartographie des formations superficielles ont aussi dû être réalisés dans le cadre de ce projet et ces travaux sont décrits avant les travaux de terrain.

2.2.1 Cartographie des formations superficielles

Contexte et objectif

La nature des formations superficielles constituées de dépôts meubles exerce un contrôle majeur sur les conditions hydrogéologiques à l'échelle régionale. De plus, les cartes des formations superficielles permettent de vérifier ou de contraindre plusieurs des livrables cartographiques du PACES. Il est donc essentiel de bénéficier d'une cartographie de qualité pour réaliser un projet PACES. Toutefois, il a été constaté que la couverture cartographique des formations superficielles en Chaudière-Appalaches était de qualité très variable (Ballard et al., 2013), ce qui nécessitait de mettre à jour l'ensemble des cartes de la région. L'objectif des travaux de cartographie des formations superficielles était donc de produire une cartographie uniforme et de qualité couvrant l'ensemble de la Chaudière-Appalaches. L'UQAM, en collaboration avec le MRN, a été mandatée par le MDDELCC pour mettre à jour la cartographie de la zone d'étude du projet sur des feuillets à l'échelle 1/50 000. Deux phases de cartographie étaient prévues pour couvrir toute la région; la première phase de cartographie a été réalisée en 2013-2014 et la deuxième phase devait être réalisée en 2014-2015. Toutefois, la réalisation de cette deuxième phase de cartographie quaternaire n'a pas été réalisée, faute de financement. Il était donc nécessaire de trouver d'autres options pour la réalisation de la cartographie des formations superficielles. Ainsi, l'approche retenue a été de réaliser une cartographie détaillée de toute la bande nord de la région située sous la limite marine où des levés LiDAR étaient disponibles. Une cartographie de grande qualité dans cette zone est essentielle car on y retrouve des accumulations importantes et complexes de dépôts meubles. Des corrections semi-automatiques à l'aide de SIG ont été faites aux cartes existantes pour le reste de la région se trouvant au-dessus de la limite marine mais pas recartographiée par l'UQAM. Ces secteurs se trouvent dans les Appalaches et ont une couverture quaternaire relativement simple. Les sections suivantes expliquent les approches utilisées pour ces trois types de mise-à-jour de la carte des formations superficielles.

Méthodologies

Daigneault et al. (2014) décrivent les travaux réalisés par l'UQAM lors de la première phase de cartographie réalisée en 2013-2014 et couvrant les feuillets SNRC suivants : 21E16, 21E15, 21E14, 21L01, 21L02, 21L03, 21L08, 21L07, 21L06, 21L05, 21L11 et 21L12 (figure 2.1). La seconde phase, qui n'a pas été réalisée, devait couvrir les feuillets SNRC restants : 21L09, 21L10, 21L15, 21L16, 21M01, 21M08, 21N04, 21N05, 21K12 et 21K13. Le principal objectif de ces travaux était la production des 12 cartes de la géologie du Quaternaire présentant la distribution spatiale des grands ensembles de sédiments meubles de surface à l'aide d'une légende récente qui a été utilisée dans des travaux similaires ailleurs au Québec. Daigneault et al. (2014) mentionnent que les cartes ont été réalisées à l'aide d'une

méthodologie impliquant la photo-interprétation traditionnelle et numérique appuyée par des vérifications sur le terrain.

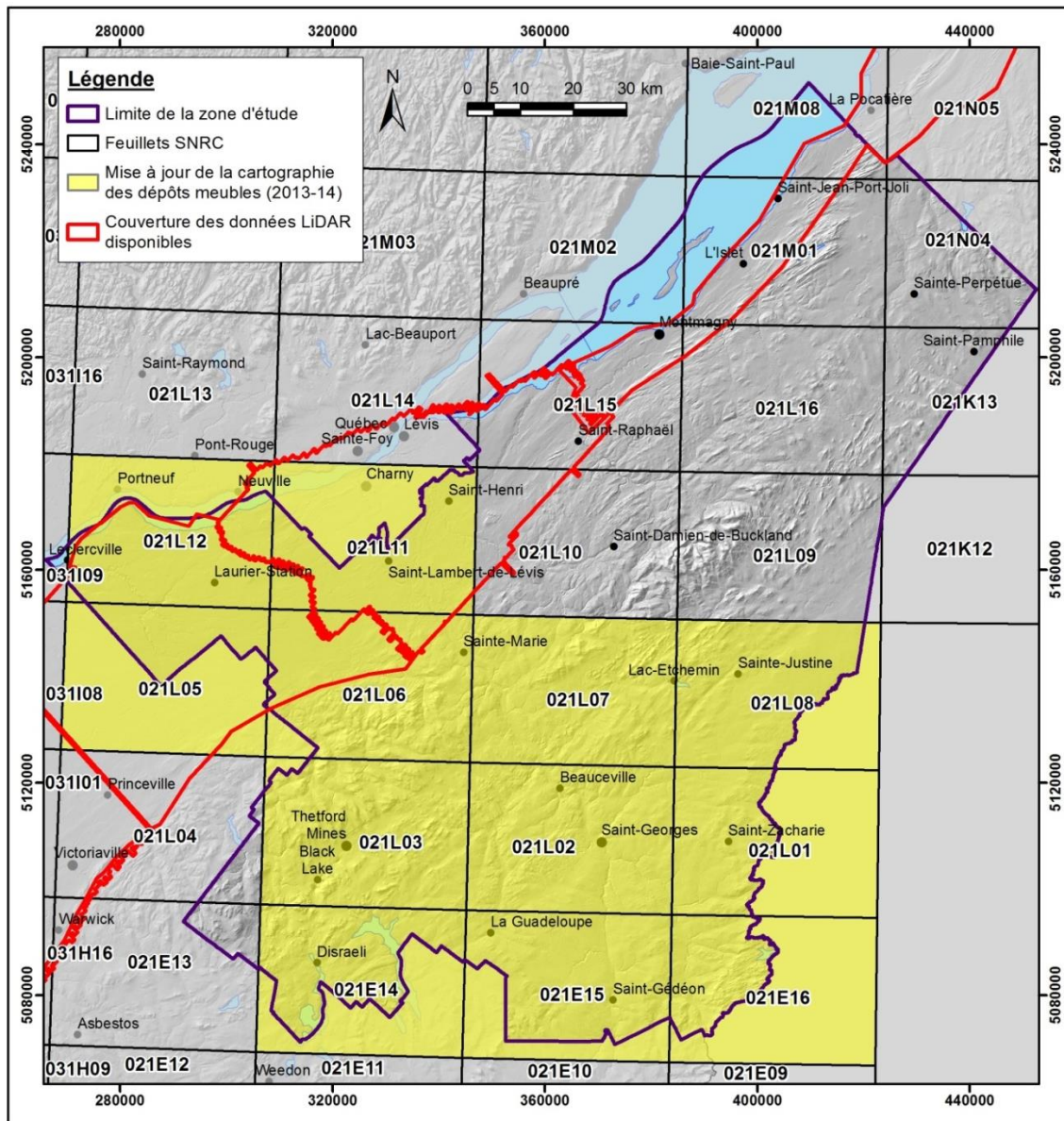


Figure 2.1 : Feuilletes SNRC avec une cartographie de la géologie du Quaternaire en 2013-2014

Afin de compléter la couverture des affleurements rocheux disponibles en début de projet, plus de 45 000 affleurements ponctuels ont été compilés et numérisés à partir de cartes géologiques existantes (voir figure 2.2). Ces affleurements ont été ajoutés à ceux disponibles pour obtenir une couverture presque complète de la zone d'étude avec plus de 101 500 affleurements ponctuels. Ces affleurements serviront notamment pour la révision de la cartographie de la géologie du Quaternaire ainsi que pour la production de certaines cartes, particulièrement celle représentant l'épaisseur des dépôts meubles.

En complément aux travaux réalisés par l'UQAM, un important travail de cartographie de la géologie du Quaternaire a été réalisé par un étudiant au doctorat en géologie sous la supervision d'un chercheur de la Commission géologique du Canada. Ce travail a couvert toute la bordure sud du Fleuve Saint-Laurent

permis d'ajuster l'étendue des zones d'affleurement sur les anciennes cartes pour les rendre plus cohérentes avec celles des nouvelles cartes. De plus, des corrections ont été faites aux polygones des unités présentes aux limites entre les secteurs cartographiés de différentes sources (UQAM, INRS/CGC, anciennes cartes) de manière à limiter les incohérences aux bordures de cartes. Enfin, pour les fins du projet PACES, une simplification des polygones des cartes produites à l'aide du LiDAR a été faite pour avoir un niveau de détail approprié pour les besoins de la cartographie régionale hydrogéologique. La carte produite suite à ces travaux est documentée par [Parent et al. \(2015\)](#).

2.2.2 Sondages au piézocône (CPT)

Objectif

Les sondages au piézocône ou sondages CPT (*Cone Penetration Test*) et les sondages par rotopercussion ou sondages RPSS (*RotoPercussion Sounding System*) ont pour objectif d'obtenir des informations qui vont servir de points de contrôle pour la stratigraphie des dépôts meubles et confirmer, si possible, la profondeur au roc. L'utilisation des résultats des sondages permet de valider l'interprétation des données existantes (ex. forages du Système d'information hydrogéologique - SIH) ou celles acquises durant le projet (ex. : levés géophysique ou autres types de forage). Les sondages sont prioritairement localisés dans les secteurs où un manque d'information est observé ou pour lesquels des besoins spécifiques de caractérisation ont été identifiés. Lorsque pertinent, les sondages ont été aménagés en puits d'observation afin de pouvoir échantillonner l'eau souterraine et réaliser des essais hydrauliques.

Méthodologie

Les sondages ont été effectués à l'aide de la foreuse géotechnique multifonctionnelle de l'INRS (Geotech 605D) (figure 2.3). Cette foreuse est équipée de deux têtes de forage qui permettent soit l'enfoncement pour l'utilisation du CPT, soit la rotation et percussion pour le RPSS. La foreuse est équipée d'un système d'acquisition de données qui enregistre en temps réel les différents paramètres de forage permettant une interprétation préliminaire des profils stratigraphiques lors des travaux. La méthode par CPT permet l'enfoncement d'une sonde dans des contextes de sols meubles relativement fins, dont la texture varie généralement de l'argile au sable. Ce système mesure les paramètres physiques des sols (i.e. friction, résistance en pointe, pression d'eau, résistivité, teneur en eau). L'interprétation des paramètres permet de classer les sols sur la base de chartes existantes ([Lunne et al., 1997](#); [Fellenius et Eslami, 2000](#)). La profondeur d'investigation maximale est d'environ 50 m selon les conditions de terrain.



Figure 2.3 : Travaux de forages avec la foreuse Geotech 605D de l'INRS

La méthode RPSS utilise un taillant au carbure (*button bit*) et un marteau hydraulique, le tout fonctionnant avec de l'air comprimé pour éjecter les déblais de forage. Le système RPSS procure aussi un profil en continu des différents paramètres de forage durant l'enfoncement (i.e. 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.). Le système peut aussi être utilisé pour faire des installations de puits d'observation par enfoncement du tubage (i.e. tubage en acier de 2.25 po et 3.25 po) ou par percussion jusqu'à une profondeur maximale d'environ 30 m. Les paramètres mesurés en RPSS permettent de déterminer l'énergie requise en fonction de la vitesse de pénétration et d'identifier grossièrement les types de formations géologiques rencontrées et la profondeur des interfaces entre chaque type de matériaux, notamment la profondeur au roc. Ce mode de sondage permet la caractérisation des sols plus grossiers (ex. sols avec cailloux et blocs) et des massifs rocheux. Les équipements de la foreuse permettent aussi d'échantillonner les sols afin d'aider à l'interprétation des données provenant du système d'acquisition.

Description des travaux

Pour la campagne de terrain de l'été 2013, la localisation des sondages sur le territoire d'étude s'est faite de façon à bien représenter les différents contextes hydrostratigraphiques en utilisant les informations existantes (i.e. base de données existantes de forages telles SIH et MTQ, cartes géologiques du roc et des formations superficielles). Chaque emplacement a dû être localisé et confirmé sur le terrain en fonction des contraintes des lieux et en accord avec les propriétaires. En tout, 35 sites de sondages ont été visités (figure 2.4) sur lesquels 11 CPT et 24 RPSS ont été réalisés avec des profondeurs variant entre 3.5 et 65 m, pour un total de plus 430 m. De plus, 19 puits d'observation de petit diamètre (1 po ou 2.5 cm) ont été installés pour l'échantillonnage de l'eau souterraine et la réalisation d'essais hydrauliques.

Les journaux de forage sont présentés à l'annexe 4. Les journaux sont réalisés à l'aide du logiciel Strater® et de fonctions développées spécifiquement pour le projet dans Excel. Les résultats provenant des différents travaux de sondage ont servi à l'interprétation des données existantes ou encore au calage de données provenant des autres méthodes d'investigation, en particulier pour les levés géophysiques.

2.2.3 Forages conventionnels

Objectif

Le but des forages conventionnels au roc était d'installer des puits d'observation pour faire le suivi à long terme des variations du niveau de la nappe ainsi que de la qualité de l'eau souterraine. Outre la confirmation de la profondeur au roc, l'installation des puits ouverts dans l'aquifère de roc permet également d'effectuer des essais hydrauliques (ex. : essais de perméabilité). Lors de la réalisation des forages, la description des unités géologiques est effectuée à l'aide de l'échantillonnage des déblais de forage.

Méthodologie

La localisation des puits a été faite en se basant sur les informations existantes, principalement les forages et puits (ex. SIH, MTQ, etc.), mais aussi à partir de cartes géologiques, de levés géophysiques et des données géochimiques. Prioritairement, les puits d'observation ont été localisés en tenant compte des puits déjà existants du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec. Comme pour les sondages CPT et RPSS, chaque emplacement a dû être localisé et confirmé sur le terrain en fonction des contraintes des lieux et en accord avec les propriétaires.

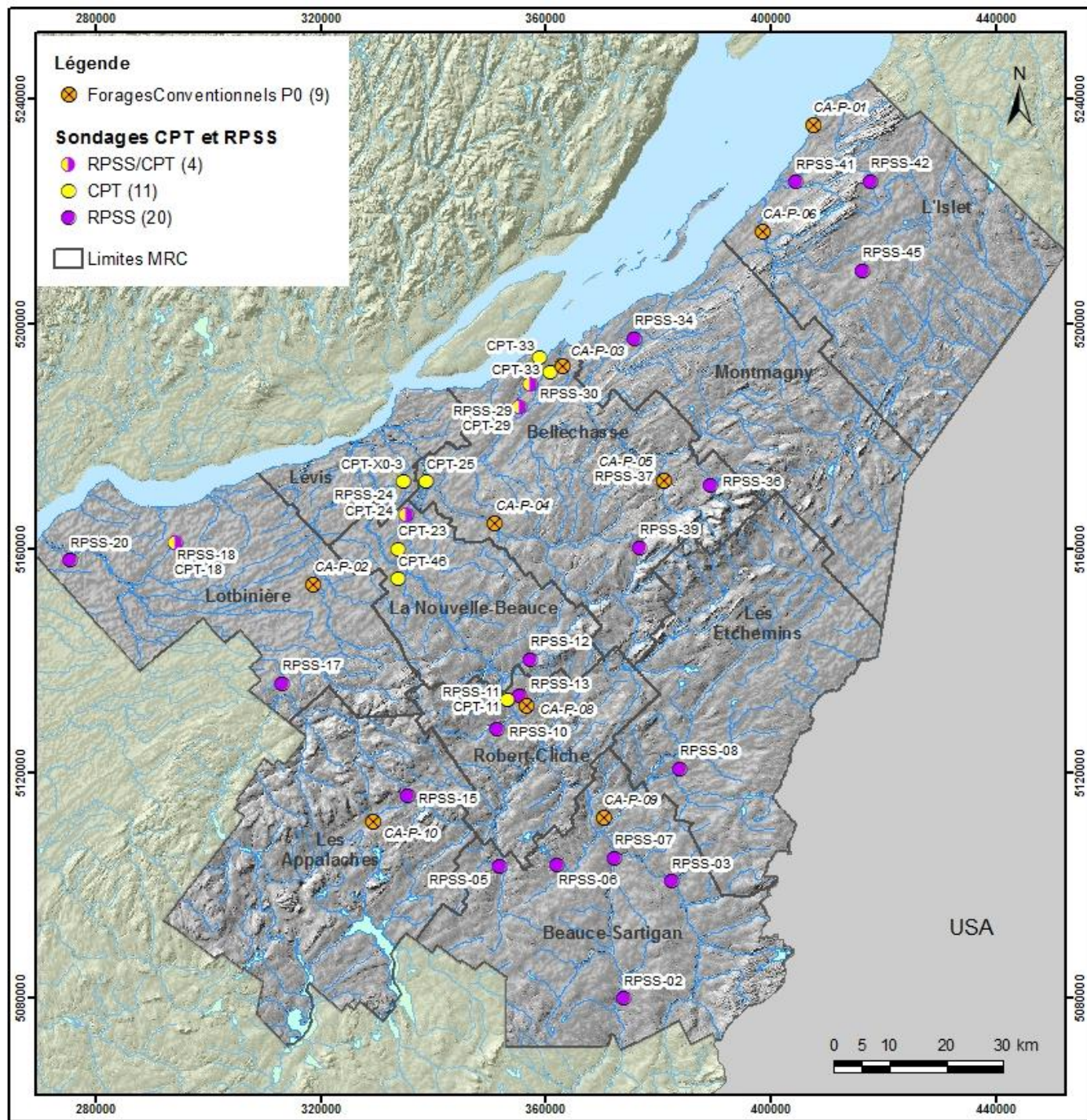


Figure 2.4 : Emplacement des sondages CPT et RPSS ainsi que des forages conventionnels

Description des travaux

Les travaux de forages se sont déroulés du 11 au 20 septembre 2013. Au total, 288 m ont été forés à 9 sites, dont environ 170 m dans le roc. Tous les forages ont été aménagés en puits (figure 2.4). Ces derniers ont un diamètre de 150 mm (6 po) et sont forés à une profondeur minimale de 15 m dans le roc afin d'en évaluer les caractéristiques hydrauliques et obtenir la qualité de l'eau souterraine représentative

de la partie supérieure de l'aquifère. Durant les opérations de forage, les matériaux de déblais ont été échantillonnés et décrits afin d'aider à définir la séquence stratigraphique des dépôts meubles et du roc. Les descriptions des forages sont présentes dans l'annexe électronique du rapport. La section 5.6.1 décrit le réseau de puits de surveillance dans la région d'étude, incluant les anciens puits du réseau du MDDELCC ainsi que les puits forés dans le cadre de ce projet (figure 5.21).

Les puits aménagés dans le cadre du projet PACES ont été légués en fin de projet au MDDELCC dans le but de bonifier leur Réseau de surveillance. Pour chaque puits, une entente de deux ans a été signée entre l'INRS et les propriétaires. Le MDDELCC a par la suite signé une nouvelle entente avec les propriétaires afin d'intégrer les puits à leur réseau.

2.2.4 Installation de capteurs de pression

Objectif

Les capteurs de pression servent à enregistrer les fluctuations de l'élévation de la nappe de façon régulière et continue. Ces données sont notamment utilisées pour estimer la recharge des aquifères. À long terme, les données peuvent servir à estimer l'impact des changements climatiques ou d'activités anthropiques influençant les taux d'utilisation des ressources en eau souterraine.

Méthodologie

Les capteurs de pression sont installés à une profondeur suffisante pour qu'ils ne soient pas dénoyés en période d'étiage (en fonction du rabattement annuel approximatif de la nappe). La profondeur d'installation des capteurs doit aussi respecter la profondeur maximale fixée par le fabricant, qui dépend du type de capteur de pression. Des enregistrements à un intervalle de 6 h ont été programmés afin de bien capter les fluctuations quotidiennes de la nappe dues aux changements de pression atmosphérique (dans le cas d'une nappe captive) ou à l'infiltration des précipitations (pour une nappe libre).

Description des travaux

Neuf capteurs de pression de 0.75 po de diamètre de la compagnie Solinst® ont été installés à l'été et à l'automne 2013 dans les puits conventionnels. Une visite de terrain a été faite en 2014, après la recharge du printemps, afin de recueillir les données de niveaux d'eau enregistrées par les capteurs.

La figure 2.5 donne un exemple de données acquise au puits d'observation PO-04 installé dans le cadre de ce projet. Tous les nouveaux hydrogrammes mesurés pendant la durée du projet ont été présentés de façon à faciliter l'interprétation des données acquises (annexe 4). La partie du haut présente les conditions météorologiques, incluant la température et les précipitations, en distinguant la pluie de la neige. Ces données permettent de constater si le niveau d'eau a varié en fonction des précipitations ou encore de la fonte printanière. Dans le cas de PO-04, la principale augmentation du niveau d'eau observée est reliée à la recharge printanière. La section 5.6.1 décrit le réseau de puits de surveillance dans la région d'étude, incluant les anciens puits ainsi que les nouveaux puits forés (figure 5.21).

Hydrogramme du puits d'observation PO-04 (Saint-Anselme)

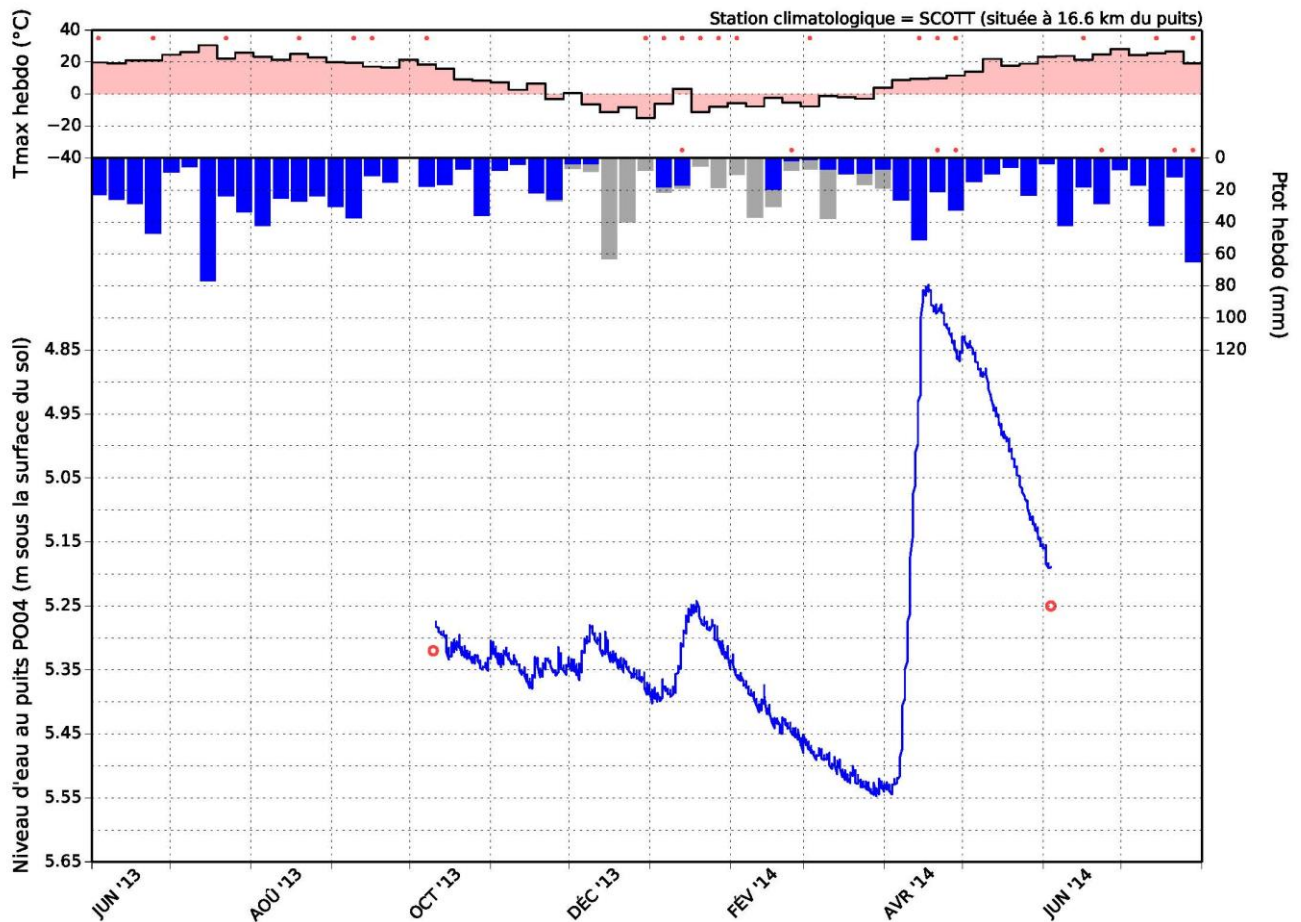


Figure 2.5 : Exemple de fluctuations du niveau d'eau au puits PO-04, situé à St-Anselme

2.2.5 Essais de perméabilité

Objectif

Les essais de perméabilité permettent d'obtenir une estimation des valeurs de conductivité hydraulique des formations géologiques granulaires ou de roc à partir de mesures dans les puits. Ce type d'essai, de courte durée, déplace un faible volume d'eau par différentes méthodes et mesure les fluctuations de niveau d'eau qui en découlent. Par conséquent, les propriétés hydrauliques mesurées aux puits lors de ces essais sont considérées comme ponctuelles en comparaison, par exemple, de mesures faites par des essais de longue durée tels des essais de pompage de 72 h ou plus. Cette méthode est cependant rapide et permet une estimation relativement fiable de la conductivité hydraulique des aquifères en place.

Méthodologie

Les essais de perméabilité effectués dans le cadre du projet ont été réalisés à l'aide d'un appareil pneumatique (figure 2.6) qui permet d'augmenter la pression d'air au-dessus de la colonne d'eau du puits pour en rabaisser le niveau (N.B. : le puits est scellé pendant l'essai) ; la pression est ensuite relâchée et la remontée du niveau d'eau est enregistrée par un capteur de pression automatisé.



Figure 2.6 : Instrumentation pour l'essai de perméabilité pneumatique sur un puits

Description des travaux

Des essais de perméabilité de courte durée ont été réalisés dans 6 des 9 puits d'observation interceptant l'aquifère de roc fracturé et dans 12 des 19 puits d'observation de plus petit diamètre (1 po et 2 po) aménagés dans des aquifères granulaires. Les données et l'interprétation de ces 18 essais sont compilés à l'annexe 4. Les valeurs obtenues ont été ajoutées aux résultats extraits des rapports hydrogéologiques et ceux disponibles dans les différentes bases de données existantes.

2.2.6 Levés de sismique réflexion

Objectif

L'objectif des travaux de sismique réflexion est de représenter les variations latérales de la géologie à l'endroit d'anciens paléochenaux présumés des rivières Chaudière et Etchemin situés près de Saint-Henri. Selon les données de forage existantes, la profondeur d'investigation visée par les travaux doit être de plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

Méthodologie

Les levés de sismique réflexion ont pour objectif de fournir de l'information sur les structures internes des dépôts meubles ainsi que de caractériser l'interface entre ces dépôts et le roc fracturé ou le till sous-jacent. Par ailleurs, le traitement avancé des données de sismique réflexion permet de définir des images de vitesses sismiques des ondes P, S_v et S_n , paramètres permettant notamment de différencier les argiles des sables. Le principe d'un levé sismique réflexion consiste à émettre des ondes acoustiques de différentes fréquences et à enregistrer les signaux réfléchis, transmis ou réfractés à l'aide de capteurs (géophones) déposés sur le sol. Les levés terrain et le traitement des données sismiques ont été réalisés par la compagnie MBMS Solutions Inc. L'équipement utilisé comprend une source multidirectionnelle portable, tractée à partir d'un camion, sur lequel sont fixées des unités de géophones à trois composantes, deux horizontales et une verticale. La source vibrante utilisée pour l'acquisition permet de produire des ondes de

cisaillement parallèles et transverses (S_v et S_h), ainsi que des ondes de compression (P). La source balaye une plage de fréquences entre 20 et 500 Hz. Les points de tir sont espacés d'environ 3 m. Le système d'enregistrement comporte 48 géophones (figure 2.7) qui échantillonnent le signal selon les 3 composantes (vertical, parallèle et transverse).

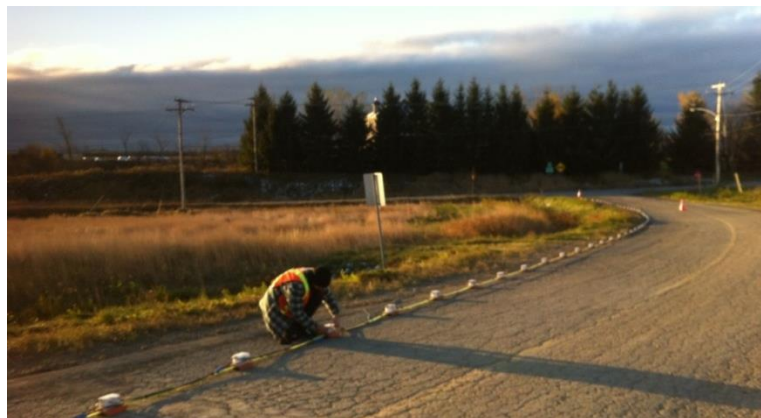


Figure 2.7 : Photo des capteurs à trois composantes des ondes sismiques

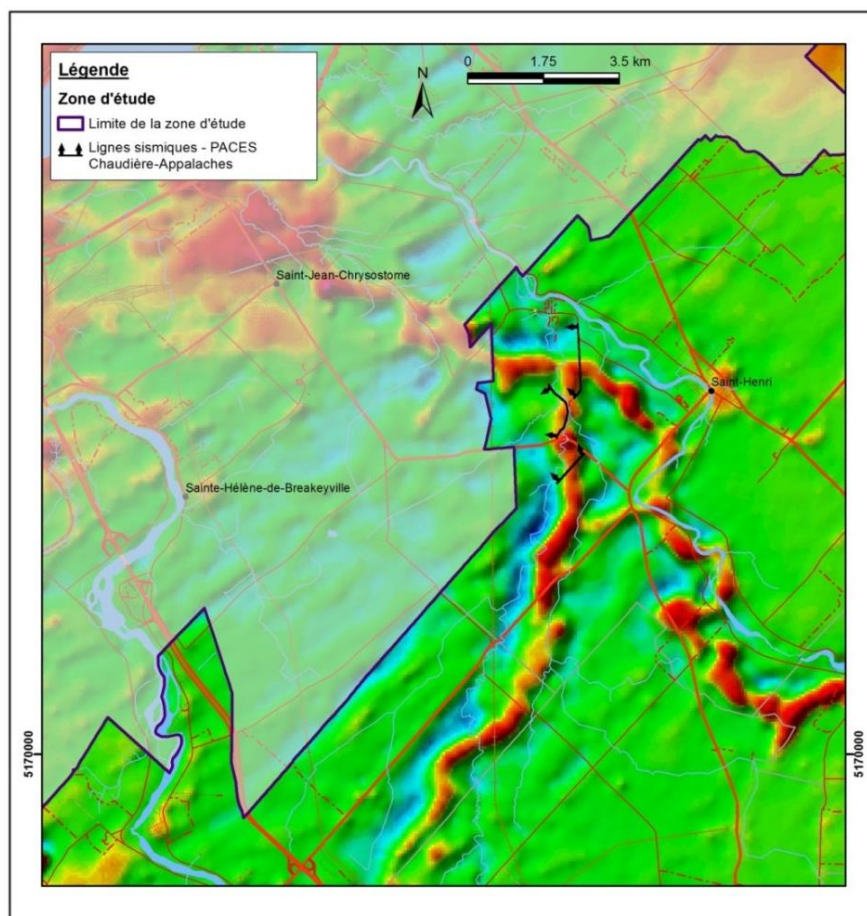


Figure 2.8 : Localisation des levés sismiques de l'automne 2013 avec, en arrière-plan, la dérivée première du levé aéromagnétique régional

Description des travaux

Des levés de sismique réflexion ont été réalisés au cours du mois d'octobre par la firme MBMS Solutions Inc. dans le secteur de Saint-Henri. Trois profils distincts ont été réalisés dans le même secteur, totalisant plus de 4 km de levés (figure 2.8). Les résultats après interprétation ont notamment servi à réaliser des coupes (coupes géologiques XS-01, XS-02 et XS-03 basées sur la sismique à l'annexe 4).

La figure 2.9 présente un profil préliminaire du traitement des réflecteurs en fonction de la profondeur. Les résultats préliminaires ont indiqué que des travaux complémentaires étaient requis pour investiguer davantage le secteur, de même que pour valider l'interprétation préliminaire des levés sismiques. Des sondages CPT et/ou RPSS ont donc été réalisés à l'été 2014 le long des levés sismiques. Le secteur avec l'épaisseur présumée la plus importante constitue une cible potentielle pour un éventuel forage conventionnel ou un forage rotonsonic qui permettrait l'échantillonnage en continu et la description de la totalité de la séquence quaternaire jusqu'au roc (Ballard et al., 2014b).

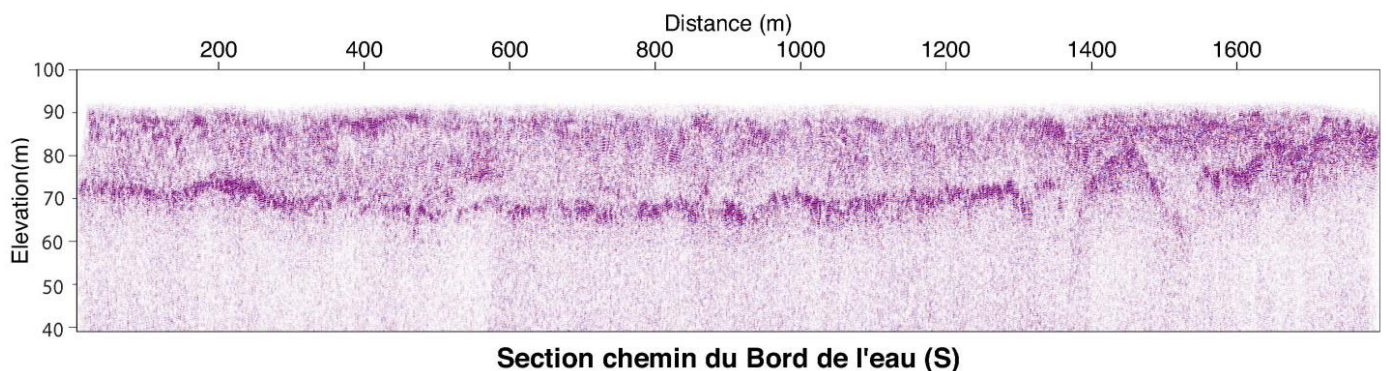


Figure 2.9 : Exemple d'un profil de sismique réflexion

2.2.7 Échantillonnage d'eau souterraine

Objectif

L'objectif de la campagne d'échantillonnage d'eau souterraine dans des puits (au roc ou dans les dépôts granulaires) est d'établir un portrait de la qualité et de la géochimie de l'eau souterraine dans la région d'étude. En plus des analyses produites par le projet PACES, des données sur la géochimie de l'eau souterraine provenant d'autres projets, antérieurs ou réalisés en parallèle dans la région d'étude, ont permis une couverture de l'ensemble de la région. La section 4.6 fait la description de l'ensemble des données géochimiques disponibles. Dans un premier temps, ces données permettent l'identification et la compréhension des mécanismes contrôlant la géochimie des types d'eau souterraine retrouvés dans la région d'étude, ce qui nous donne une compréhension du système d'écoulement régional (section 4.6). Ensuite, les données géochimiques permettent de juger de la qualité de l'eau souterraine par rapport à des critères de potabilité ou esthétiques et d'identifier si ces dépassements sont reliés à la qualité naturelle de l'eau souterraine ou à des activités anthropiques (section 5.4).

Méthodologie

Afin de sélectionner les sites d'échantillonnage, les différents contextes géologiques ont été pris en considération, en plus de la couverture spatiale des puits existants sur le territoire. La campagne d'échantillonnage a été planifiée de façon à assurer une couverture spatiale adéquate considérant les contraintes budgétaires ainsi que les données disponibles des études antérieures. En fonction du budget, un maximum de 140 échantillons d'eau a initialement été fixé pour l'analyse des paramètres chimiques de

base, incluant les duplicata et les échantillons de contrôle («blancs»). Les échantillons proviennent principalement de puits résidentiels, mais également de puits d'observation aménagés (section 2.2.3).

La campagne d'échantillonnage a débuté par la division du territoire en maillage régulier de 10 km afin d'optimiser la couverture spatiale du territoire d'étude. Au moins un échantillon devait être prélevé dans chacune des cellules de 10 km², dans la mesure où la présence de puits privés existants le permettait. Ce découpage de l'échantillonnage exclut le bassin de la rivière Chaudière déjà caractérisé en 2008 dans le cadre d'un projet financé par le Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ) dont la gestion était assuré par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) (Tecsult, 2008). Pour chacune des cellules de 10 km², une sélection a été faite pour choisir un ou plusieurs puits du répertoire du SIH (Système d'information hydrogéologique du MDDELCC) possédant une adresse postale. Cette liste contient des informations pertinentes sur plusieurs puits d'approvisionnement privés exploitant l'aquifère fracturé : notamment les coordonnées géographiques, l'adresse civique, la profondeur, la stratigraphie et la date de forage. Lorsque le contexte d'échantillonnage était défavorable dans une cellule donnée (ex. : aucun puits répertorié par le SIH; présence d'un système de traitement d'eau incontournable; absence de robinet extérieur à la résidence, refus du propriétaire), un échantillon était alors prélevé chez un voisin ou dans tout autre puits d'alimentation du même secteur, même si celui-ci n'est pas répertorié dans le SIH. Le choix d'un puits alternatif implique cependant l'obtention de certaines informations de base auprès du propriétaire : le type d'aquifère (granulaire ou fracturé), la profondeur et la date de forage (ces informations ne sont pas toujours connues du propriétaire). En complément à l'échantillonnage de puits privés, 27 puits d'observation aménagés spécifiquement pour le présent projet ont permis le prélèvement d'échantillons aux endroits présentant des intérêts hydrogéologiques particuliers ou encore aux endroits où aucun puits privé n'était disponible.

Lors de la rencontre avec le propriétaire, un dépliant expliquant les objectifs généraux du projet PACES Chaudière-Appalaches était remis avec le protocole d'échantillonnage. Une série de questions était aussi posée au(x) propriétaire(s) au sujet de leur perception de la qualité de leur eau. Des informations telles que les coordonnées du propriétaire, la perception de la qualité de l'eau, le type d'utilisation, le débit approximatif du puits, la profondeur et l'année de construction étaient notées dans un cahier d'observation de terrain (annexe 3 du rapport de la phase 2 du projet; Ballard et al., 2014a).

La collecte d'information, la purge, l'échantillonnage et la nomenclature de chacun des puits ont été réalisés conformément au protocole d'échantillonnage élaboré par le GRIES (Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines) spécifiquement pour les projets PACES (annexe 2). L'eau des puits d'alimentation privés est prélevée directement au robinet extérieur. Les puits d'observation (PO) aménagés par forages conventionnels et ayant un diamètre de 150 mm (6 po) ont été purgés et échantillonnés avec une pompe électrique de type Redi-Flo 2 de marque Grundfos. Les puits d'observation (nommés CPT) aménagés par enfoncement avec la foreuse de l'INRS (associés à un essai de type CPT, *Cone Penetration Test*) ayant un diamètre plus petit (25 ou 50 mm) ont quant à eux été purgés et échantillonnés manuellement à l'aide d'une tubulure de polymère munie d'un embout avec une valve à bille de type Waterra (figures 2.10 et 2.11). La purge des puits, préalable à l'échantillonnage, visait à obtenir une eau naturelle et représentative de la formation géologique interceptée par le puits. Durant la purge précédant l'échantillonnage, l'évolution des propriétés physico-chimiques de l'eau purgée a été mesurée *in situ* à l'aide d'une sonde multiparamètres de marque YSI. 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 plus de 5 minutes consécutives. La calibration de l'appareil était effectuée quotidiennement. Après le prélèvement, les échantillons ont été transportés dans une glacière, puis entreposés dans un réfrigérateur afin d'assurer une température de conservation de 4 °C jusqu'à leur acheminement vers les laboratoires. Chaque échantillon est composé de plusieurs bouteilles destinées à l'analyse de différents paramètres dans différents laboratoires.



Figure 2.10 : Pompes utilisées pour la purge et l'échantillonnage des puits d'observation



Figure 2.11 : Illustration de diverses procédures d'échantillonnage et d'analyse in-situ

La numérotation des échantillons a été réalisée de façon séquentielle. Les échantillons provenant de puits d'alimentation privés portent les identifiants « INRS400 » à « INRS557 », ainsi que la date de leur prélèvement, avec les exceptions suivantes : INRS456 à INRS499 ainsi que INRS525 n'existent pas (n'ont pas été prélevés); Les échantillons INRS449 à INRS452, INRS454, INRS554 et INRS555 ont été analysés uniquement pour les gaz dissous; les paramètres de base ayant déjà été analysés dans le cadre de l'étude de la CDAQ (voir section 4.6.2); INRS526A se trouve hors de la zone d'étude, mais a tout de même été considéré dû à sa proximité de la zone d'étude. Les échantillons provenant des puits d'observation portent le nom « CPT » ou « PO » et le numéro du puits, suivi de la date de prélèvement.

Un échantillonnage supplémentaire pour l'analyse des gaz dissous, notamment le méthane, a été réalisé dans les secteurs ciblés par l'exploitation des gaz de shale, soit Lotbinière et la Basse-Chaudière (dans le nord-ouest de la région d'étude). Ces travaux ont été menés en collaboration avec la Commission géologique du Canada (CGC). Les bouteilles spécifiques utilisées pour ces analyses étaient remplies au même moment que les échantillons d'eau souterraine, dans les mêmes puits et portent les mêmes identifiants, toujours en conformité avec le protocole d'échantillonnage élaboré par le GRIES (annexe 2). La méthode spécifique employée pour prélever ces échantillons permet d'éviter tout dégazage de l'eau.

Les paramètres de base ont été analysés sur chacun des échantillons d'eau souterraine, dans les jours suivant leur prélèvement. Il en a été de même pour l'analyse des gaz dissous (puits visés seulement). Les paramètres isotopiques ont été analysés uniquement sur une sélection d'échantillons d'eau et de gaz, généralement à la toute fin de la campagne d'échantillonnage. Le tableau 2.4 présente le bilan du nombre et des types d'analyses réalisées sur les échantillons d'eau souterraine et de gaz dissous. En plus des échantillons prélevés dans le cadre du PACES, les analyses réalisées conjointement avec la CGC dans le cadre d'un projet spécifique dans le secteur de Lotbinière et de la Basse-Chaudière y sont incluses.

L'analyse des métaux, des anions, des composés inorganiques, du carbone et de l'azote a été réalisée systématiquement sur chacun des échantillons d'eau souterraine. Une sélection d'échantillons a été faite pour l'analyse des isotopes. La sélection pour les isotopes de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) est basée sur l'objectif d'une représentativité spatiale uniforme. La sélection pour le tritium (^3H) a été réalisée en priorisant la représentativité des zones de recharge présumées des nappes. La sélection pour le carbone-14 (^{14}C et $\delta^{13}\text{C}$) avait pour but de favoriser les échantillons des eaux présumées les plus anciennes, mais des échantillons ont aussi été prélevés dans les zones de recharge pour définir ses valeurs de ^{14}C et $\delta^{13}\text{C}$. Les échantillons prélevés pour l'étude des gaz dissous ont été analysés systématiquement pour les concentrations en méthane (CH_4 , C1), éthane (C_2H_6 , C2) et propane (C_3H_8 , C3). Les échantillons présentant les plus fortes concentrations en méthane ont été acheminés à l'Université d'Ottawa pour une analyse des isotopes $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{13}\text{C}$ du méthane qui donnent des indications sur l'origine du méthane.

Tableau 2.4 : Analyses effectuées sur les échantillons d'eau souterraine et de gaz dissous

	Paramètres analysés	Nombre d'analyses (+DUP)		Labo
		PACES	CGC	
Eaux souterraines	MÉTAUX : . Al . Be . Cr . Li . Pb . Sr . Sb . Bi . Co . Mg . K . Ti . Ag . B . Cu . Mn . Se . U . As . Ca . Sn . Mo . Si . V . Ba . Cd . Fe . Ni . Na . Zn	133 (8)	20	Maxxam Analytique
	ANIONS : . Chlorures (Cl^-) . Fluorures (F^-) . Bromures (Br^-)			
	AUTRES COMPOSÉS INORGANQUES : . Sulfures (S^{2-}) . $\text{P}_{\text{inorganique}}$			
	AZOTE ET CARBONE : . CID . COD	133 (8)	15	INRS
	ISOTOPES: . $\delta^{18}\text{O}$. Tritium – ^3H . Carbone-14 (^{14}C)	37	-	HIL (U. Ottawa) EIL (U. Waterloo)
	ISOTOPES: . $\delta^2\text{H}$. $\delta^{13}\text{C}$	37	-	
Gaz dissous	C1 à C3 : . Méthane . Éthane . Propane	54 (24)	20	Delta Lab (CGC)
	ISOTOPES CH_4: . $\delta^2\text{H}$. $\delta^{13}\text{C}$	9	11	HIL (U. Ottawa)

Note: les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de duplicatats (DUP).

La campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine a été complétée à l'automne 2013 avec un total de 141 échantillons prélevés (103 puits résidentiels, 28 puits aménagés dans le cadre du projet et 10 duplicata). Bien que les derniers travaux d'échantillonnage aient été réalisés en octobre sur les 9 puits conventionnels, la majorité des échantillons ont été prélevés avant la mi-août. Les résultats d'analyses pour les paramètres de base effectuées sur l'eau souterraine de puits résidentiels ont été transmis aux propriétaires à l'automne 2013, en soulignant les dépassements de normes esthétiques ou de santé.

Base de données géochimiques sur l'eau souterraine

En plus des résultats analytiques obtenus dans le cadre de la présente étude, une compilation de données géochimiques issues d'études antérieures a été réalisée afin d'obtenir le portrait le plus détaillé possible de l'hydrogéochimie de la Chaudière-Appalaches (tableau 2.5 et figure 2.12).

Tableau 2.5 : Synthèse des données hydrogéochimiques dans la région d'étude

		Source des données					TOTAL
		PACES Chaudière- Appalaches	RNCAN St- Édouard	PACES CMQ	Projet CDAQ +	Autres (Rapports)	
AQUIFÈRE	Fracturé	106	16	11	123	41	297
	Granulaire	19	4	2	32	29	86
	Indéterminé	0	0	4	0	0	4
	TOTAL	125	20	17	155	70	387
ANALYSES	Majeurs / mineurs ¹	125	20	17	155	70	387
	Isotopes de l'eau ²	37	0	0	10	0	47
	Isotopes radioactifs ³	37	0	0	10	0	47
	Gaz C1 à C3 ⁴	30	20	0	0	0	50
	Isotopes du méthane ⁵	9	11	0	0	0	20

¹ Majeurs/mineurs: anions (Br, Cl, F, N-NO₂+N-NO₃, SO₄), nutriments (N-NH₃, P inorganique), 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), sulfures (S), carbone inorganique dissous (CID), carbone organique dissous (COD) et azote total (N_{tot}).

² Isotopes de l'eau : δ²H et δ¹⁸O.

³ Isotopes radioactifs : ³H, ¹⁴C et δ¹³C.

⁴ Gaz C1 à C3 : Méthane, éthane et propane.

⁵ Isotopes du méthane : δ¹³C et δ²H du méthane, δ¹³C du dioxyde carbone dans l'eau (CO₂) et δ¹³C du propane.

Les autres sources suivantes de données géochimiques sur l'eau souterraine ont été utilisées pour compléter la base de données géochimiques (tableau 2.5 et figure 2.12) :

- **Projet CDAQ** : étude supportée par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) couvrant les bassins versants de la basse et moyenne Chaudière ([COBARIC et UPA, 2008](#));
- **Complément au projet CDAQ** : analyses et interprétation isotopiques réalisées par la CGC dans la basse et moyenne Chaudière pour compléter les analyses chimiques acquises dans le cadre du projet CDAQ ([Benoit et al., 2009 et 2014](#));
- **PACES CMQ** : analyses réalisées dans le secteur de la ville de Lévis dans le cadre du projet PACES de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) réalisé par l'Université Laval ([Talbot Poulin et al., 2013](#));
- **RNCAN St-Édouard** : caractérisation de l'eau souterraine dans le secteur entourant un puits de gaz de schiste dans la région de St-Édouard-de-Lotbinière, réalisée par la Commission géologique du Canada (CGC) de Ressources naturelles Canada ([Rivard et al., 2013](#));
- **Rapports d'expertises** : différents rapports hydrogéologiques fournis par les partenaires du projet PACES Chaudière-Appalaches (surtout municipalités et MRC). Les informations géochimiques contenues dans ces rapports ont été extraites et compilées dans le cadre de la présente étude.

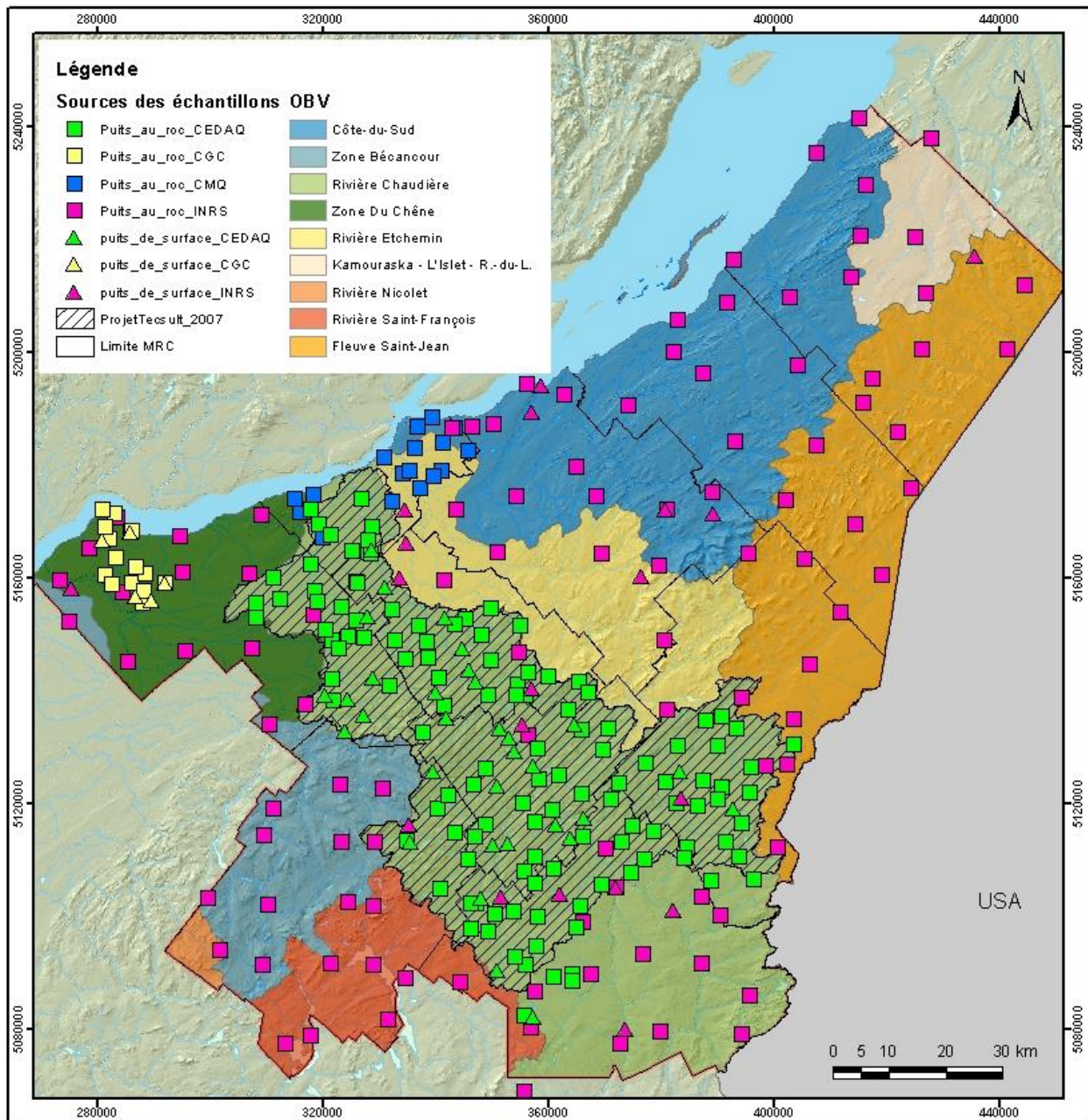


Figure 2.12 : Localisation des échantillons d'eau souterraine selon le type d'aquifère (roc fracturé ou granulaire) et la source des données

Des données hydrogéochimiques récentes et détaillées ont ainsi été assemblées, comprenant des résultats analytiques pour plusieurs paramètres chimiques, principalement inorganiques, pour 389 points d'échantillonnage répartis sur l'ensemble de la Chaudière-Appalaches. Des analyses isotopiques sont aussi disponibles pour une sélection de puits ainsi que des résultats analytiques en gaz dissous (C1 à C3). Les échantillons sont plus nombreux dans les puits exploitant l'aquifère rocheux (environ 78%) que pour les puits installés dans les aquifères granulaires (environ 22%). C'est l'aquifère rocheux qui est généralement exploité par les puits résidentiels, de même que par certains puits municipaux. La figure 2.12 illustre la répartition spatiale et la nature des échantillons d'eau.

2.3 Saisie, validation et archivage des données

2.3.1 Développement de la base de données à référence spatiale

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 fichiers Excel, soit dans une base de données Access, afin de les partager, les traiter et réaliser différentes cartes thématiques. Le partage avec ce genre de fichiers rendait difficile, voire impossible, la gestion des données et menaçait l'intégrité des données puisque chacun avait une « image » dans le temps de cette base de données et la modifiait à sa guise. De plus, la transmission de ces données aux futurs utilisateurs était également ardue à cause des différentes versions existantes. Enfin, cette façon de faire n'encourageait pas le respect des protocoles communs pour la sauvegarde et la gestion des données et des cartes.

Afin de pallier ce problème, les responsables des projets régionaux du PACES ont décidé, de concert avec le MDDELCC, de centraliser les données des différents projets régionaux dans une base de données commune, développée avec le serveur de base de données PostgreSQL. Le modèle qui a servi à développer cette base de données commune provient de travaux de cartographie régionale, géologique et hydrogéologique, réalisés par la Commission géologique du Canada (CGC) au cours des 20 dernières années. L'historique du développement du modèle de base de données a été documenté dans le rapport du projet PACES en Montérégie Est ([Carrier et al., 2013a](#)).

Dans le cadre des projets PACES, les grandes lignes de la structure de base de données de la CGC 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 faciès stratigraphiques du SIGEOM, de nouvelles municipalités, de nouveaux types d'objets. Le système de gestion de base de données (SGBD) FieldCapture de la CGC a été utilisé pour les données acquises sur le terrain et l'appellation « base de données de terrain » a été retenue pour la distinguer de la base de données à référence spatiale (BDRS) aussi utilisée dans le cadre de ce projet. Cette dernière base de données est décrite plus loin.

La figure 2.13 présente schématiquement l'organisation de la base de données terrain, basée sur FieldCapture de la CGC, qui s'appuie sur les principales étapes de collecte des données de terrain. Ces dernières sont représentées par trois éléments conceptuels importants:

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

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.

Afin de faciliter et de normaliser l'entrée des données dans le BD de terrain, des formulaires WEB ont été développés pour le projet de PACES Chaudière-Appalaches. La figure 2.14 présente le formulaire pour entrer une localisation et la description d'un objet (ex. : puits, forage, sondage, affleurement, trou, point de départ d'une ligne sismique), tandis que la figure 2.15 illustre le formulaire des observations liées à cet objet (ex. : échantillonnage d'eau ou de sol, niveau d'eau, stratigraphie, mesures *in situ* géochimique, données d'essais de pompage).

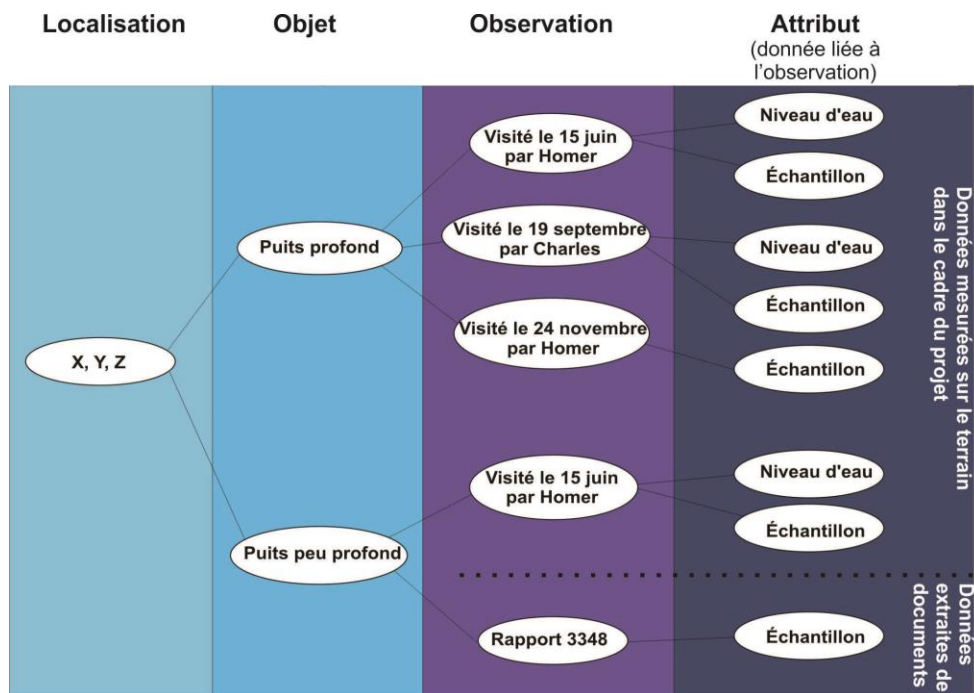


Figure 2.13 : Représentation du modèle de prise de données sur le terrain (Carrier et al., 2013a)

Localisation pour laquelle vous entrez ou éditez des données

loc_id	x	y	Description
loc_mont2000	674349	5058540	La localisation provient du SIH et elle est en UTM nad 83

Données de localisation correspondant à l'identifiant entré
--VOUS TRAVAILLEZ AVEC LA BD MONTEREGIE--

*# Localisation: loc_mont2000

Municipalité: Saint-Liboire

Projection: UTM NAD 83

*Zone UTM(i): 18

**X(d): 674349

Coordonnées XY: *Y(d): 5058540

Source Loc.: Base de données

Note 500 c. max.: La localisation provient du SIH et elle est en UTM nad 83

Altitude: Altitude(d): 81.3419494628906 Unités

Source Alt.: Non-applicable N/A

Note sur la localisation 500 c. max.: cle provenant de la fusion des colonnes cle_puits_no_projets cle_puits1 du sh 197810017805

Soumettre Effacer

(i) Champs nombre entier
(d) Champs nombre décimale
* Champs obligatoire

Retour Page d'accueil

Figure 2.14 : Localisation d'un objet (Carrier et al., 2013a)

Localisation pour laquelle vous entrez ou éditez des données

loc_id	x	y	Description
loc_mont2000	674349	5058540	La localisation provient du SIH et elle est en UTM nad 83

Objet et observation(s) associé(s)
--VOUS TRAVAILLEZ AVEC LA BD MONTEREGIE--

*Objet observé: AFFL : Affleurement

*Date insertion objet: 2010/08/17

Note sur l'objet: []

Observation: Le numéro d'observation est généré automatiquement 103317

*Nom: Christine Rivard

*Date observation(s): 2010/08/17

*Observation(s) Intérêt(s) sur les formulaires:

1	[]
2	[]
3	[]
4	[]
5	[]
6	[]

Environnement: Tourbière

Précipitation: Non déterminée

Météo: Non déterminée

Note sur l'observation:

1	Une note 1
2	Une note 2
3	Une note 3
4	Une note 4
5	Une note 5
6	Une note 6

Retour Page d'accueil

Soumettre Effacer

Figure 2.15 : Observations effectuées se rattachant à un objet (Carrier et al., 2013a)

Comme système de gestion de base de données (SGBD), il a été décidé d'utiliser le serveur PostgreSQL dans le cadre de ce projet. Ce serveur est gratuit et a l'avantage de posséder des outils très puissants pour la manipulation de ces données, autant tabulaires qu'à référence spatiale (point, ligne et polygone). Afin d'intégrer encore plus le développement des livrables cartographiques et le SGBD (la BD de terrain), il a été décidé dans le projet PACES Chaudière-Appalaches d'utiliser ArcSDE (*Spatial Database Engine*), une interface permettant de faire le lien entre la BD de terrain et les produits cartographiques développés dans ArcGIS. Un des principaux avantages de l'utilisation d'une base de données à référence spatiale (BDRS) commune est l'accès direct à la dernière version des données dans une structure établie pour les besoins spécifiques des projets régionaux (ex. : préparation de cartes thématiques). L'utilisation de règles de validation communes et la sauvegarde périodique assurent également l'intégrité des données. La figure 2.16 est une représentation simplifiée des composantes nécessaires à l'utilisation d'une base de données à référence spatiale à l'aide des produits ESRI (ArcGIS). Sur la figure 2.16, SGBD est le système de gestion de base de données (ex.: PostgreSQL, Oracle, DB2), dont l'interface avec les autres applications est assurée par SDE (*Spatial Database Engine*). La structure de la base de données commune aux projets régionaux PACES et ses caractéristiques sont fournies à l'annexe 5, tandis que le protocole de développement de cette base de données est fourni à l'annexe 3.

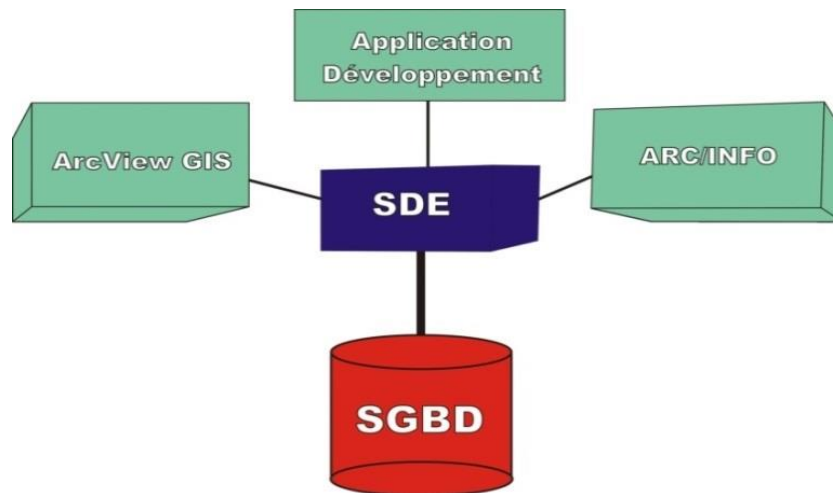


Figure 2.16 : Représentation schématique de la base de données commune (Carrier et al., 2013a)

2.3.2 Vérification et validation des données

2.3.2.1 Principes de la validation des données

Tout ensemble de données comporte des incohérences. La validation permet d'éliminer, jusqu'à un certain niveau, certaines de ces incohérences telles que des données dupliquées (doublons), erronées (valeur inadéquate, notamment à cause d'une mauvaise saisie de la donnée) ou mal positionnées (erreur sur la localisation). Ainsi les résultats des interpolations et calculs statistiques qui servent à la réalisation directe ou indirecte des livrables et même la compréhension générale du système hydrogéologique peuvent être grandement affectés si ces incohérences ne sont pas corrigées préalablement à la production du livrable.

La validation des données est ainsi un processus nécessaire afin d'obtenir une base de données la plus fiable possible, de façon à permettre la réalisation de produits (livrables) représentatifs de la région. Bien qu'une certaine validation ait été nécessaire dès le départ afin d'intégrer les données à la base de données, 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 élaboré par le GRIES (annexe 3) a été utilisé avec quelques modifications afin d'atteindre des objectifs de validation qui correspondaient mieux aux données disponibles pour la région de Chaudière-Appalaches et aux traitements qui devaient être appliqués.

2.3.2.2 Procédure de validation des données

Le processus de validation qui a été appliqué dans le cadre de cette étude peut être divisé en deux types, en fonction de l'outil utilisé : validation par analyse spatiale avec ArcGIS et validation sur les données descriptives avec des fonctions programmées dans PostgreSQL.

Validation réalisée avec le logiciel ArcGIS

La première étape de validation a été réalisée à l'aide des divers outils disponibles dans ArcGIS. Cette validation a permis de vérifier la localisation des objets sous deux aspects spécifiques :

- La cohérence de la localisation avec les limites des municipalités : il faut s'assurer qu'un objet se trouve bien dans la bonne municipalité. La cote pour cette validation est VL1 et les différentes valeurs possibles sont :

- Aucun conflit spatial identifié
- Conflit spatial identifié et corrigé
- Conflit spatial identifié mais localisation considérée adéquate
- Conflit spatial identifié mais non corrigé
- n/a
- La cohérence de la localisation avec le réseau hydrographique : si un objet est situé dans l'eau, on doit vérifier si c'est normal. La cote pour cette validation est VL2 est les valeurs possibles sont :
 - Aucun conflit spatial identifié
 - Conflit spatial identifié et corrigé
 - Conflit spatial identifié mais localisation considérée adéquate
 - Conflit spatial identifié mais non corrigé
 - n/a

La valeur n/a était donnée aux objets pour lesquels la validation n'était pas applicable. Cette première étape de la validation permet de corriger, et à l'occasion d'éliminer, des objets qui présentaient un mauvais positionnement (pour différentes raisons). Dans ce projet, 505 puits avaient un conflit spatial avec les cours d'eau. Ce nombre a pu être réduit à 69 après l'étape de validation. Ceci démontre l'avantage d'effectuer ce type de traitement sur les données.

La suite de la validation dépend des cotes attribuées lors des validations VL1 et VL2. Ainsi, les 69 objets (puits) qui n'avaient pas la côte 3 et moins pour la validation VL2 ont été exclus pour la réalisation des livrables. Aucun puits n'a été exclu suite à la validation VL1.

Validation avec élaboration de fonctions dans PostgreSQL

Cette partie de la validation a été effectuée directement dans la base de données de terrain, en développant des fonctions dans le langage PL/pgSQL. L'utilisation du serveur PostgreSQL a permis une grande flexibilité au niveau de la validation tout en évitant une manipulation inutile des données, c'est-à-dire l'exportation dans un autre logiciel pour effectuer la validation. Ceci a l'avantage d'assurer une grande sécurité pour l'intégrité des données et un gain de temps. . Pour cette étape de validation, certains objets présents dans la base de données ont été laissés de côté, obtenant ainsi la valeur n/a, soit en raison de leur nature, soit en raison de l'absence d'information nécessaire à la validation et à la préparation des livrables ou soit parce qu'ils provenaient de projets PACES antérieurs ayant déjà appliqués un processus de validation similaire. Ainsi, des 52 562 objets présents dans la base de données, 28 757 ont été considérés pour cette étape de validation.

Les neuf étapes de validation, numérotées A à H, ont permis d'identifier les objets qui pouvaient servir à la réalisation des différents livrables. Par exemple, un objet « puits » pouvait avoir une profondeur au roc valide mais un niveau d'eau non valide, ce dernier pouvait donc servir à la réalisation du livrable topographie du roc mais pas à celui sur la piézométrie dans le roc. Un point en commun des différentes étapes de la validation est le rayon de recherche pour la comparaison des objets entre eux. A l'aide de quelques tests comparatifs et notre jugement professionnel, un rayon arbitraire de 200 m a été sélectionné, de façon à avoir suffisamment d'objets et qu'ils soient représentatifs pour les calculs statistiques effectués. Il est important de bien comprendre que lors de la validation, l'objet qui est validé l'est par rapport à un objet qui se trouve à l'intérieur du rayon de 200 m. Si plusieurs objets sont présents dans le rayon, la validation ce fait en comparant deux objets à la fois, l'objet à valider et un des autres objets présents. Les cotes sont ainsi assignées à l'objet à valider par rapport à un autre objet.

De toutes les étapes de validation, l'identification des doublons est sans doute la plus importante car elle est applicable pour tous les livrables. Ainsi, si un objet est identifié comme doublon, il n'est pas sélectionné pour la préparation des livrables et n'est pas inclus dans les étapes subséquentes de la validation. Préalablement à l'identification des doublons, une vérification de la profondeur du forage relié à l'objet-

puits doit être réalisée. Cette information n'étant pas toujours disponible, il est parfois possible d'aller la chercher via la stratigraphie de l'objet en question. La première étape à effectuer est donc la validation VT1 qui est détaillée dessous.

- A. L'étape de validation VT1 vise à relever les erreurs sur la profondeur du forage d'un objet (puits ou forage). Ainsi si une profondeur est nulle, négative ou aberrante pour un contexte donné, celle-ci est identifiée comme telle dans la base de données. De plus, si la profondeur est manquante, cette dernière est ajoutée en utilisant la profondeur de la dernière unité stratigraphique reliée à cet objet si cette observation est disponible dans la BD. Les différentes cotes pour cette 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) n/a

Les objets ayant la cote 4 et plus n'ont pas été conservés. Ainsi, 1009 objets n'ont pas passé cette étape de validation. Encore une fois, certains objets ont été exclus de par leur nature.

- B. La seconde étape de validation, dénommée VD1, vise à vérifier la présence de doublons. Cette étape requiert des informations sur la profondeur et l'année de construction (et évidemment des coordonnées géographiques) de chaque objet. Cet objet est ainsi comparé à tout autre objet (puits) à l'intérieur d'un rayon de recherche et si sa profondeur est similaire (à ± 1 m) et que l'année de construction est la même, un drapeau a été levé. La provenance des objets est alors vérifiée afin de savoir lequel des doublons doit être 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) études régionales (projet PACES ou autre)
 - 2) études locales antérieures (consultants ou autre)
 - 3) bases de données gouvernementales du MTQ et du MERN (SIGEOM, SIGPEG)
 - 4) base données du CCEG
 - 5) base de données du MDDELCC (SIH)

Les cotes pour l'identification des doublons, utilisant la comparaison de plusieurs objets (puits ou forages) dans un rayon de 200 m, sont les suivantes :

- 1) Forage unique
 - a. Forage conservé : forage dont la profondeur est la plus importante lorsque les coordonnées sont identiques, et la différence de profondeur est supérieure à 1 m et les années de construction sont différentes;
 - b. Forage exclu : forage dont la profondeur n'est pas la plus importante lorsque les coordonnées sont identiques et la différence de profondeur est supérieure à 1 m et les années de construction sont différentes;
- 2) Forage ayant des coordonnées identiques, mais dont la différence de profondeur est supérieure à 1 m et l'année de construction n'est pas disponible;
 - a. Forage conservé : lorsque plus de deux forages ayant des coordonnées identiques se terminent dans les dépôts, les moins profonds reçoivent la cote 2ca et sont rejetés;
 - b. Forage conservé : lorsque plus de deux forages forage ayant des coordonnées identiques se terminent dans le roc, ceux qui sont moins profonds reçoivent la cote 2cb et sont rejetés;
- 3) Forage avec doublon(s) identifié(s) mais qui a été conservé comme référence unique;

- 4) Forage avec doublon(s) probable(s) : forage sans date de réalisation mais dont la différence de profondeur avec un autre forage est inférieure à 1 m;
- 5) Forage avec doublon(s) probable(s), en se basant uniquement sur les coordonnées car aucune information sur la profondeur et la date de réalisation ne sont disponibles;
- 6) Forage avec doublon(s) : même profondeur (± 1 m) et même année de construction.
- 7) n/a

Les coordonnées des puits qui ont obtenu les cotes 1a, 1b, 2ac ou 2bc ont été légèrement modifiées afin d'enlever l'équivalence de ces derniers. Cette opération était nécessaire car, pour réaliser les différentes interpolations servant à la création directe et indirecte des livrables, les coordonnées doivent être différentes pour que l'interpolateur prennent en compte ces objets. Un total de 1709 objets ont reçu la cote 4, 5 ou 6 et ceux-ci ont été exclus du reste de la validation ainsi que pour la réalisation des livrables.

- C. L'étape de validation VT2 avait comme objectif de relever les erreurs sur la profondeur d'un puits par rapport à l'épaisseur totale des séquences stratigraphiques. Les cotes pour cette 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) n/a

Il y a eu 291 objets qui ont obtenus la cote 5 et plus, et qui ont été exclus des autres étapes de validation et qui n'ont donc pas servi à la réalisation des livrables (entre autres celui reliés aux épaisseurs des dépôts meubles).

- D. L'étape de validation VT3 servait à vérifier la cohérence entre le niveau d'eau statique et la profondeur totale d'un puits. Une différence de ± 1 m est acceptée. Les cotes pour cette validation sont :
- 1) Niveau statique $<$ Profondeur total du puits
 - 2) Niveau statique $<$ Profondeur total du puits (après correction)
 - 3) Niveau statique disponible mais profondeur non disponible
 - 4) Niveau statique $>$ Profondeur total du puits
 - 5) n/a (aucune donnée sur le niveau d'eau)

Il y avait 13 720 objets sur les 28 757 objets disponibles initialement, soit 47 %, qui ont obtenu une cote de 4 ou 5 et qui n'ont pas pu servir à la réalisation des livrables (ex. : piézométrie du roc et la vulnérabilité). Ce chiffre peut paraître grand mais il faut mentionner que plusieurs objets (6965) n'avaient pas d'information sur le niveau d'eau. De plus, il est à noter que les doublons excluent déjà une partie des 28 757 objets initialement considérés.

- E. L'étape de validation VT4 a pour but de détecter les erreurs flagrantes sur le niveau d'eau statique à partir des mesures réalisées lors d'essais de pompage en comparant les niveaux statique et dynamique. Les cotes pour cette validation sont les suivantes :
- 1) Niveau statique \leq Niveau dynamique
 - 2) Niveau statique \leq Niveau dynamique (après correction)
 - 3) Niveau statique disponible mais niveau dynamique non disponible
 - 4) Niveau statique $>$ Niveau dynamique
 - 5) n/a

Il y a eu 11 012 objets qui ont obtenu la cote 4 et plus. De ce nombre, 8 850 objets avaient obtenu la cote 5 car le niveau dynamique ou le niveau d'eau statique n'était pas disponible pour ces objets.

Lors des étapes de validation VT5, VT6, VT7 et VT8, un calcul de la moyenne et de l'écart-type est effectué pour vérifier les profondeurs des puits, du roc et du niveau d'eau statique, ainsi que l'épaisseur de l'argile pour chacun des objets (forage ou puits). Le calcul est effectué lorsqu'il y a cinq objets ou plus dans un rayon de 200 m autour de l'objet validé. Ce critère sur le nombre d'objets minimum a éliminé beaucoup d'objets, mais il a été jugé que la validation sur la moyenne et l'écart-type ne pouvait pas être réalisée en-deça de ce nombre. Cette partie de la validation servait d'indicateur afin de repérer les zones sensibles lors des différentes interpolations effectuées sur ce type de données. Aucun objet n'a été rejeté par l'application de ce critère.

F. L'étape de validation VT5 vise la comparaison de la profondeur totale du forage avec la moyenne \pm l'écart-type des valeurs de profondeur totale des forages situés dans un rayon de 200 m. Cette validation sert à identifier les puits qui ont une profondeur significativement différente de ceux les entourant et donc à détecter les valeurs aberrantes (*outliers*). De telles erreurs pourraient par exemple découler de la non conversion en mètre de longueurs originales en pieds. Les cotes pour cette validation sont les suivantes :

- 1) Différence de profondeur totale (valeur versus moyenne) inférieure à l'écart-type calculé pour les forages adjacents
- 2) Nombre de forages inférieur à 5 dans le rayon de recherche
- 3) Différence de profondeur totale (valeur vs moyenne) supérieure à l'écart-type calculé pour les forages adjacents
- 4) n/a

Cette validation sert surtout d'indicateur, et aucun puits n'a été exclu sur la base de cette validation. Il y a eu 1 041 puits qui se sont vus attribuer la cote 3, car ils avaient une profondeur totale très différente de celles des autres puits adjacents (différence supérieure à l'écart-type calculé); 21 596 objets ont obtenu la cote 2 (pas assez de forages pour effectuer cette validation) et 1 752 ont obtenu la cote 4

G. L'étape de validation VT6 vise à comparer les profondeurs du roc (toujours à l'aide de la moyenne et de l'écart-type) en se servant d'au moins 5 objets dans un rayon de 200 m. Les cotes pour cette validation sont les suivantes :

- 1) Différence de profondeur du roc (valeur versus moyenne) inférieure à l'écart-type calculé pour les forages adjacents
- 2) Nombre de forages inférieur à 5 dans le rayon de recherche
- 3) Différence de profondeur du roc (valeur versus moyenne) supérieure à l'écart-type calculé pour les forages adjacents
- 4) n/a

Cette étape est très importante car la profondeur du roc est une variable essentielle à définir puisque beaucoup de livrables dépendent de cette information. Ici, 819 objets (puits) ont été identifiés avec une profondeur au roc en dehors de la moyenne \pm l'écart-type calculé (cote 3), 20 073 ont obtenu la cote 2 et 6208 ont obtenu la cote 4. Certains des objets ayant reçu les cotes 3 et 4 ont été exclus pour la production du livrable de la profondeur au roc.

H. L'étape de validation VT7 a permis de réaliser le même genre de vérification que pour les étapes VT5 et VT6, mais cette fois sur les niveaux d'eau statiques. La moyenne et l'écart type des niveaux statiques sont calculés pour 5 objets (puits) ou plus dans un rayon de 200 m et comparés à la valeur du niveau d'eau statique du puits validé. Les cotes de validation sont les suivantes :

- 1) Différence de niveau statique (valeur versus moyenne) inférieure à l'écart-type calculé pour les forages adjacents
- 2) Nombre de forages inférieur à 5 dans le rayon de recherche
- 3) Différence de niveau statique (valeur versus moyenne) supérieure à l'écart-type calculé pour les forages adjacents

4) n/a

Il y a eu 647 objets (puits) qui ont obtenu la cote 3, 117 958 ont obtenu la cote 2 et 8 879 se sont vus attribuer la cote 4. Certains des objets ayant reçu les cotes 3 et 4 ont été exclus pour la production du livrable de la piézométrie au roc.

- I. L'étape de validation VT8 a pour but de vérifier l'épaisseur d'argile fournie dans les différents puits de la base de données à partir de la moyenne et de l'écart-type calculés pour 5 objets (puits) ou plus. La valeur de l'épaisseur du puits à valider est ainsi comparée à la moyenne \pm l'écarte-type calculée avec les puits localisés dans un rayon de 200 m. Les cotes de validation sont les suivantes :
 - 1) Différence d'épaisseur d'argile (valeur versus moyenne) inférieure à l'écart-type calculé pour les forages adjacents
 - 2) Nombre de forages inférieur à 5 dans le rayon de recherche
 - 3) Différence d'épaisseur d'argile (valeur versus moyenne) supérieure à l'écart-type calculé pour les forages adjacents
 - 4) n/a (moins de 5 valeurs d'épaisseur d'argile disponibles)

Cette dernière étape permet de raffiner la sélection des valeurs d'épaisseur qui ont été utilisées pour la préparation des livrables tels que la recharge, la vulnérabilité et l'épaisseur de dépôts. Il y a eu 44 objets qui ont obtenu la cote 3, 5 285 ont obtenu la cote 2 et 23 361 ont obtenu la cote 4.

Résumé de la validation

Le tableau 2.6 résume le résultat des différentes étapes de validation et présente ainsi le nombre d'objets utilisés pour chacun des livrables sur le nombre total d'objet présent dans la BD et le pourcentage des différentes données ayant servies à la réalisation des livrables selon leur provenance. A noter qu'en plus des étapes de validation décrites précédemment, la sélection finale des données indiquées au tableau 2.6 inclut deux étapes supplémentaires de validation, soit une validation croisée réalisée lors de l'interpolation des données et une validation par analyse visuelle des résultats d'interpolation en coupe. Ces étapes supplémentaires, basées en partie sur le jugement professionnel, ont été réalisées de façon itérative afin d'identifier la présence d'erreurs potentielles non filtrées par les étapes de validation précédentes.

Tableau 2.6 : Données ayant servies à la réalisation des livrables après validation

ID ⁽¹⁾	Livrable	Nb objet utilisé	SIH (%)	MTQ (%)	Études antérieures (%) ⁽²⁾	INRS (%)	CCEG (%)	MERN ⁽³⁾ (%)
14	Coupes stratigraphiques	661	90.1	1.4	4.5	1.1	0.3	2.6
15	Épaisseur totale des dépôts	28961	86.7	2.6	2.8	0.2	0.3	7.4
15a	Épaisseur des dépôts sus-jacents à l'argile	2495	87.4	8.5	3.4	0.4	0.2	< 0.1
15b	Épaisseur d'argile	5880	93.1	4.5	1.9	0.4	0.1	< 0.1
16	Topographie du roc	28961	86.7	2.6	2.8	0.2	0.3	7.4
17	Conditions de confinement	28961	86.7	2.6	2.8	0.2	0.3	7.4
18	Épaisseur et limites des aquifères régionaux	28961	86.7	2.6	2.8	0.2	0.3	7.4
20	Piézométrie du roc	15791	96.6	-	2.9	-	0.4	-
21	Paramètres hydrogéologiques	9335	98.7	-	1.3	-	-	-
24 ⁽⁴⁾	Qualité eau souterraine Critères de potabilité	394	-	-	61.4	38.6	-	-
25 ⁽⁴⁾	Qualité eau souterraine Critères esthétiques	394	-	-	61.4	38.6	-	-

Notes :

⁽¹⁾ : Numéro de livrable PACES

⁽²⁾ : Cette source comprend les études antérieures locales (par des consultants ou autres) ainsi que les études antérieures régionales (PACES, CDAQ ou autres)

⁽³⁾ : Cette source comprend les bases de données SIGPEG et SIGEOM

⁽⁴⁾ : Seules les analyses chimiques « complètes » de sources diverses ont été retenues (voir section 2.2.6)

3 CONTEXTES GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES

3.1 Géologie du socle rocheux

La carte géologique du socle rocheux (figure 3.2 ; **carte 13**) a été fournie par la Direction générale des hydrocarbures et des biocarburants du MERN. 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). Cette carte, obtenue en version électronique, est une compilation réalisée pour les besoins internes du MERN 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](#))
- Géologie de la Gaspésie et du Bas-Saint-Laurent ([Brisebois, 2003](#))
- Carte géologique du Québec ([MRN, 2001](#))

En Chaudière-Appalaches, on distingue deux provinces géologiques : la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. La Ligne (ou faille) de Logan, s'étendant du lac Champlain à la Ville de Québec, 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 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 déformation d'intensité variable, notamment lors des orogénèses taconienne et acadienne. Ces roches chevauchent en séquence progressives les roches de la Plate-forme du Saint-Laurent.

Cette section ne fait qu'une brève description du contexte géologique de la Chaudière-Appalaches. Les lecteurs intéressés pourront trouver plus de détails sur la cartographie géologique dans [St-Julien \(1995\)](#) et [Castonguay et al. \(2002\)](#), une description plus détaillée de l'histoire géologique et de la stratigraphie dans [Lavoie \(2002\)](#) et des informations sur la minéralogie des roches dans [Ognyomi et al. \(1980\)](#).

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 dans la présente section. 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. Au Cambrien, l'ouverture de cet 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.

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'orogénèse 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 ») ([St-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'orogénèse taconienne, entraîne également le charriage local d'écaillés 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'orogénèse acadienne et subséquemment érodées. Dans la région d'étude, l'érosion se serait poursuivie jusqu'au Quaternaire.

Tableau 3.1 : Étapes de l'histoire géologique de 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 Appalaches, 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 la hauteur de Québec par soulèvement des Appal.
			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
	Cambrien		Dépôt des dolomies du Gr. de Beekmantown dans une mer peu profonde
			Régression marine
Déposition des grès du Potsdam			
Précambrien	Tardif	Plateau laurentien (Précambrien)	
		Érosion longue et continue des terrains montagneux	
	Précoce		Socle igné et volcanique (roches cristallines)

3.1.2 Stratigraphie et lithologies

La stratigraphie de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches est résumée 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 de la Plate-forme du Saint-Laurent, tandis que la figure 3.2 montre les contextes géologiques de la région d'étude, notamment les zones subdivisant les Appalaches. Pour la Plate-forme, nous nous intéressons surtout au sommet de la séquence qui est la seule partie de la stratigraphie présente en surface dans la région d'étude.

3.1.2.1 Plate-forme du Saint-Laurent

À la base de la séquence stratigraphique de la Plate-forme du Saint-Laurent (figure 3.1), 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 de la Province du Grenville (socle précambrien). Ce groupe comprend deux formations, Covey Hill à la base et Cairnside au sommet. La séquence se poursuit 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. L'épaisseur de ce groupe est de l'ordre de 450 m.

Période	Groupe / Formation		Lithologie
Ordovicien	Queenston		Shale, mudrock et grès
	Lorraine		
	Utica supérieur		Shale calcaireux
	Utica inférieur		Shale et calcaire
	Trenton-Black River-Chazy supérieur		Calcaires
	Chazy inférieur		Calcaire, dolomie et grès
	Beekmantown	Beauharnois	Dolomie
Theresa		Grès dolomitique	
Cambrien	Potsdam	Cairnside	Grès quartzeux
		Covey Hill	Grès et conglomérat
Précambrien	Socle grenvillien		Granitique

Figure 3.1 : Colonne stratigraphique schématique pour la Plate-forme du Saint-Laurent (d'après [Globensky, 1987](#) et [Lavoie, 1994](#))

Tel que mentionné, 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 comporte trois formations relativement minces, soient les formations de Pamela, Lowville et Leray. Son épaisseur totale est inférieure à 30 m et comporte des roches d'âge Ordovicien moyen qui sont principalement de la dolomie (Pamelia) et du 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.

Les shales calcaireux 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. 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 calcaireux, 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 calcaireux, 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.

3.1.2.2 Appalaches

La portion des Appalaches située dans la zone d'étude peut être subdivisée en quatre (4) zones tectonostratigraphiques sur la base de contrastes stratigraphiques et structuraux. À partir de la Plate-forme, du nord-ouest au sud-est, on retrouve les zones suivantes (figure 3.2) : Zone de Humber externe, Zone de Humber interne, Zone de Dunnage et Ceinture de Gaspé. On retrouve aussi des intrusifs dans les Appalaches, notamment au sud de Disraeli. Trois failles majeures séparent les contextes géologiques de la région : la Ligne Logan, la faille de Richardson et la faille de la Guadeloupe. La Ligne Logan sépare la Plate-forme du St-Laurent des Appalaches. Les zones définies dans les Appalaches sont distinctes aux niveaux de leurs lithologies, de leur type de déformation et de leurs degrés de métamorphisme.

Tel que décrit plus loin, les roches constituant les Appalaches ont été transportées et déposées sur les roches de la Plate-forme du St-Laurent. Les roches de la Plate-forme sont donc « autochtones » tandis que celles des Appalaches sont « allochtones ». C'est la Ligne Logan, une faille de chevauchement, qui sépare les lithologies autochtones de la Plate-forme des lithologies allochtones des Appalaches.

Livrable PACES no. 13 : GÉOLOGIE SIMPLIFIÉE DU ROC

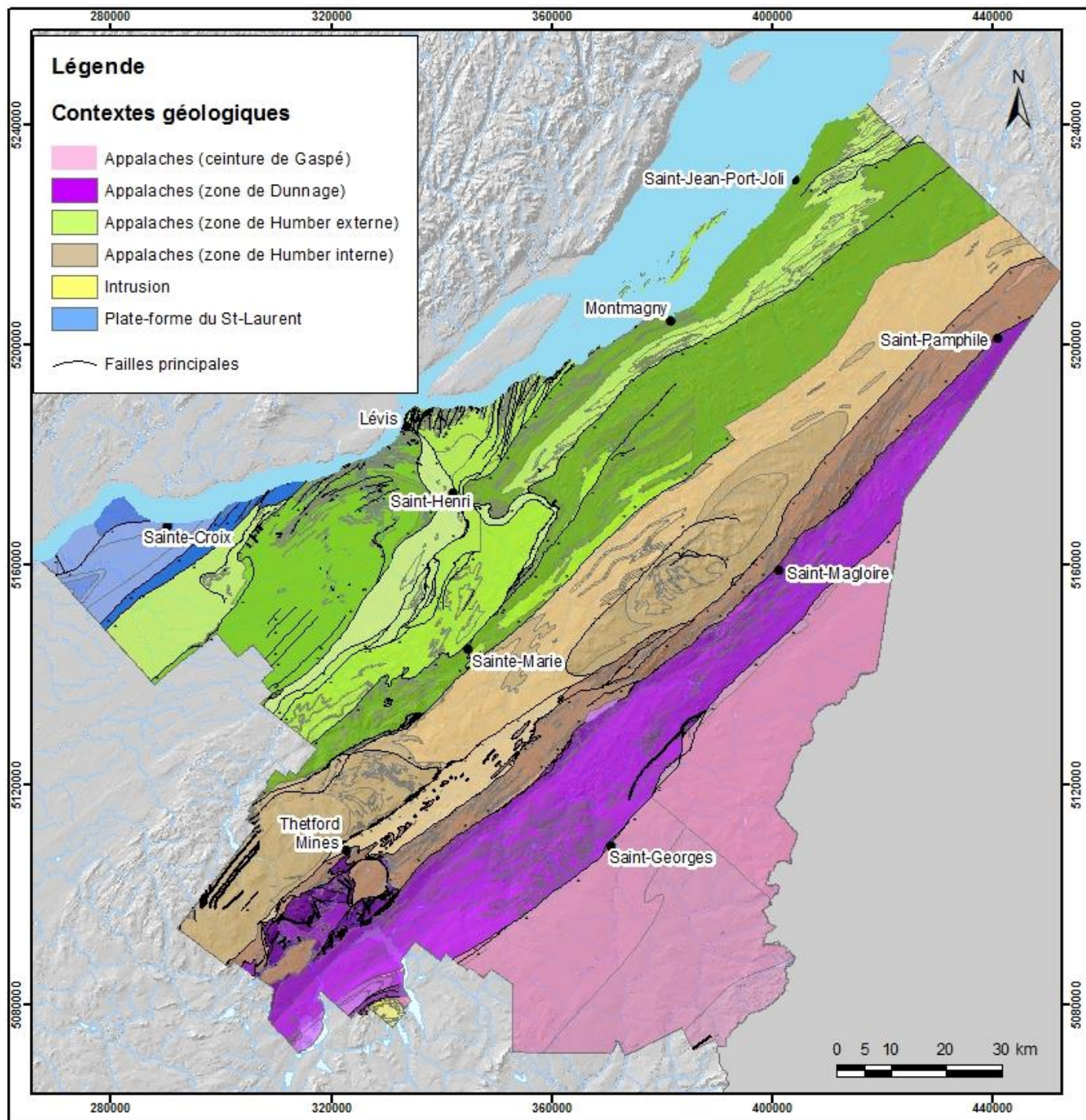


Figure 3.2 : Contextes géologiques (carte 13)

Entre la Ligne Logan et la faille de Richardson, on retrouve la Zone de Humber qui est subdivisée en deux : la Zone de Humber externe et la Zone de Humber interne, séparées par la faille Bennett. On y retrouve un mélange de roches sédimentaires (grès, shale), volcaniques et métamorphiques (schistes et quartzites) déformées et caractérisées par des plis et des fractures, mais dont le degré de métamorphisme n'est pas important. Entre les failles de Richardson et de la Guadeloupe, on retrouve la Zone de Dunnage qui comprend les vestiges de la croûte océanique formée au Cambrien et mise en place à l'Ordovicien inférieur. Ces vestiges sont représentés par une zone de complexe ophiolitique qui a fait l'objet d'une exploitation minière pour l'amiante dans la région de Thetford Mines. On retrouve dans cette zone des roches sédimentaires (schistes) et volcaniques (phyllade) très déformées et qui montrent un degré de métamorphisme plus élevé. Au sud-est de la faille de la Guadeloupe, on retrouve la Ceinture de Gaspé qui est caractérisée par des roches sédimentaires (grès, siltstones, schistes) et des basaltes plus jeunes que les roches présentes dans les autres zones de la région d'étude. Les roches de la Ceinture de Gaspé sont à grain plus fin et auraient a priori un potentiel aquifère assez faible.

3.1.3 Tectonique et structure

La figure 3.3 montre un modèle structural conceptuel représentant les conditions rencontrées à la limite ouest de la Chaudière-Appalaches (Séjourné et al., 2013). Ce modèle a été développé sur la base des lignes sismiques et des forages d'exploration pétrolière, de la géologie de surface et de la structure du socle précambrien sous-jacent à la séquence sédimentaire de la Plate-forme du St-Laurent.

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 cinq (5) zones tectonostratigraphiques : 1) la Plate-forme du Saint-Laurent, 2) la zone de Humber externe, 3) la zone de Humber interne, 4) la zone de Dunnage et 5) la Ceinture de Gaspé (figure 3.2). 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 de métamorphisme et de déformation plus important.

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'orogénèse 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 d'Aston (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'orogénèse taconienne, est d'orientation sud-ouest/nord-ouest et affecte surtout les roches des groupes de Lorraine et Queenston.

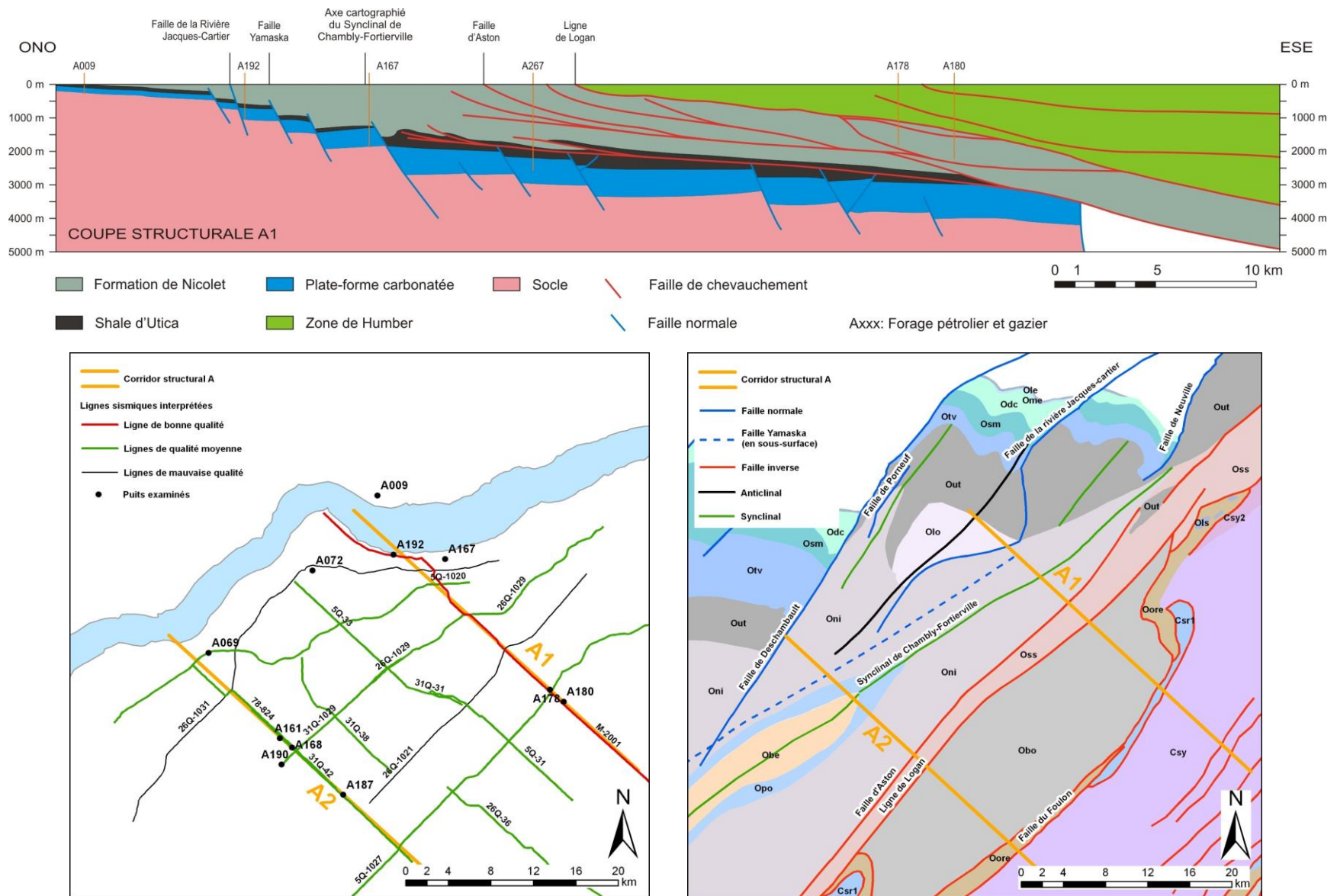


Figure 3.3 : Modèle structural conceptuel (A1) (Séjourné et al., 2013) (livrable 14B)

La carte de gauche montre la localisation des lignes sismiques et celle de droite présente la géologie du roc

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 par la ligne (faille) Brompton-Baie Verte. 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 à la **carte 13**, est fixée comme étant la faille de Bennett. 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'orogénèse 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 orogénèses taconienne et acadienne les ont affectées, provoquant notamment des rétrochevauchements et des failles normales.

Tel que mentionné précédemment, la zone de Dunnage est délimitée au nord-ouest par la zone de Humber. Au sud-est, elle est bordée par la Ceinture de Gaspé 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'orogénèse acadienne (Castonguay, 2000). La Ceinture de Gaspé est caractérisée par des roches sédimentaires (grès, siltstones, schistes) et des basaltes plus jeunes que les roches présentes dans les autres zones appalachiennes.

3.2 Géologie du Quaternaire

Tel que décrit à la section 2.2.1, la carte du Quaternaire et de la géomorphologie (figure 3.4A ; **carte 12**) est une compilation de cartes de trois sources (Parent et al., 2015) : 1) une nouvelle cartographie de 12 feuillets 1/50 000 réalisée par l'UQAM en 2013-2014 (Daigneault et al., 2014), 2) une nouvelle cartographie réalisée par un étudiant au doctorat de l'INRS à l'aide des levés LiDAR disponibles sous la limite marine (section 6.1), et 3) la conversion des cartes de Gaucher et al. (1984) à la légende quaternaire de la CGC utilisée pour les cartes des projets PACES et leur correction pour que la proportion de roc affleurant soit davantage en cohérence avec les cartes produites par l'UQAM. Des ajustements ont aussi été faits pour assurer la cohérence des polygones aux limites entre les différentes sources cartographiques.

3.2.1 Description de la carte des formations superficielles

Dans la région d'étude, les contextes physiographiques sont en lien étroit avec la géomorphologie et le mode de mise en place des sédiments meubles, ou dépôts quaternaires. La région peut effectivement être séparée en deux grands ensembles; les basses-terres du Saint-Laurent, et les hautes-terres appalachiennes. En surface, la limite entre les deux contextes est bien nette, et correspond à un seuil de l'élévation du socle appalachien qui s'étend sur un axe SO-NE quasi parallèle au fleuve ainsi qu'à la limite marine (185 ± 10 m ANM).

Dans les basses-terres, on retrouve typiquement en surface des unités marines et glaciomarines associées à la Mer de Goldthwait. C'est dans ce secteur que sont recoupées les épaisseurs les plus importantes de dépôts meubles, bien que celles-ci soit très variables. En effet, plusieurs crêtes rocheuses orientées SO-NE sont visibles dans ce secteur, à proximité de paléo-bassins sédimentaires où sont recoupés plus de 20 m de dépôts argileux. La topographie y étant relativement plane, et on peut y trouver plusieurs zones de mauvais drainage, comme dans Lotbinière, où de grandes tourbières sont installées sur des sédiments marins littoraux minces peu perméables. Dans la zone du piémont appalachien, les sédiments marins d'eau profonde, littoraux et sub-littoraux sont parfois recouverts par des formations deltaïques mises en place en milieu marin à l'embouchure des cours d'eau principaux, notamment à Saint-Lambert-de-Lauzon (rivière Chaudière) et à Saint-Raphaël (rivière du Sud).

Livrable PACES no. 12 : GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE

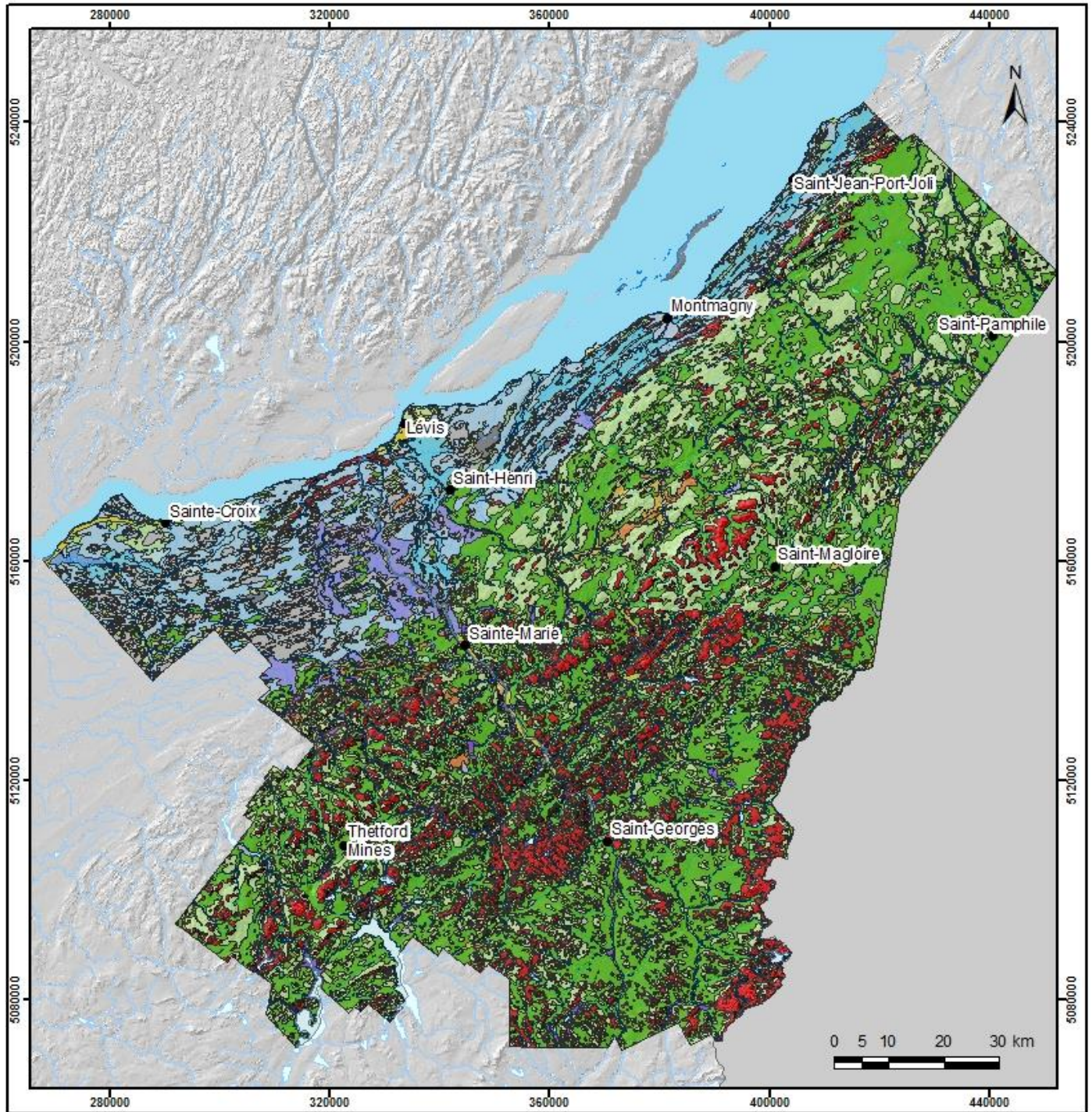


Figure 3.4A : Géologie des formations superficielles (**carte 12**) (compilation de sources diverses décrites à la section 2.2.1; Parent et al., 2015)

Légende simplifiée

QUATERNAIRE - POSTGLACIAIRE

DÉPÔTS DE VERSANT

C Dépôts de versant indifférenciés

SÉDIMENTS ORGANIQUES

Ot Sédiments de tourbières

Om Sédiments de marécages et de marais

DÉPÔTS ÉOLIENS

Ed Sédiments éoliens

SÉDIMENTS ALLUVIAUX

Ap Alluvions actuelles

At Alluvions des terrasses fluviales

SÉDIMENTS MARINS

Mb Sédiments littoraux et pré-littoraux

Ma Sédiments fins d'eau profonde

DERNIÈRE GLACIATION

SÉDIMENTS GLACIOMARINS

MGd Sédiments deltaïques et prodeltaïques

MGb Sédiments littoraux et pré-littoraux

MGa Sédiments fins d'eau profonde

SÉDIMENTS GLACIOLACUSTRES

LGd Sédiments deltaïques et prodeltaïques

LGb Sédiments littoraux et pré-littoraux

LGa Sédiments fins d'eau profonde

SÉDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES

Go Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien

Gs Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique

Gx Sédiments juxtaglaciaires

SÉDIMENTS GLACIAIRES

Tc Till en couverture généralement continue

Tm Till en couverture mince et discontinue

PRÉ-QUATERNAIRE - SUBSTRAT ROCHEUX

R Roche non différenciée

 Zone d'étude


 Lieu habité

Figure 3.4B : Légende simplifiée de la géologie des formations superficielles

Le secteur des hautes-terres appalachiennes est quant à lui dominé par des sédiments glaciaires. De grandes zones de till mince ou d'affleurements rocheux sont observées sur les sommets topographiques, notamment dans le secteur des Monts Notre-Dame, dans la région de Beauceville, et également dans les montagnes frontalières. Entre Saint-Georges et Saint-Gédéon, où la topographie est moins accidentée, la couverture de till tend à s'épaissir, pour atteindre jusqu'à 5 m par endroits.

À l'intérieur du contrefort appalachien, un sous-contexte des hautes-terres pourrait correspondre aux grandes vallées encaissées, orientées principalement NO-SE, comme celle de la rivière Chaudière dans l'axe Sainte-Marie–Saint-Georges. Des complexes de dépôts fluvioglaciaires, mis en place principalement lors du retrait des glaces, occupent souvent les fonds de vallées, particulièrement dans le secteur est du territoire. Un réseau très développé de dépôts sousglaciaires comprenant plusieurs segments d'eskers est observé dans les environs de Saint-Damien-de-Buckland, au nord-est d'un affleurement rocheux.

3.2.2 Histoire du Quaternaire

Dans les Appalaches, la période glaciaire du Quaternaire est marquée par trois avancées glaciaires majeures, la dernière et plus récente phase ayant eu lieu au Wisconsinien. Les dépôts les plus anciens retrouvés sur le territoire de Chaudière-Appalaches sont associés à la glaciation Illinoienne, ayant mis en place le Till de Johnville, un diamicton gris très compact, lors d'un écoulement provenant du nord-ouest (McDonald et Shilts, 1971). Des sédiments alluviaux interglaciaires du Sangamonien, la Formation de

Massawippi, surmontent le till Illinoien et le séparent du Till de Chaudière. Ce dernier aurait été déposé lors d'une englaciation régionale en provenance de l'est ou du sud-est (Maine ou Nouveau-Brunswick), bien que la position du centre de la glace ait pu varier à plusieurs reprises, comme en témoignent des changements importants dans la direction de l'écoulement (Parent, 1987). Ce till est généralement compact et argileux. Au Wisconsinien moyen, une déglaciation partielle du sud de la vallée du Saint-Laurent entraîne la création d'un lac en marge glaciaire dans lequel sont déposés les sédiments de la Formation de Gayhurst, principalement sous forme de varves silteuses, mais aussi d'épandages subaquatiques sablo-graveleux.

Le dernier maximum glaciaire au Wisconsinien supérieur (~ 18 500 ans) a atteint la côte est américaine. Dans la région d'étude, cette dernière avancée laisse le Till de Lennoxville, le dépôt glaciaire retrouvé en surface sur la plus grande partie de Chaudière-Appalaches. Ce diamicton à matrice brune forme généralement une couverture mince et contient une quantité considérable de clastes locaux aplatis et anguleux, typiques des roches appalachiennes, mais aussi des clastes de provenance grenvillienne. La présence de gneiss dans le till indique généralement la présence ou la proximité du front laurentien, alors que la présence de roches ultramafiques est plutôt associée au front appalachien, ce type de roche provenant de la bande de roches ophiolitiques caractéristiques de la région de Thetford-Mines. Le Till de Lennoxville déposé dans des zones occupées précédemment par les lacs de l'épisode de Gayhurst est beaucoup plus silteux et moins perméable en raison de son mélange avec les dépôts glaciolacustres.

Au Wisconsinien supérieur (tardiglaciaire), le retrait glaciaire s'effectue graduellement selon une orientation nord-ouest et nord-nord-ouest (Parent et Occhietti, 1988; McDonald et Shilts, 1971); des crêtes morainiques généralement d'orientation nord-est, de même que différents types de dépôts fluvioglaciaires sont laissés lors du retrait. Des moraines généralement lobées sont mises en place, ainsi qu'une série d'eskers composés principalement de sable, gravier et blocs. Lors de la déglaciation finale, alors que l'Inlandsis retraite vers la Vallée du Saint-Laurent, un courant glaciaire à écoulement vers le nord-est se développe au sein de la masse glaciaire et s'étend à toute la vallée en aval de Québec (Parent et Occhietti, 1999). Régionalement, dans les hautes-terres appalachiennes, l'amont topographique se retrouve libre de glace avant l'aval, de sorte que le front glaciaire obstrue alors partiellement le drainage naturel en surface, et contribue à la création de lacs proglaciaires importants, où sédimentent des silts et sables fins.

La déglaciation fut suivie par l'épisode marin de la Mer de Champlain (Mer de Goldthwait en aval du seuil de Québec). Dans la région de Chaudière-Appalaches, la limite marine est située aux environs de 185 m ANM. Cette invasion marine entraîne notamment le dépôt de sédiments marins silto-argileux sur le piémont appalachien où leur épaisseur dépasse rarement 5 m en amont du seuil de Québec alors que leur épaisseur atteint 20 m et plus en aval. L'amincissement et le retrait de l'Inlandsis laurentidien provoquent également le relèvement isostatique de la croûte terrestre, favorisant une régression relativement rapide de la mer.

Dans les secteurs où l'eau était moins profonde, des sédiments marins littoraux composés principalement de sables, graviers et galets se sont mis en place sous forme de cordons ou de plages, et recouvrent les faciès d'eau profonde. À l'embouchure des principaux cours d'eau (rivières Chaudière, Etchemin, du Sud) dans la Mer de Goldthwait, des deltas se sont mis en place. Sur les crêtes rocheuses du piémont appalachien, l'épaisseur de dépôts meubles est faible et ceux-ci sont généralement marqués en surface par un fort remaniement littoral. Suite au retrait de la mer jusqu'à son niveau actuel, le réseau hydrographique actuel s'installe graduellement, amenant l'incision des sédiments marins et le dépôt de sédiments alluviaux. Durant l'Holocène, des dépôts organiques se forment dans les régions mal drainées, et des dunes éoliennes sont mises en place.

3.2.3 Stratigraphie et distribution des sédiments du Quaternaire

La séquence stratigraphique des sédiments déposés au Quaternaire et observés en surface dans la zone d'étude est résumée dans la légende de la **carte 12** (figure 3.4B), qui les présente en ordre chronologique. 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.

Dans la zone des basses-terres et du piémont, on peut typiquement retrouver successivement, du socle rocheux jusqu'à la surface : des sédiments glaciaires (till) d'épaisseur variable et pouvant être remaniés dans les secteurs plus élevés, des sédiments fluvioglaciaires (présence locale principalement sous forme d'épandages proglaciaires subaquatiques) ayant érodé en partie le till sous-jacent, des sédiments glaciolacustres argilo-silteux en couverture discontinue, des sédiments marins et glaciomarins d'eau profonde (argile) d'une épaisseur significative, des sédiments marins littoraux d'épaisseur variable et en couverture discontinue, des sédiments marins deltaïques d'épaisseur variable et finalement des sédiments alluviaux et organiques. Par endroits, des séquences plus complexes montrant un till basal et un till sommital et pouvant surmonter localement les sédiments fluvioglaciaires ou des sédiments quaternaires anciens ont également été observées. Le till retrouvé à la base de la séquence est généralement assez mince, excepté dans certaines dépressions du roc, comme dans la zone entre Sainte-Croix et Laurier-Station (voir coupe XS36). Les sédiments fluvioglaciaires et glaciolacustres n'affleurent pas dans cette partie des basses-terres, mais des affleurements de till sont observés à quelques endroits, notamment dans le secteur de Saint-Apollinaire (au nord-est de Laurier-Station) ainsi qu'à Saint-Henri, en bordure de la rivière Chaudière. Les sédiments organiques sont généralement assez minces. Au sud de Laurier-Station, par exemple, les grandes tourbières développées sur des sédiments marins littoraux peu perméables montrent en moyenne 2 à 3 m d'épaisseur. Les dépôts alluvionnaires sont toujours très minces, alors que les dépôts de terrasses alluviales peuvent parfois faire plusieurs mètres d'épaisseur.

Plus haut sur le piémont appalachien, la topographie du roc devient plus variable. La séquence stratigraphique typique consiste en un assemblage de sédiments glaciaires (till) surmontés de sédiments littoraux (gravier, sable et silt) et parfois érodés en totalité ou en partie par des sédiments fluvioglaciaires (sable et gravier). Les sédiments glaciaires de cette zone ont subi un important remaniement par l'action des vagues de la Mer de Goldthwait, résultant en de grandes zones de till remanié. Dans les vallées et les dépressions profondes, la stratigraphie est semblable à celle retrouvée dans les basses-terres, exception faite des faciès marins qui sont remplacés progressivement par des faciès glaciomarins à l'approche de la limite marine.

Dans les hautes-terres appalachiennes, la séquence stratigraphique la plus commune consiste en un till reposant directement sur le socle rocheux. De grandes unités de till en couverture continue occupent la majorité de cet ensemble. Lorsque la topographie devient plus accidentée, en général le till s'amincit et devient plus discontinu pour éventuellement laisser place à des affleurements rocheux.

Dans les vallées appalachiennes, on retrouve typiquement des sédiments glaciaires (till) et/ou des sédiments anciens à la base, des sédiments fluvioglaciaires (affleurant parfois sur les flancs de la vallée), des sédiments glaciolacustres (d'eau profonde, littoraux et deltaïques) et des sédiments alluviaux mis en place durant l'Holocène. Le modèle de mise en place du till est très similaire à celui des hautes-terres, excepté dans les fonds de vallée, où celui-ci a été la plupart du temps érodé par les cours d'eau sous-glaciaires qui ont aussi mis en place les sédiments fluvioglaciaires. Les sédiments glaciolacustres observables en coupe sur le territoire ne font en général pas plus de 2 m d'épaisseur en coupe (à Saint-Jacques-de-Leeds, ou près du lac Aylmer, par exemple). Cependant, plusieurs forages au nord-ouest de Sainte-Perpétue semblent indiquer la présence d'une unité glaciolacustre formée de sédiments fins qui ferait une dizaine de mètres d'épaisseur, sous un premier till (voir coupe XS10).

3.2.4 Architecture des sédiments

Une dizaine de coupes stratigraphiques simplifiées ont été préparées afin de documenter et illustrer l'architecture des dépôts dans des contextes typiques. Ces coupes sont intégrées à l'annexe 2 regroupant des versions électroniques pleine grandeur des livrables PACES du projet. Ces coupes ont été élaborées à partir des données de forages colligées et validées dans le cadre du projet, mais également à partir de la géologie du Quaternaire, des données sur les affleurements et des données géophysiques interprétées (sismique réflexion). Ces coupes font partie du **livrable 14A** et la figure 3.5 présente leur emplacement. L'emplacement 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 rocheux régional et des données géochimiques recueillies. Ces coupes ont ultimement permis de synthétiser l'architecture des sédiments par des modèles conceptuels décrits à la section 4.7 (tableau 4.8).

La séquence de sédiments rencontrée dans le secteur des basses-terres est représentée par les coupes **XS01**, **XS02** et **XS03**. Cette série de coupes est localisée à l'ouest de Saint-Henri. La topographie du roc a été interprétée à l'aide des données de forage disponibles mais également d'un levé de sismique réflexion effectué par la firme MBMS Solutions (voir section 2.2.6). La séquence la plus typique correspond à celle de la coupe XS01, où l'on observe une couverture de till relativement continue qui se trouve à remplir les dépressions rocheuses. Des sédiments fluvioglaciers discontinus s'interposent localement entre le till et des dépôts glaciomarins argileux, lesquels forment le reste de la colonne stratigraphique. Plutôt exceptionnellement, dans l'axe de certaines vallées où le roc est encaissé, des sédiments associés à une ancienne configuration du réseau hydrographique peuvent être retrouvés. Les fonds de vallées rocheuses, comme illustré sur la coupe XS02, peuvent alors être comblés de sédiments fluviaux sur plusieurs mètres. La coupe XS03 illustre quant à elle quelques faciès sableux interprétés comme étant des dépôts glaciomarins proximaux à l'intérieur d'une unité marine. On remarque également la présence de sédiments fins indifférenciés dans une dépression du roc.

La coupe **XS33** est également située dans les basses-terres, et suit un axe approximativement SO-NE, et donc parallèle au fleuve Saint-Laurent mais à environ 30 km à l'intérieur des terres. Des environs de Saint-Agapit au SO (à gauche sur la coupe), jusqu'à Saint-Anselme en passant par Saint-Lambert-de-Lévis, elle traverse une zone principalement caractérisée par la présence de deltas mis en place en milieu marin. Ces deltas sont généralement déposés directement sur le socle rocheux ou sur une mince couche de till, mais peuvent parfois surmonter des sédiments fins sur lesquels le delta a progradé. Les dépressions du socle rocheux sont très locales et les bassins ainsi créés sont généralement comblés de sédiments glaciaires ou fluvioglaciers.

Les coupes **XS34** et **XS35** sont toutes deux typiques du contexte stratigraphique observé sous la limite marine dans la région de Côtes-du-Sud sur le piémont appalachien. La coupe **XS34** débute à Saint-Michel-de-Bellechasse, en bordure du Fleuve Saint-Laurent (section gauche de la coupe). Les argiles marines retrouvées en surface font une vingtaine de mètres d'épaisseur. Quelques dépressions sont observées dans le roc, et sont généralement comblées par du till, et parfois très localement par des dépôts sableux. Au fur et à mesure que le socle rocheux remonte, les argiles en surface sont progressivement remplacées par des silts et des sables littoraux plus minces. Du côté sud de la crête rocheuse au centre de la coupe, les faciès marins d'eau profonde se font rares. Ceux-ci sont plutôt remplacés par des sédiments marins littoraux, puis par les sédiments plus grossiers associés au delta de Saint-Raphaël (rivière du Sud). La coupe **XS35**, située près de la limite nord-est du secteur à l'étude, montre qu'une épaisseur négligeable de dépôts meubles coiffe les affleurements rocheux du secteur du côté du fleuve (section gauche de la coupe). La coupe **XS35** croise une seule vallée, et celle-ci est comblée presque exclusivement par des dépôts marins d'eau profonde (argiles et silts). Plus haut sur le piémont, la remontée abrupte du socle rocheux donne lieu à des reliefs peu favorables à l'accumulation de sédiments meubles, et le roc demeure très près de la surface.

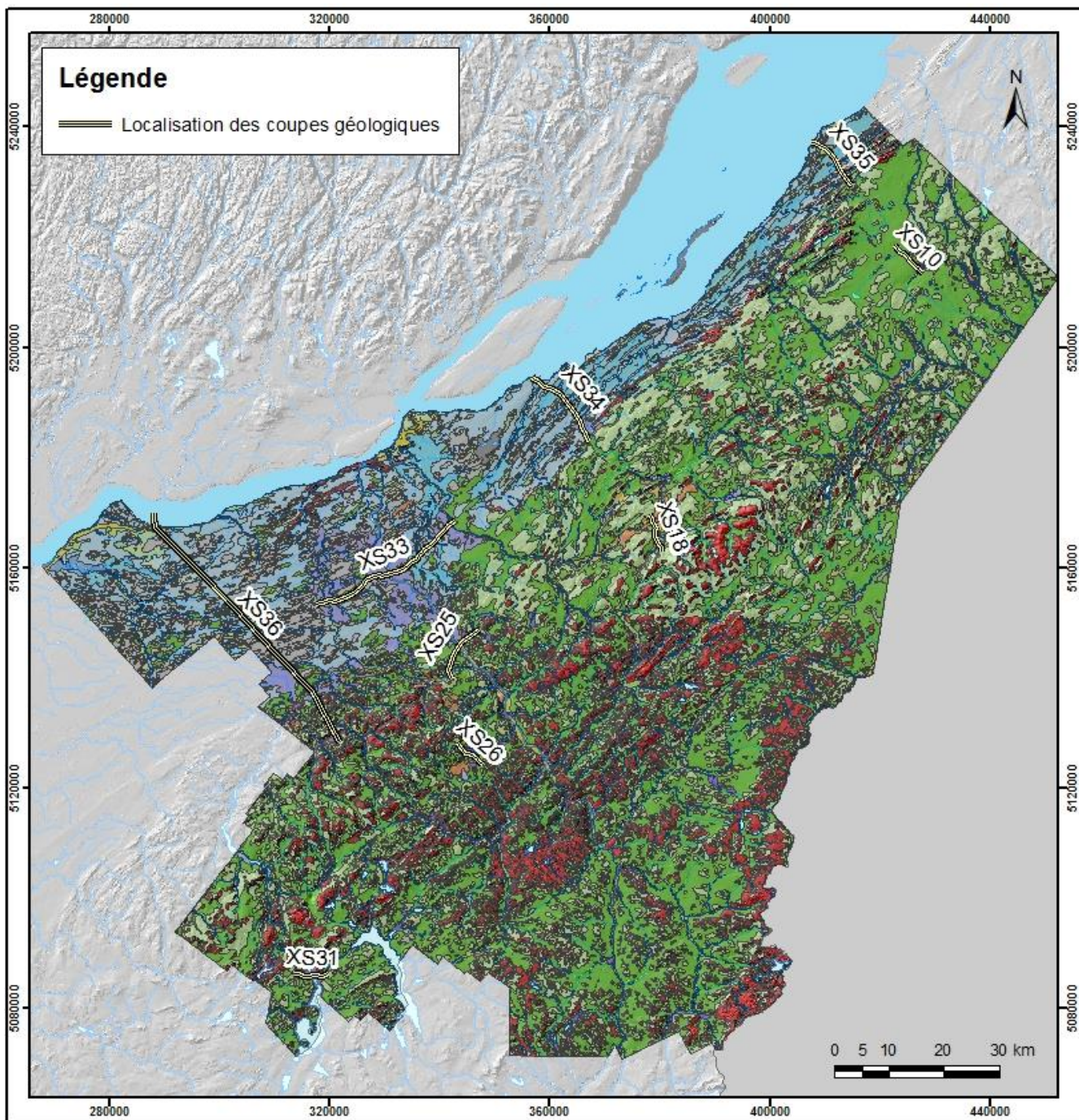


Figure 3.5 : Emplacement des coupes stratigraphiques simplifiées

Dans la région de Lotbinière, la coupe **XS36** traverse le secteur des basses-terres appalachiennes dans sa portion la plus large, pour s'arrêter dans la remontée du socle rocheux marquant la fin du piémont. Sur cet axe, l'épaisseur de dépôts meubles est moins importante que dans le secteur de Saint-Lambert-de-Lévis, juste au nord-est, à la hauteur du delta de la rivière Chaudière. Étant donné la proximité du socle rocheux, on retrouve davantage de sédiments marins littoraux que de sédiments d'eau profonde, lesquels sont très rarement identifiés en forage. La première portion de la coupe (section gauche) montre une stratigraphie simple, où une mince couche de till montrant des signes de remaniement recouvre le roc. L'épaisseur des

dépôts meubles devient plus importante à la hauteur de Laurier-Station, où plus de 20 m de sédiments marins littoraux et pré-littoraux typiquement composés de silt sableux sont recoupés. Au sud-est, entre Saint-Flavien et Dosquet, l'épaisseur du till augmente considérablement (plus de 10 m par endroits), avant que le roc ne remonte par paliers. Des sédiments organiques sont présents dans les secteurs moins bien drainés et des deltas marins de faible ampleur sont croisés à la rivière du Chêne, où un peu moins de 10 m de dépôts sableux sont recoupés.

À Sainte-Marie, la coupe **XS25** recoupe la rivière Chaudière et son delta marin à la limite du piémont. À l'instar de ce que l'on observe sur la coupe **XS33** située plus au nord, la topographie du roc est ici beaucoup plus variable, et l'épaisseur des dépôts meubles le long de la section est généralement faible (moins d'un mètre), à l'exception de quelques fosses très locales. Dans ces zones, un peu plus de 20 m de matériel est présent dans la dépression rocheuse la plus profonde. Des sédiments sablo-graveleux sont superposés à une séquence deltaïque marine silteuse de faible épaisseur. Une unité sableuse discontinuée est présente à la base de la séquence et est coiffée d'un diamicton d'épaisseur variable. Les vallées situées de part et d'autre de la rivière Chaudière, plus hautes en élévation, sont parfois comblées par des sables et des silts d'origine glaciolacustre pouvant faire quelques mètres d'épaisseur, ou parfois simplement par du till.

Les coupes **XS26** et **XS31** illustrent bien le contexte de vallées appalachiennes. Dans la vallée très large de la Chaudière à la hauteur de Tring-Jonction (**coupe XS26**), les dépôts fluvioglaciaires sont omniprésents. On en retrouve plus de 20 m d'épaisseur par endroits. Les sédiments lacustres retrouvés à proximité sont plutôt hétérogènes, comme le suggèrent les faciès silteux, silto-sableux et sablo-graveleux tous observés en forage. À Disraeli (**coupe XS31**), le contexte est similaire. Des sédiments lacustres deltaïques sont observés en surface, alors que des faciès plus fins (lacustres d'eau profonde, ou formations quaternaires anciennes) remplissent les fonds de vallées rocheuses, qui font jusqu'à 30 m de profondeur.

La coupe **XS10**, située au nord-ouest de Sainte-Perpétue, recoupe un contexte particulier des hautes-terres appalachiennes. Les forages situés le long de la section semblent intercepter deux diamictons séparés par une unité de sédiments fins interprétée comme étant une formation quaternaire ancienne qui fait environ 5 m d'épaisseur, et même un peu plus par endroits. La portion centrale de la coupe illustre une transition vers un contexte de vallée plus typique comblée par des sédiments fluvioglaciaires grossiers. La portion sud (à droite sur la coupe) présente une vallée semblable, mais où le roc est beaucoup plus encaissé. La coupe **XS18**, localisée à Saint-Damien-de-Buckland, illustre un contexte similaire. Le segment traverse deux vallées encaissées séparées par une zone d'affleurement rocheux. Le dénivelé entre le sommet de l'affleurement central et l'élévation du roc dans le fond des vallées est de plus de 100 m. La vallée la plus au nord (à gauche sur la coupe) est large et arrondie, et montre des sédiments fins à la base, partiellement érodés sous des sédiments fluvioglaciaires. La vallée du sud est tout aussi encaissée, mais elle est beaucoup moins large et semble être remplie jusqu'à la base par des sédiments fluvioglaciaires (sable et gravier).

3.2.5 Couverture de dépôts meubles

La **carte 15A** (figure 3.6) présente l'épaisseur totale des dépôts meubles tandis que la **carte 16** (figure 3.7) montre la topographie du socle rocheux. La méthodologie utilisée pour préparer ces cartes est décrite en détail en annexe de ce rapport et résumée dans la présente section. 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, quelques données locales de levés géophysiques interprétés (sismique réflexion) et, de manière indirecte, des informations sur la distribution des sédiments du Quaternaire (**carte 12**). Différentes méthodes d'interpolation ont été utilisées pour estimer les épaisseurs dans chaque contexte géologique défini précédemment. Le choix de la méthode dépendait notamment de la distribution spatiale,

de la quantité et de la qualité des données, mais aussi du type de contexte considéré (basses-terres versus vallées et interfluves). 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 les paramètres d'interpolation. La topographie du roc est quant à elle obtenue en soustrayant l'épaisseur totale des dépôts meubles du modèle numérique altimétrique. 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 numérique altimétrique a préalablement été modifié pour combler les dépressions mineures dans la zone des basses-terres du St-Laurent.

La **carte 15A** (figure 3.6) présente l'épaisseur totale des dépôts meubles dont les valeurs maximales dépassent rarement 30 m. L'épaisseur moyenne de sédiments est de 4.7 m dans les basses-terres du St-Laurent qui est le seul contexte hydrogéologique où on retrouve de grandes étendues de dépôts meubles épais, particulièrement dans la partie ouest allant de Lévis à Sainte-Croix. Dans les basses-terres, d'épaisses accumulations de sédiments sont aussi associées aux rivières Boyer et du Sud. Ailleurs dans les basses-terres et dans les Appalaches, on ne retrouve généralement de dépôts épais qu'associés aux vallées appalachiennes, particulièrement celles des rivières Chaudière et Etchemin. L'épaisseur moyenne de sédiments dans le contexte des vallées appalachiennes est de 3.0 m. En dehors des vallées, les épaisseurs de sédiments sont généralement moindres que 5 m, et même souvent moindres que de 2.5 m. L'épaisseur moyenne de sédiments dans le contexte des hautes-terres appalachiennes est de 1.9 m. À cause des étendues restreintes de sédiments épais, la **carte 16** (figure 3.7) de la topographie du socle rocheux n'est pas très différente de celle de la topographie du sol (**cartes 1 et 3**). La **carte 16** montre tout de même des reliefs plus prononcés dans les vallées et dans la partie nord-ouest de la région d'étude.

En complément à l'estimation de l'épaisseur totale de dépôts meubles, l'épaisseur de regroupements de sédiments a aussi été estimée selon la méthode décrite précédemment. Les regroupements de sédiments considérés dépendent de la quantité et de la qualité des données disponibles, mais aussi de leur rôle potentiel au niveau de l'hydrogéologie régionale. Ces regroupements de sédiments comprennent : 1) les sédiments argileux (**carte 15B**, figure 3.8), 2) les sédiments indifférenciés sous-jacents aux sédiments argileux (ou l'épaisseur totale en l'absence de sédiments argileux) (**carte 15C**, figure 3.9) et 3) les sédiments indifférenciés sus-jacents aux sédiments argileux (**carte 15D**, figure 3.10). L'épaisseur de sédiments argileux a d'abord été estimée à partir des données de forages valides interceptant ces types de sédiments. Par la suite, la profondeur du toit du regroupement 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. Même s'il aurait été intéressant de distinguer les sédiments à grains grossiers des sédiments fins pour la portion sous-jacente aux sédiments argileux, la qualité de données disponibles ne permettait pas d'effectuer cette catégorisation de façon fiable.

Livrable PACES no. 15A : ÉPAISSEUR TOTALE DES DÉPÔTS MEUBLES

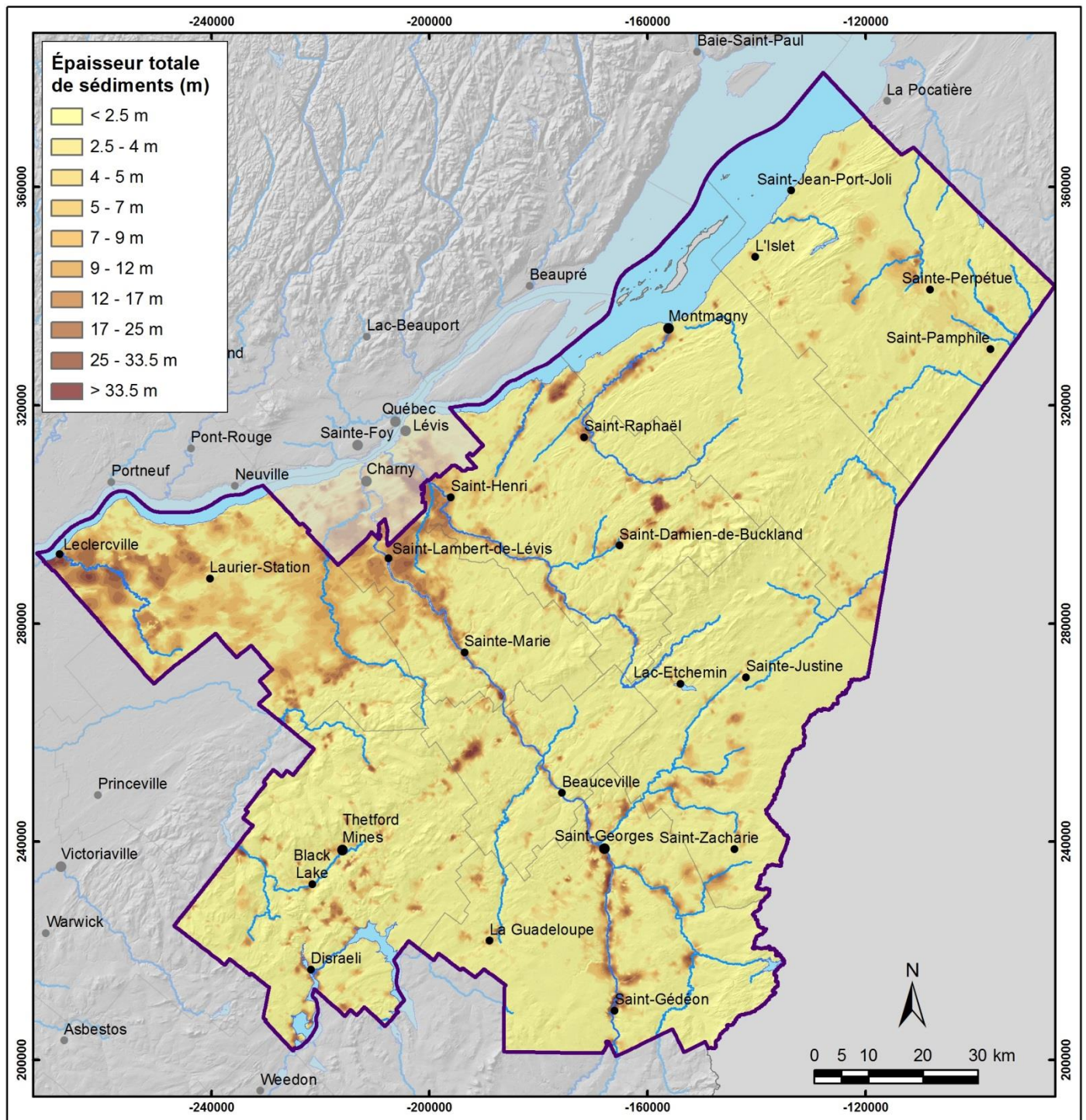


Figure 3.6 : Épaisseur totale des dépôts meubles (carte 15A)

Livrable PACES no. 16 : TOPOGRAPHIE DU ROC

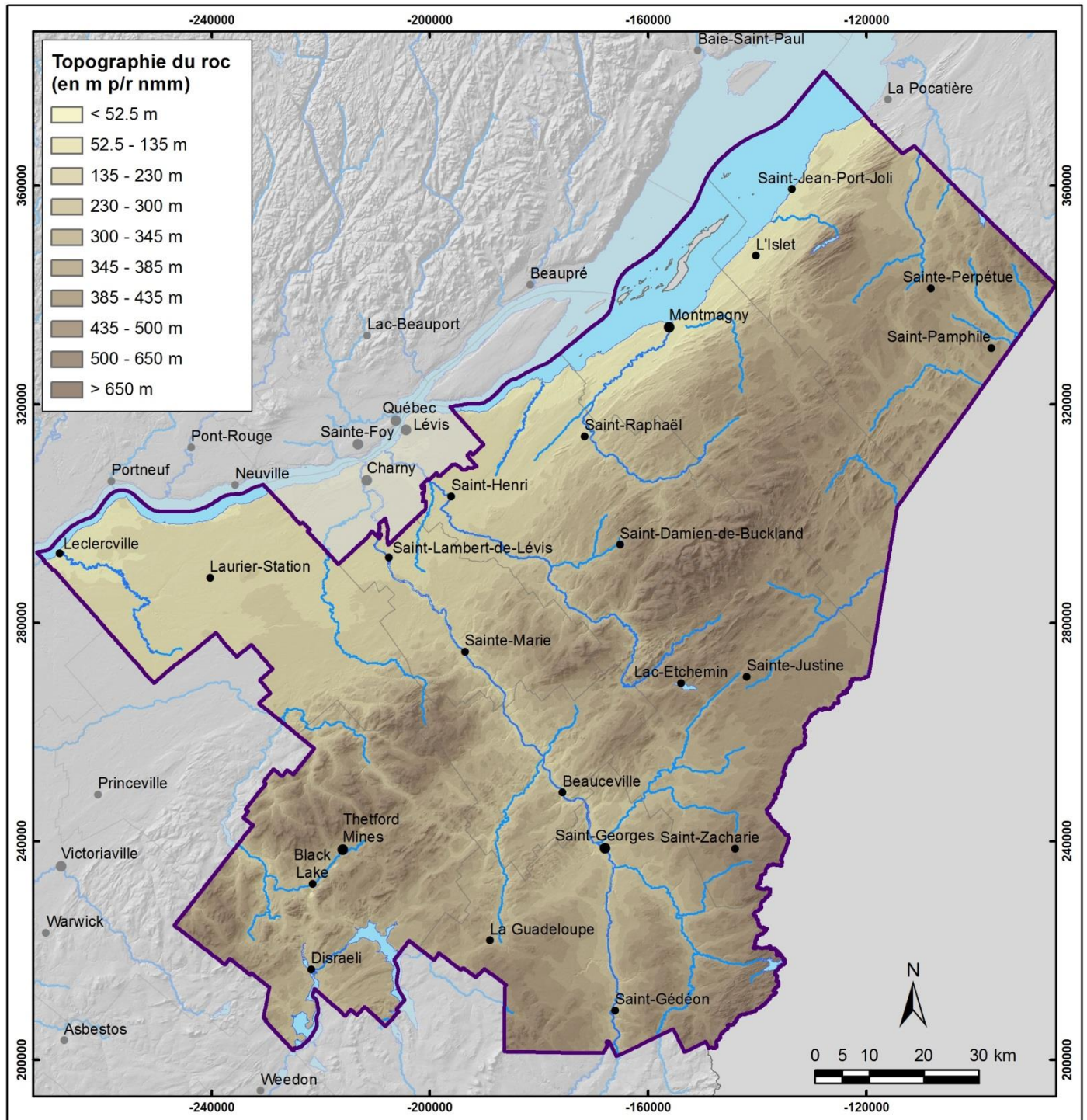


Figure 3.7 : Topographie du roc (carte 16)

Livrable PACES no. 15B : ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES – SÉDIMENTS ARGILEUX

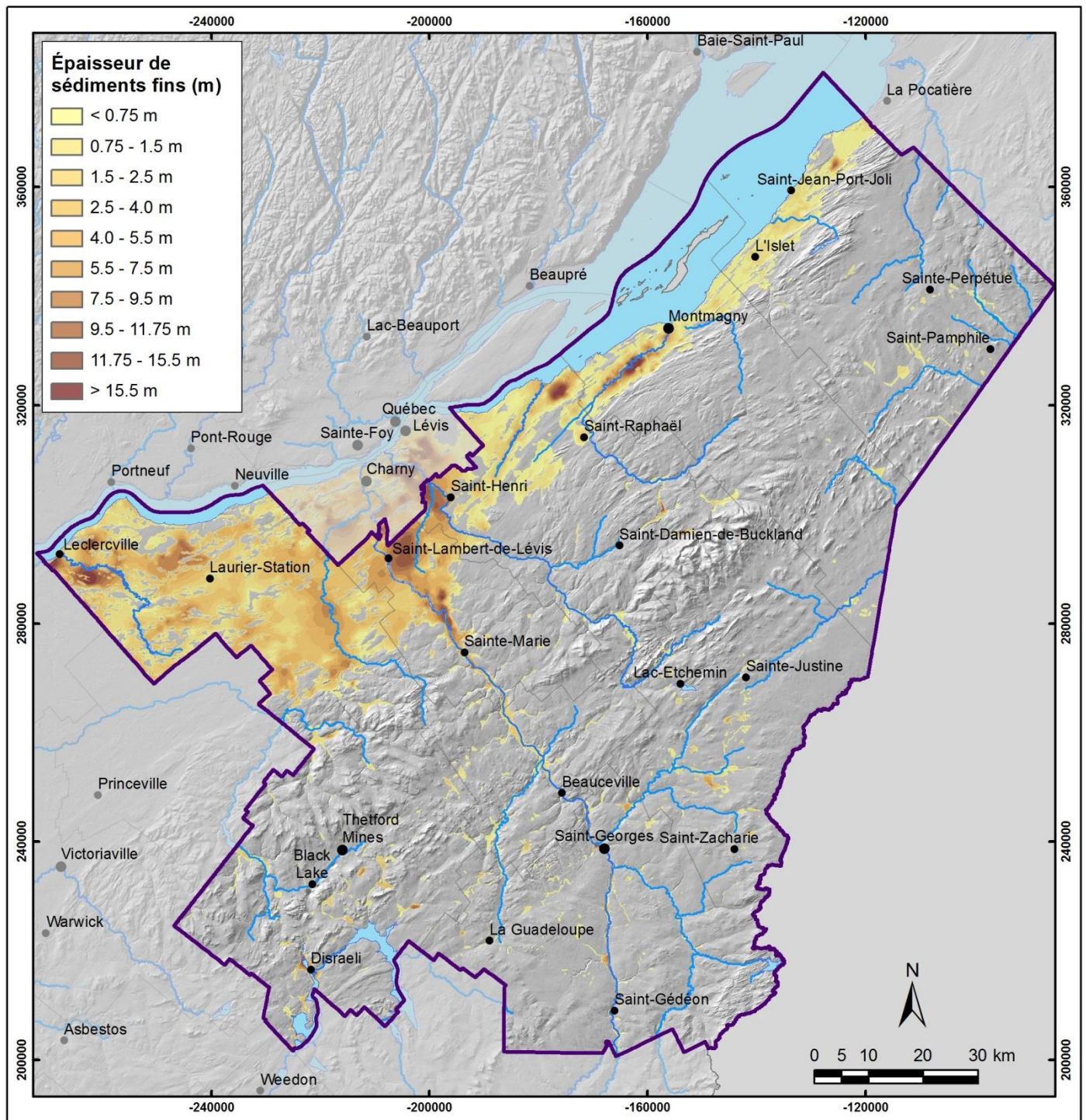


Figure 3.8 : Épaisseur des sédiments argileux (carte 15B)

Livrable PACES no. 15C : ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES – SÉDIMENTS SOUS-JACENTS À L'ARGILE

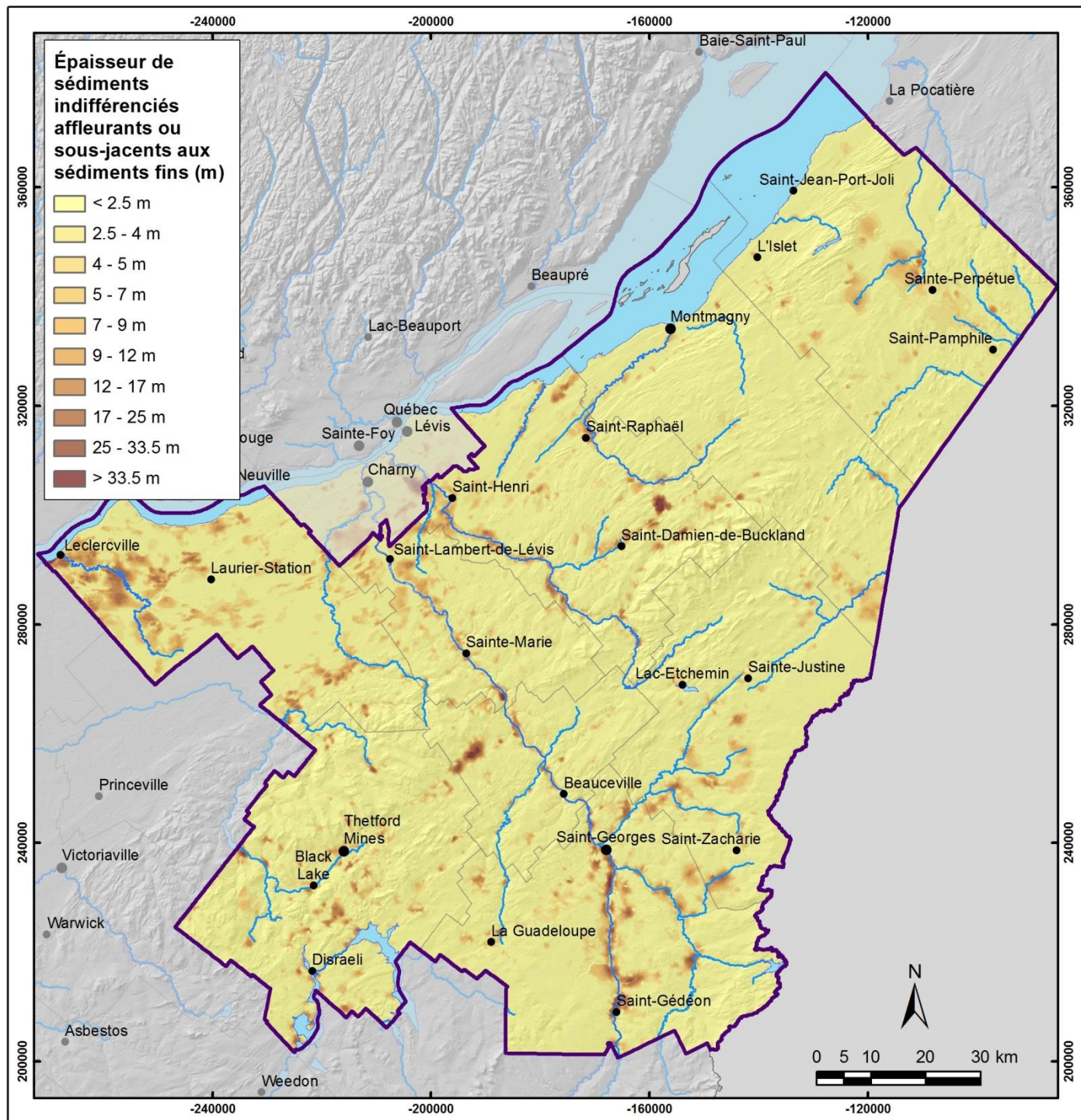


Figure 3.9 : Épaisseur des sédiments sous-jacents à l'argile (carte 15C)

Livrable PACES no. 15D : ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES – SÉDIMENTS SUS-JACENTS À L'ARGILE

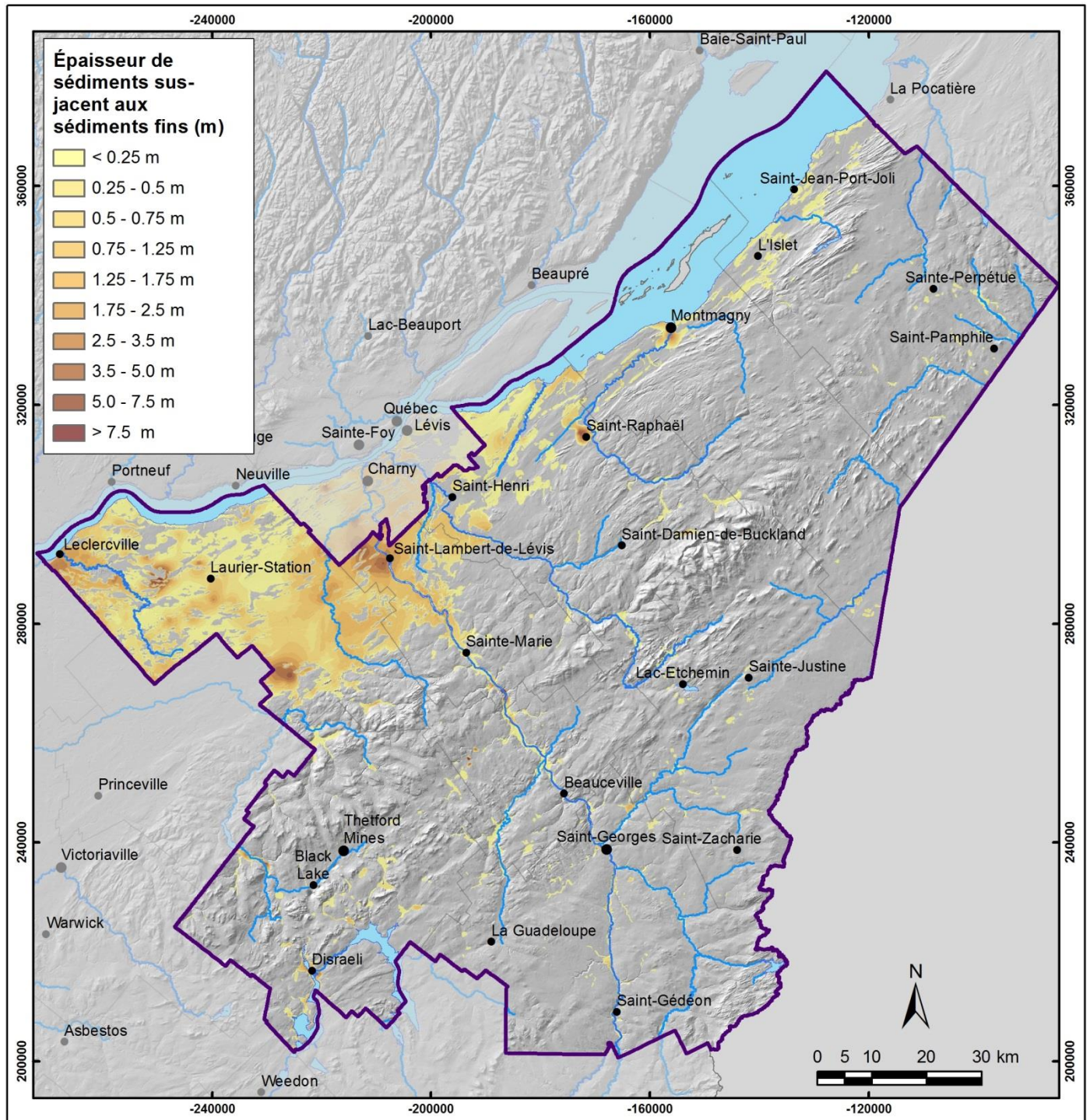


Figure 3.10 : Épaisseur des sédiments sus-jacents à l'argile (carte 15D)

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 fonction des sédiments cartographiés en surface (i.e. dans les zones de till mince ou d'affleurements rocheux).

La **carte 15B** (figure 3.8) montre la distribution des épaisseurs estimées de sédiments argileux, avec des valeurs maximales dépassant 15 m localement (Leclercville, Saint-Lambert-de-Lévis, vallées des rivières Boyer et du Sud). Les accumulations de sédiments argileux retrouvées ailleurs dans la région ont plutôt typiquement des épaisseurs de l'ordre de 5 à 10 m. Les accumulations de sédiments argileux sont plus étendues et plus épaisses dans le contexte des basses-terres du St-Laurent. Dans les Appalaches, on retrouve des sédiments fins surtout dans la vallée de la rivière Chaudière et seulement sur des portions limitées des vallées associées à d'autres cours d'eau. La présence de sédiments argileux est importante au niveau hydrogéologique, car leur faible perméabilité peut réduire considérablement l'infiltration et la circulation d'eau souterraine, diminuant ainsi la recharge potentielle aux aquifères sous-jacents. Les sédiments argileux jouent toutefois aussi un rôle de protection des aquifères de la contamination qui peut être émise à la surface. La distribution spatiale des sédiments argileux en Chaudière-Appalaches devrait ainsi limiter la recharge de l'aquifère rocheux régional dans les basses-terres (**carte 28B**, section 4.3) qui sera moins vulnérable (**carte 22A**, section 4.5), mais ces sédiments argileux n'offriront pas de protection à l'aquifère rocheux régional ailleurs dans la région. Enfin, les conditions de confinement de l'aquifère rocheux régional dépendent en grande partie de la présence des sédiments argileux (**carte 17**, section 3.3), ce qui sera discuté à la prochaine section.

La **carte 15C** (figure 3.9) montre les épaisseurs de sédiments sous-jacents aux sédiments fins argileux ou présents à la surface du sol aux endroits où il n'y a pas de sédiments fins. On retrouve de tels sédiments sur l'ensemble de la région d'étude, mais avec de faibles épaisseurs souvent inférieures à 2.5 m. Ces sédiments sont généralement des tills glaciaires. Certaines accumulations locales plus étendues se retrouvent dans les basses-terres du St-Laurent, surtout la partie ouest, associées aux vallées des rivières Chaudière et Etchemin, ainsi que plus localement sur certains tronçons de vallées appalachiennes. À l'intérieur des Appalaches, on retrouve aussi certaines zones avec des sédiments plus épais, notamment à l'est de Saint-Damien-de-Buckland et au nord de Sainte-Perpétue. Localement, ces sédiments peuvent présenter un potentiel aquifère, notamment lorsqu'ils sont d'origine fluvio-glaciaire et grossiers.

La **carte 15D** (figure 3.10) présente les épaisseurs de sédiments présents au-dessus des sédiments fins argileux. Ces sédiments, souvent sableux, ont des épaisseurs limitées et généralement inférieures à 5 m. On ne retrouve ces sédiments de façon continue que dans les basses-terres du St-Laurent, encore une fois surtout dans la partie ouest où se trouvent aussi les épaisseurs les plus importantes. De très minces couches de ces sédiments se trouvent aussi dans certaines vallées appalachiennes, surtout la vallée de la rivière Chaudière. La faible épaisseur de ces sédiments leur donne un potentiel aquifère très limité.

3.3 Conditions de confinement

La **carte 17** (figure 3.11) présente les conditions de confinement de l'aquifère rocheux régional. La méthodologie utilisée pour préparer cette carte est décrite en détail en annexe et résumée ici. Trois conditions ont été considérées : libres, semi-captives et captives. Ces conditions ont été définies à partir des épaisseurs estimées de sédiments présentées à la section 3.2.5, plus particulièrement des épaisseurs de sédiments argileux et de sédiments indifférenciés sous-jacents à l'argile. Les critères utilisés pour définir chaque condition sont résumés au tableau 3.2. Toutefois, étant donné le manque d'information sur la nature et la perméabilité des sédiments indifférenciés sous-jacents à l'argile, l'utilisation de l'épaisseur de ces sédiments comme critère de confinement entraîne une incertitude sur les conditions définies, particulièrement les conditions semi-captives 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 de mieux guider l'utilisation potentielle de cette carte.

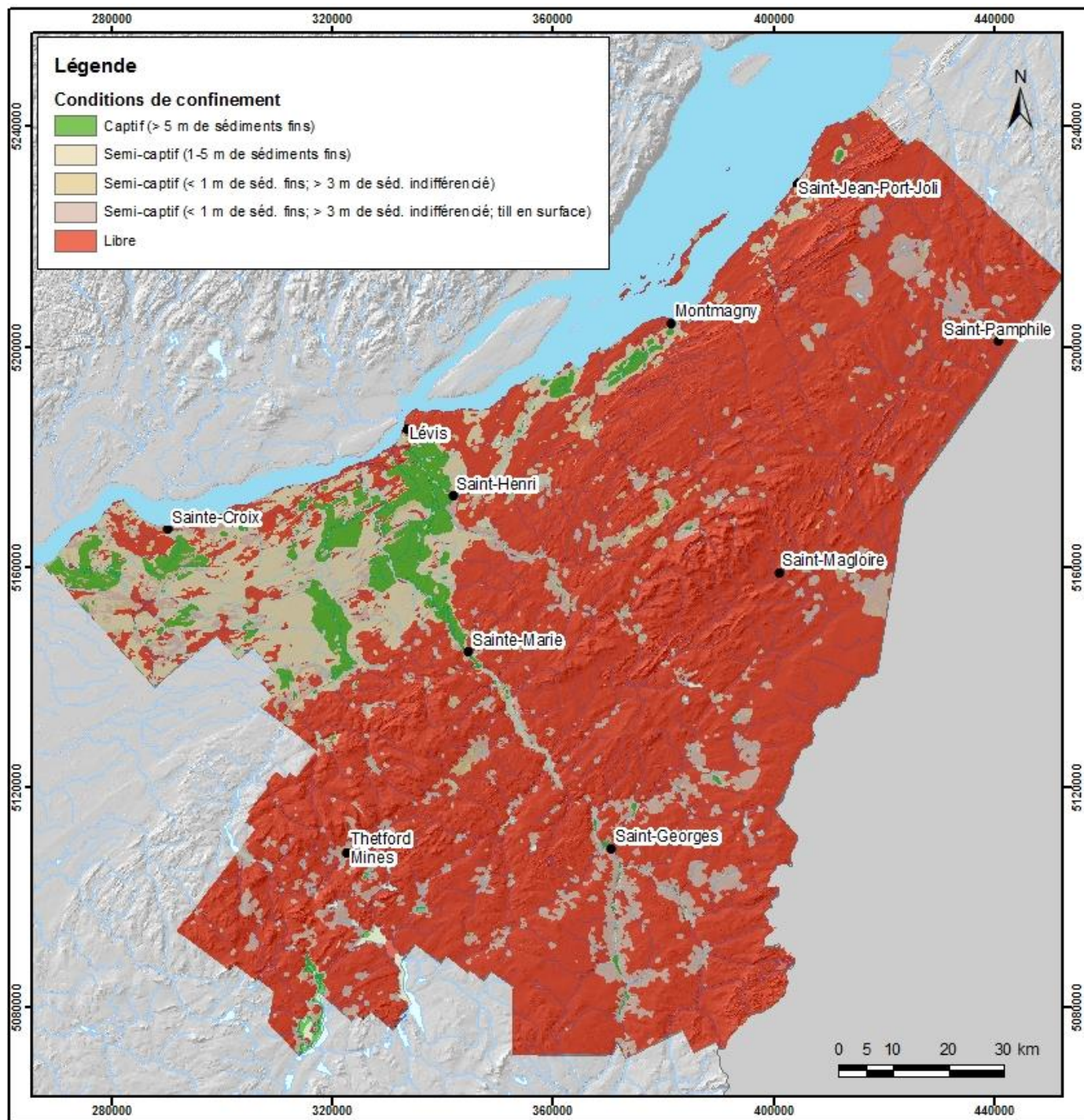
La **carte 17** (figure 3.11) permet de distinguer rapidement la distribution des différentes conditions de confinement. Les conditions captives (en vert) couvrent des étendues très restreintes de la zone d'étude (603 km² ; 3.8%), principalement dans la partie nord-ouest, entre la limite marine et le fleuve Saint-Laurent, ainsi que dans les portions avals des rivières Boyer et du Sud. Des zones très restreintes en conditions captives se retrouvent aussi très localement dans certaines vallées appalachiennes, particulièrement celle de la rivière Chaudière. La distribution spatiale des conditions semi-captives (trois tons de beige) est assez semblable à celle des conditions captives, mais les conditions semi-captives couvrent une plus grande étendue au nord-ouest de la limite marine et particulièrement à l'intérieur des vallées appalachiennes, pour une étendue totale de 3158 km² (20.1%) de la zone d'étude. Ce sont les conditions libres qui prévalent sur la très grande majorité de la région d'étude (11 982 km² ; 76.1%). En dehors de la limite marine, on retrouve des conditions libres sur pratiquement tout le territoire, excepté dans les vallées appalachiennes. Les conditions libres dominent aussi la partie est des basses-terres du St-Laurent, entre Lévis et St-Jean-Port-Joli, où les accumulations de sédiments sont restreintes, particulièrement les sédiments fins. On retrouve même localement des conditions libres dans la partie nord-ouest de la zone d'étude où les conditions semi-captives et captives dominent généralement.

Tableau 3.2 : 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

Des essais ont été faits pour vérifier l'effet de l'utilisation d'un seuil différent de 3 m d'épaisseur de sédiments indifférenciés pour définir les conditions semi-captives. Ainsi, un seuil de 1.5 m fait en sorte d'étendre les conditions semi-captives, particulièrement dans les Appalaches en dehors des vallées. Il a été jugé que le seuil de 3 m d'épaisseur permettait une meilleure représentation des conditions de confinement et que des conditions libres étaient susceptibles de prévaloir dans les Appalaches, compte tenu 1) que les épaisseurs significatives de sédiments, particulièrement les sédiments fins, sont restreintes aux vallées appalachiennes, 2) de l'imprécision dans l'estimation des épaisseurs qui est plus grande qu'un seuil de 1.5 m d'épaisseur, et que 3) la géochimie de l'eau souterraine indique la prédominance d'eaux jeunes typiques d'une recharge récente pour pratiquement l'ensemble des Appalaches (section 4.6 ; figure 4.15). Il est toutefois possible que des conditions semi-captives, plutôt que libres, prévalent localement dans les Appalaches et des travaux locaux sont requis pour y définir les conditions de confinement. A noter aussi que les conditions de confinement applicables aux aquifères granulaires locaux n'ont pas été définies et peuvent être différentes que celles déterminées pour l'aquifère régional de roc fracturé.

Livrable PACES no. 17 : CONDITIONS DE CONFINEMENT



3.4 Contextes hydrogéologiques

La **carte 18** (figure 3.12) présente les grands contextes hydrogéologiques ainsi que les séquences hydrostratigraphiques typiques de dépôts meubles retrouvées dans ces contextes. La méthodologie utilisée pour préparer cette carte est décrite en détail en annexe de ce rapport et elle est résumée ici. Les contextes hydrogéologiques régionaux ont été définis sur la base des contextes géomorphologiques rencontrés dans la région ainsi que des épaisseurs de sédiments. Ainsi, les trois contextes hydrogéologiques suivants ont été définis : 1) les **basses-terres du St-Laurent**, 2) les **vallées appalachiennes** et 3) les **hautes-terres appalachiennes**. Les basses-terres du St-Laurent forment une bande de 10 à 30 km de largeur entre la bordure du fleuve Saint-Laurent et la limite marine (180 m NMM). Ce contexte constitue un bas plateau à faible relief entre des élévations allant de 10 m NMM, près du fleuve, jusqu'à 90 m NMM à la bordure des Appalaches. L'épaisseur totale de sédiments va de nulle jusqu'à plus de 30 m. De la surface au roc, ces sédiments forment une séquence typique de sable mince (parfois absent) sur de l'argile, parfois épaisse (10-15 m), reposant sur du till ou directement sur le roc. Les vallées appalachiennes sont reliées aux principaux cours d'eau qui incisent le relief montagneux à des élévations généralement inférieures à 350 m NMM. On y retrouve des séquences de sédiments semblables à celles dans les basses-terres, à l'exception qu'on y trouve par endroits des sédiments anciens et que le roc à la base des vallées peut être altéré. De plus, on peut y retrouver des intervalles de sédiments granulaires plus grossiers, soit en profondeur ou en bordure des vallées. En dehors des vallées, les hautes-terres appalachiennes occupent la majorité des Appalaches où elles montrent des topographies de collines ou de montagnes, pouvant atteindre une élévation de 900 m NMM. Les hautes-terres sont typiquement recouvertes d'une mince (< 5 m) couche de till relativement perméable sur le roc. On y retrouve aussi des accumulations localement plus importantes de sédiments fluvio-glaciaires.

Les séquences hydrostratigraphiques typiques montrées sur la **carte 18** (figure 3.12) ont 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 till sur roc. Ces séquences typiques ont été établies pour servir d'indicateurs régionaux des conditions pouvant être rencontrées dans un secteur ; elles ne peuvent toutefois pas remplacer des études locales. Les séquences sont distinctes dans les différents contextes hydrogéologiques (**carte 18**). La distribution de ces séquences sur la **carte 18** indique toutefois une prédominance de la séquence sédiments indifférenciés sur roc dans tous les contextes. Cette carte 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 (**carte 12**) et les épaisseurs des sédiments (**cartes 15A, 15B, 15C et 15D**).

Livrable PACES no. 18 : CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES

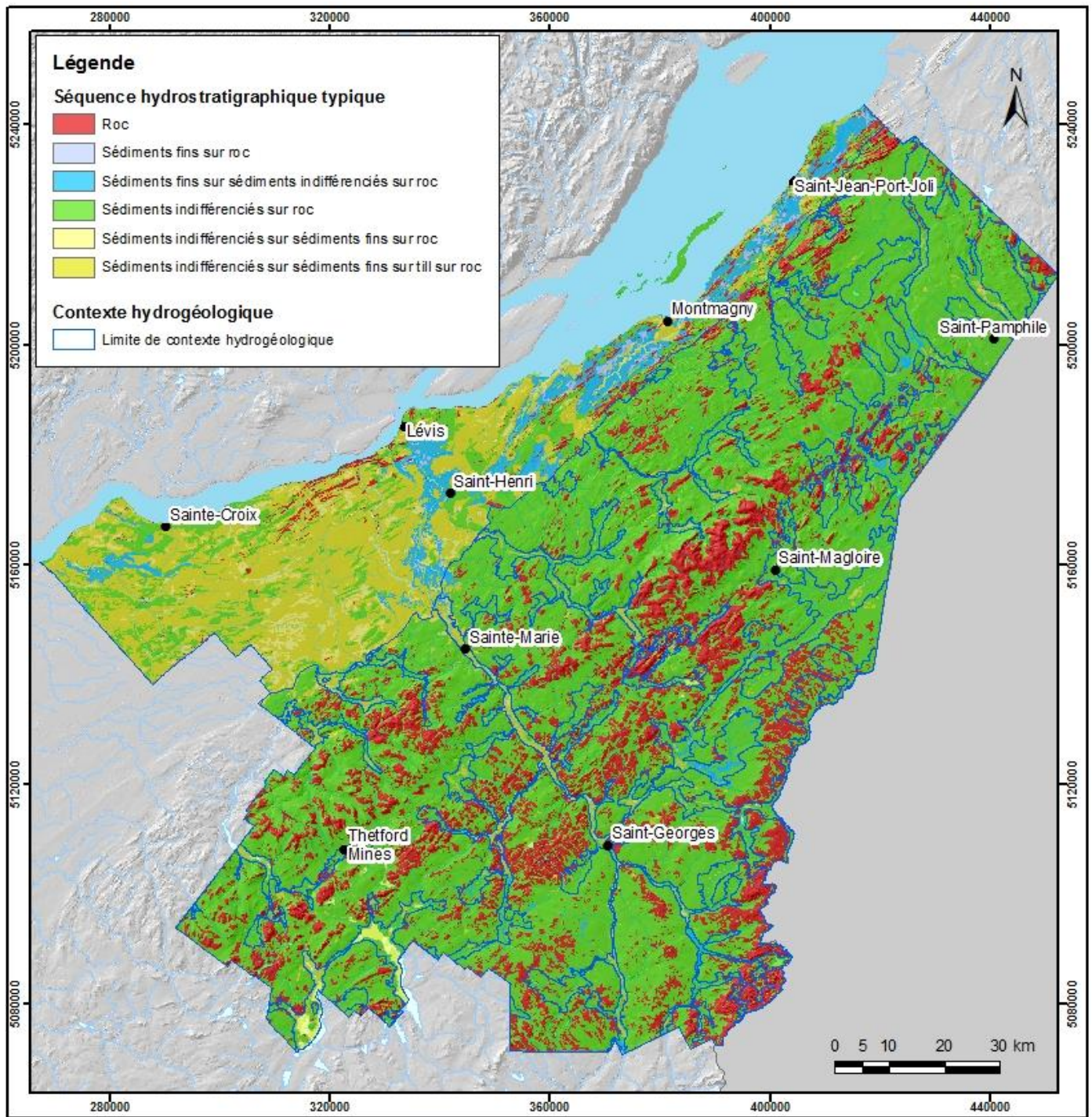


Figure 3.12 : Contextes hydrogéologiques avec séquences hydrostratigraphiques (**carte 18**)

4 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

4.1 Propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques sont des caractéristiques d'un aquifère qui permettent de représenter quantitativement l'écoulement de l'eau souterraine. C'est généralement la conductivité hydraulique (K ; m/s) ou la transmissivité ($T = K \cdot b$, où b est l'épaisseur saturée de l'aquifère (m); m²/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. Une autre propriété, le coefficient d'emmagasinement (S ; m³/m²/m, sans dimension), peut être estimée conjointement mais, à cause de son influence moindre sur l'évolution du rabattement (en particulier aux temps longs), son estimation est souvent négligée ou infaisable pour certains types d'essais hydrauliques. Enfin, la capacité spécifique (CS , Q/s; m²/s) est le rapport entre le débit Q (m³/s) de pompage constant d'un puits et le rabattement s (m) après une certaine durée de pompage t_p . La CS est une propriété 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

Devant la taille imposante de la base de données (BD) du projet de la Chaudière-Appalaches, il a été décidé de traiter les propriétés hydrauliques comme des variables statistiques continues, après avoir préparé un sous-ensemble de cette BD au moyen de scripts développés dans R (R Core Team, 2014). La préparation de cette nouvelle BD dédiée à l'évaluation des propriétés hydrauliques (appelée BDPH) est une étape essentielle à l'obtention de résultats de qualité suffisante et comprend, globalement, la fusion de champs sélectionnés parmi les nombreuses tables de la BD du projet de la Chaudière-Appalaches en une grande table (où chaque ligne correspond à un objet), puis l'élimination des objets non valides.

Par la nature semi-automatisée des scripts conçus, on s'assure que toute mise à jour nécessaire de la BD de départ puisse être rapidement intégrée à la nouvelle BDPH. Les champs jugés pertinents pour l'étude des propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux sont :

- objet_id : identifiant de l'objet (numérique entier)
- loc_x, loc_y : coordonnées spatiales projetées (métriques) de l'objet
- prof_forage : profondeur totale du forage (m)
- prof_roc : profondeur estimée du toit du roc à l'endroit du puits (m)
- puits_auroc : champ booléen distinguant les puits qui se terminent dans les dépôts vs dans le roc
- diam_tubage_optim : diamètre du forage, converti en pouces
- long_tubage_optim : longueur du tubage plein, au-delà le puits est considéré ouvert à l'aquifère
- ctx_NomComplectCA : domaine géologique (texte)
- essai_debit : débit de pompage pendant l'essai hydraulique (L/min)
- essai_duree : durée de l'essai hydraulique (h)
- ne_profstat_moy : profondeur du niveau statique présumée représentative du niveau local de la nappe dans le puits juste avant le début de l'essai hydraulique (m)
- essai_prof_ndynam : profondeur du niveau dynamique présumée représentative du niveau local de la nappe à la fin de l'essai avec pompage à débit constant pendant t_p (m)
- geol_formation : nom représentatif de la géologie locale, basé sur la formation géologique ou, si non disponible, le lithodème, ou sinon le groupe géologique (texte)
- obj_src_donnee : nom de la BD d'où proviennent les données sur l'objet (texte)
- cc_captiv_optim : condition de confinement au puits (texte parmi Libre, Captif ou Semi-captif)

- e_interp_T : valeur estimée de T par l'interpréteur de l'essai hydraulique rapporté (m^2/s)
- e_interp_K : valeur estimée de K par l'interpréteur de l'essai hydraulique rapporté (m/s)
- e_interp_S : valeur estimée de S par l'interpréteur de l'essai hydraulique rapporté (-)
- e_interp_CS : capacité spécifique rapportée (m^2/s)

La grande table ainsi obtenue, appelée BDPH dans le texte de cette section, comprend 33 champs. Toutefois, plusieurs de ces champs sont sans donnée pour de nombreux objets. À titre d'exemple, parmi les 19 927 objets constituant la BDPH de départ, seuls 136 ont une valeur estimée de T , K ou S directement disponible. C'est pour compenser la rareté des estimations « directes » de ces propriétés dans la BDPH qu'est utilisée, en supplément, la capacité spécifique (CS) comme estimation « indirecte » de T . La CS étant disponible pour plus de 10 000 objets, le jeu de données hydrauliques directes et indirectes ainsi défini contient un nombre de données adéquat pour réaliser diverses analyses statistiques.

4.1.1.2 Analyses statistiques

Les analyses statistiques des variables d'intérêt (T , K , S , ...) sont réalisées en appelant des scripts comportant des options permettant 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, de la limiter à un intervalle de profondeur sélectionné, de filtrer préalablement la table selon un choix de critères modulables (disponibilité de tous les champs requis pour l'estimation de T d'après la CS , puits au roc, diamètre du puits réaliste, ...), etc. 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 BD) et parce que l'effet des différentes opérations sur les résultats statistiques peut être inspecté à chaque étape.

À la différence du projet régional précédent (PACES Montérégie Est; [Carrier et al., 2013a](#)), il a été décidé d'analyser autant les valeurs de T que les valeurs de K pour ce projet, parce 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 néanmoins être calculée à partir de T et d'une certaine connaissance de la géométrie du puits et de l'aquifère. Les deux propriétés ayant visiblement une distribution log-normale, leurs valeurs sont d'abord transformées par le logarithme en base 10 (\log_{10}) avant d'être analysées statistiquement. Néanmoins, pour faciliter la lecture, les symboles simples (T ou K) sont aussi utilisés pour référer à la variable d'analyse (transformée). Nous en profitons pour mentionner, à titre de rappel, qu'étant donné la lognormalité des propriétés de K , T et S , c'est la moyenne géométrique (ou la médiane des valeurs log-transformées) qui doit être utilisée pour obtenir une estimation de la propriété moyenne, et non la moyenne arithmétique.

4.1.1.3 Estimation de l'épaisseur saturée de l'aquifère (b)

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 toutefois un paramètre difficile à estimer avec précision; il peut néanmoins être approximé, en pratique. Une façon simple est de considérer l'intervalle ouvert à l'aquifère dans le puits sur toute sa longueur (*open section length*) (Δz_{ouv}). C'est cette méthode qui a été utilisée pour calculer b dans ce projet, différente de la méthode utilisée dans le PACES Montérégie Est, où b était limitée par une valeur plafond arbitraire de 5 m ([Carrier et al., 2013a](#)). Par conséquent, les valeurs de K estimées à partir des valeurs de T pour les puits à grand intervalle d'ouverture au roc sont significativement plus faibles dans ce projet (Chaudière-Appalaches : CA) que dans le projet précédent (Montérégie Est : ME), pour une même valeur de T et une longueur d'intervalle égale. À titre d'exemple, de $T = 1 \times 10^{-5} m^2/s$ et $\Delta z_{ouv} = 50 m$, on a $b_{CA} = \Delta z_{ouv}$ contre $b_{ME} = \min(\Delta z_{ouv}, 5) = 5 m$, donc de $K \approx T / b$, on obtient $K_{CA} \approx 2 \times 10^{-7} m/s$, contre $K_{ME} \approx 2 \times 10^{-6} m/s$. Le changement méthodologique introduite pour ce projet induit donc une réduction d'environ 1 ordre de grandeur les estimations de K . En comparant les résultats, il est donc normal d'observer une différence du même ordre entre les statistiques de K du projet Chaudière-Appalaches présentés ici et celles du précédent projet en Montérégie Est ([Carrier et al., 2013a](#)).

4.1.1.4 Estimation de la conductivité hydraulique (K)

La BDPH contient peu de données sur des valeurs directes de T ou K pour l'aquifère rocheux (~80) et encore moins pour les aquifères granulaires (~50), alors que les données de CS sont très abondantes (~10 140), puisque le calcul de la CS peut être approximé simplement à partir du débit de pompage, du niveau statique et du niveau dynamique généralement notés dans la BD. Ce sont donc les estimations indirectes de T , via la transformation de la CS , qui constituent la grande majorité des données analysées pour décrire statistiquement T , puis K . La transformation de la capacité spécifique CS en transmissivité T , puis en conductivité hydraulique K , est faite comme suit (Cooper et Jacob, 1946; Theis et al., 1963) :

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

Les informations requises pour le calcul de T sont donc la durée du pompage (t_p ; s), le rayon du puits (r_w ; m), le coefficient d'emmagasinement (S ; sans unité) et l'épaisseur saturée effective (b ; m). Les deux premiers paramètres (t_p et r_w) sont directement disponibles dans la BDPH (à partir des champs `essai_duree` et `diam_tubage_optim`, respectivement), 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 de l'aquifère : en condition libre, $S \sim 1 \times 10^{-2}$; en condition semi-captive, $S \sim 5 \times 10^{-3}$; et en condition captive, $S \sim 5 \times 10^{-5}$. L'estimation de b a été décrite dans la sous-section 4.1.1.3 précédente.

Une fois que toutes les variables requises pour l'équation 4.1 sont prêtes, la transformation est exécutée par lots (*batch*). Pour chaque objet, c'est d'abord la valeur de T qui est trouvée par une méthode itérative (méthode de Newton-Rhaphson modifiée). La valeur de K est ensuite calculée par $K \approx T / b$. Il est intéressant de noter que, malgré la relative complexité de la formule 4.1, le calcul de T est essentiellement contrôlé par CS , si bien qu'en première approximation, $T \approx CS$ (voir la démonstration à la section 5.1.2).

Bien que les estimations indirectes de T (et K) soient de loin les plus abondantes, ce ne sont pas ces valeurs qui sont prioritairement choisies pour les analyses. Voici, en ordre de priorité décroissant, les variables qui peuvent servir d'estimation de K , pour chaque objet :

1. estimation directe $K(T) \approx T_{\text{essai}} / b$ (la valeur du champ `e_interp_T` doit être non nulle)
2. estimation indirecte $K(CS) \approx T(CS) / b$ via la transformation de l'équation 4.1 (toutes les variables impliquées dans cette transformation doivent avoir pu être évaluées pour l'objet)
3. estimation directe $K = K_{\text{essai}}$ (la valeur du champ `e_interp_K` doit être non nulle)

Les valeurs de T_{essai} provenant du champ `e_interp_T` sont supposées les plus fiables, car T est, avec S , le principal paramètre à ajuster lors de l'interprétation d'essais de pompage, qui fait appel le plus souvent à la solution de Theis ou à son approximation via la solution de Cooper Jacob. Les valeurs de K_{essai} sont jugées moins pertinentes, car elles sont typiquement rapportées dans le cas d'essais hydrauliques faits sur de petits volumes d'influence (chocs hydrauliques, essais avec obturateurs [*packers*], ...) représentant une échelle plus locale encore que T_{essai} . La BDPH n'a toutefois pas permis de vérifier si les données de K_{essai} étaient effectivement associées à ces types d'essais car cette information était le plus souvent manquante. C'est pourquoi les valeurs issues de la transformation $T(CS)$ sont préférées aux valeurs issues de K_{essai} , malgré la nature indirecte de cette estimation.

4.1.1.5 Autres variables d'analyse

D'autres variables d'analyse peuvent être préparées à partir de la BDPH en suivant une méthode similaire. Pour analyser T , par exemple, les variables utilisées comme estimations de T sont, en ordre de priorité décroissant : 1) T_{essai} , 2) $T(CS)$, 3) $T(K) \approx K_{\text{essai}} \times b$. Dans le cadre des analyses présentées dans ce rapport, seuls K et T impliquent plusieurs variables concurrentes d'estimation ; les statistiques décrivant d'autres paramètres n'impliquent qu'un champ de valeurs à la fois.

4.1.1.6 Hypothèses d'analyse

On sait que les milieux poreux ou fracturés sont tous hétérogènes, à divers degrés. Ainsi, les estimations d'une propriété hydraulique obtenues des essais hydrauliques ne constituent qu'un échantillon des valeurs que peut prendre la propriété hydraulique dans le milieu réel. Les interprétations qui suivent supposent donc que les échantillons disponibles dans la BDPH sont suffisamment représentatifs et non biaisés. Les résultats présentés à la section 5.1.2 montrent bien que les puits municipaux n'offrent pas des échantillons représentatifs des propriétés hydrauliques des aquifères de la région. Par contre, considérant le nombre important de données disponibles sur les propriétés hydrauliques dans la BDPH, soit plus de 9 000 valeurs pour l'aquifère rocheux et plus de 270 valeurs pour les aquifères granulaires, on peut présumer que les statistiques dérivées de BDPH sont représentatives du système aquifère de la Chaudière-Appalaches.

4.1.1.7 Informations utiles à l'interprétation des graphiques produits lors des analyses

La plupart des figures utilisées pour illustrer les résultats des analyses statistiques effectuées sur les données de la BDPH sont d'un type relativement peu connu qui mérite quelques explications. Semblables aux diagrammes en boîtes et moustaches (*box and whisker plots*), les diagrammes en violons exploitent avantageusement les fonctionnalités du logiciel d'analyse pour représenter de façon continue la densité de probabilité empirique de chaque sous-ensemble (groupe), donnant aux boîtes leur apparence de « violons ». La figure 4.1, avec le texte qui suit, permet de se familiariser avec ce type de diagramme.

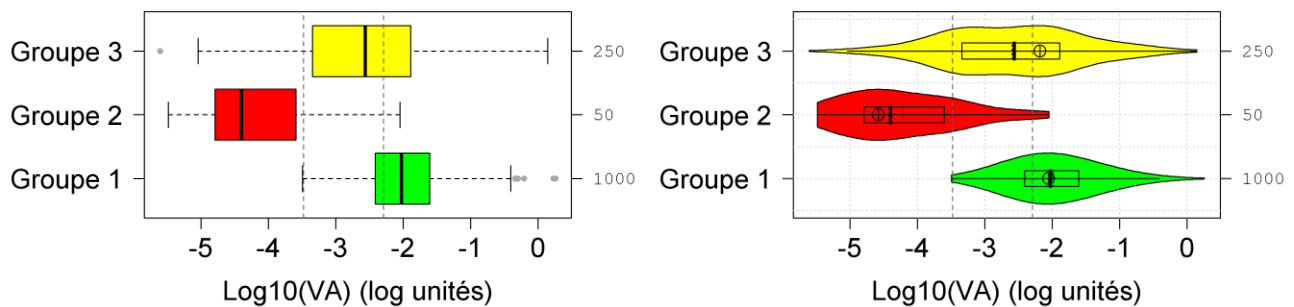


Figure 4.1 : Diagrammes en boîtes et moustaches (gauche) et diagrammes en violons (droite)

À la figure 4.1, comme dans les autres diagrammes en violons présentés par la suite, la largeur verticale du violon varie proportionnellement au nombre de données, tandis que l'extension horizontale du violon se limite à l'étendue des données du groupe. Le rectangle à contour noir, à l'intérieur du violon, délimite l'étendue interquartile (c'est-à-dire des quartiles 1 à 3) des valeurs du groupe ; le trait épais à l'intérieur du rectangle positionne la médiane, tandis que le trait pointillé mince (parfois invisible, quand il se superpose au trait épais) positionne la moyenne arithmétique des valeurs du groupe. Cette moyenne arithmétique est évaluée avec les valeurs transformées par le logarithmique en base 10, comme l'indique le titre de l'axe des abscisses ; c'est donc l'équivalent de la moyenne géométrique des valeurs non transformées. Le cercle positionne le mode principal trouvé au maximum de la densité de probabilité empirique et, enfin, le trait horizontal reflète la moustache du *box plot*, qui délimite l'étendue des valeurs « non extrêmes » (approximativement du 1^{er} au 99^e centile, si la distribution est (log-)normale). De plus, lorsque le nombre de groupes est suffisant, les violons sont remplis d'une couleur rouge, jaune ou verte, selon que leur médiane est faible, intermédiaire ou élevée par rapport à l'ensemble des médianes illustrées dans la figure ; les lignes verticales pointillées, qui indiquent l'étendue interquartile évaluée avec l'ensemble des médianes des groupes, délimitent la classe dite « intermédiaire ». Ces couleurs sont proposés pour faciliter la comparaison visuelle entre les groupes. Ainsi, à la figure 4.1, en comparant les informations données par les diagrammes en boîtes et moustaches à celles fournies par les diagrammes en violons, on constate que ces derniers représentent bien mieux la nature des distributions de valeurs.

4.1.2 Résultats de l'analyse des propriétés hydrauliques

4.1.2.1 Statistiques sur la conductivité hydraulique et la transmissivité

Les diagrammes en violons de la figure 4.2 présentent les distributions statistiques du logarithme en base 10 des valeurs des estimations de la conductivité hydraulique ($\log_{10} K$), en distinguant les valeurs associées aux puits terminés dans le roc (9 061 puits) par rapport aux puits installés dans dépôts meubles (274 puits). Ce graphique suggère qu'il y a un écart moyen d'environ 2 à 3 ordres de grandeur entre les K des aquifères granulaires et les K de l'aquifère rocheux régional (selon qu'on compare les médianes ou les modes principaux). De plus, le diagramme suggère une distribution bimodale pour les K des aquifères granulaires, avec un premier mode à environ 2×10^{-4} m/s, puis un second à environ 1×10^{-6} m/s. Des analyses plus poussées des informations sur les unités quaternaires traversées par les puits seraient toutefois nécessaires pour déterminer si chaque mode correspond à un contexte quaternaire distinct.

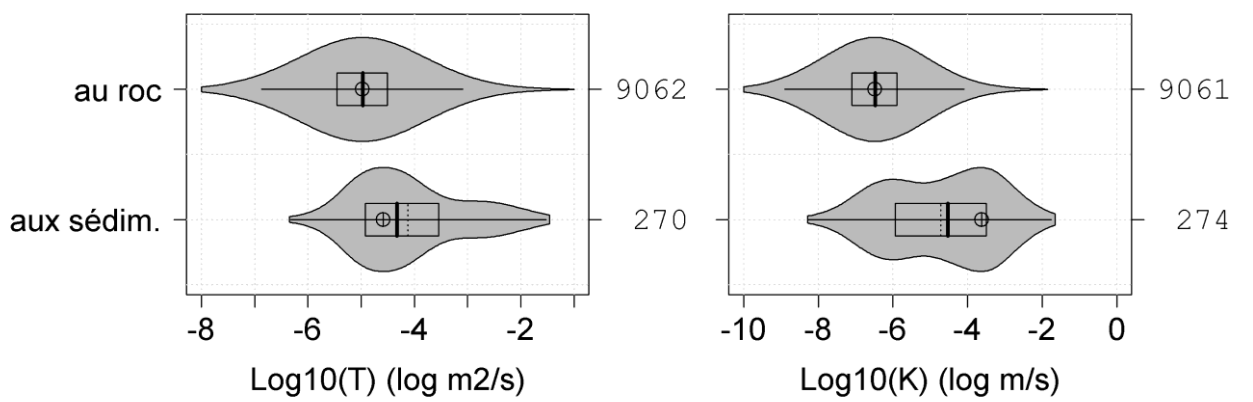
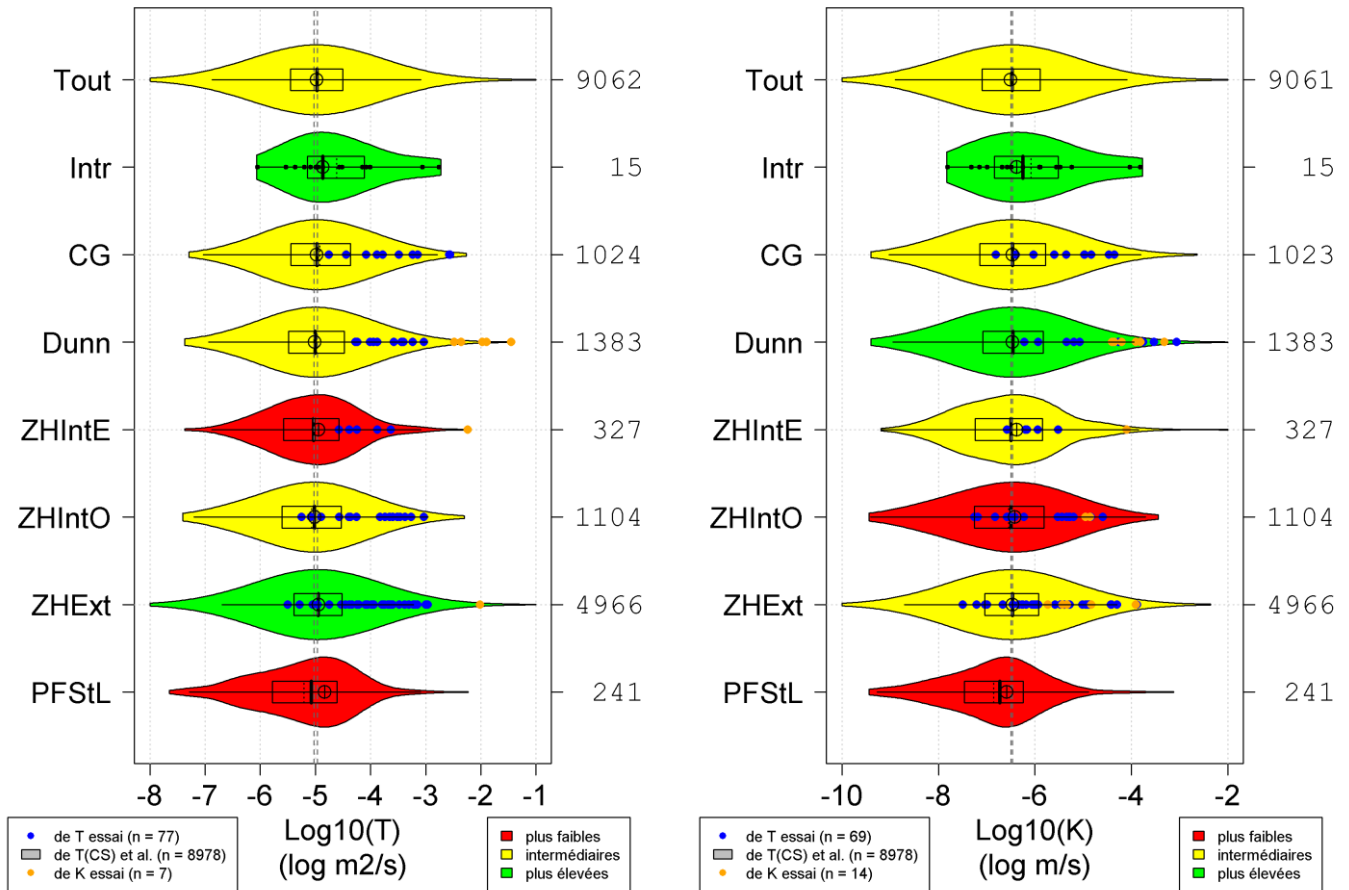


Figure 4.2 : Distributions des valeurs de T et K pour les puits dans les aquifères rocheux et granulaires

La figure 4.3 présente à nouveau la distribution statistique du \log_{10} des valeurs de T et de K à l'aide de diagrammes en violons, mais cette fois les valeurs sont regroupées par contexte géologique des puits terminés dans le roc. Ces diagrammes montrent une légère variabilité de la propriété, que ce soit K ou T , entre contextes hydrogéologiques, avec une médiane globale de -6.5 (soit environ 3×10^{-7} m/s) pour K et de -5 (soit environ 1×10^{-5} m²/s) pour T . De plus, la courbure en cloche des violons vérifie l'hypothèse de lognormalité énoncée en 4.1.1.2 pour ces deux propriétés hydrauliques : en d'autres mots, leurs valeurs, une fois transformées par le \log_{10} , appartiennent à une distribution pratiquement normale. Les distributions statistiques de K ou T , par groupe ou globales, peuvent donc être décrites avec deux paramètres : l'espérance μ et l'écart-type σ . Typiquement, la moyenne arithmétique est utilisée pour évaluer μ , mais dans cette étude régionale la médiane ou le mode sont préférables à la moyenne pour évaluer μ , car moins sensible aux valeurs extrêmes. À titre informatif, les écart-types globaux sont : $\sigma_K \approx 1.0$ m/s ; $\sigma_T \approx 0.8$ m²/s.

Par ailleurs, les points de couleur superposés aux violons montrent que les valeurs provenant des rapports de consultants (champs e_interp_T : « de T essai » et e_interp_K : « de K essai » de la BDPH ; voir la légende au coin inférieur gauche de chaque diagramme) sont majoritairement supérieures aux valeurs médianes, le biais étant plus grand encore pour les valeurs « de K essai ». Une explication serait que les consultants ont tendance à présenter surtout les résultats des essais hydrauliques fructueux dans les rapports, les autres essais n'étant alors rapportés que dans le SIH. Le niveau de détail très limité des informations sur les essais hydrauliques ne permet toutefois pas d'analyser les différences entre les estimations de K_{essai} et de T_{essai} davantage (voir la section 5.1.2 pour T et K des puits municipaux).



Remarque : les abréviations utilisées pour les contextes sont définies dans la légende de la figure suivante (4.4)

Figure 4.3 : Diagrammes en violons résumant les distributions statistiques de la transmissivité T (m^2/s) et de la conductivité hydraulique K (m/s) pour chaque contexte géologique de la région d'étude

Tableau 4.1 : Conductivité hydraulique K (m/s) du roc par contexte géologique (livrable 21)

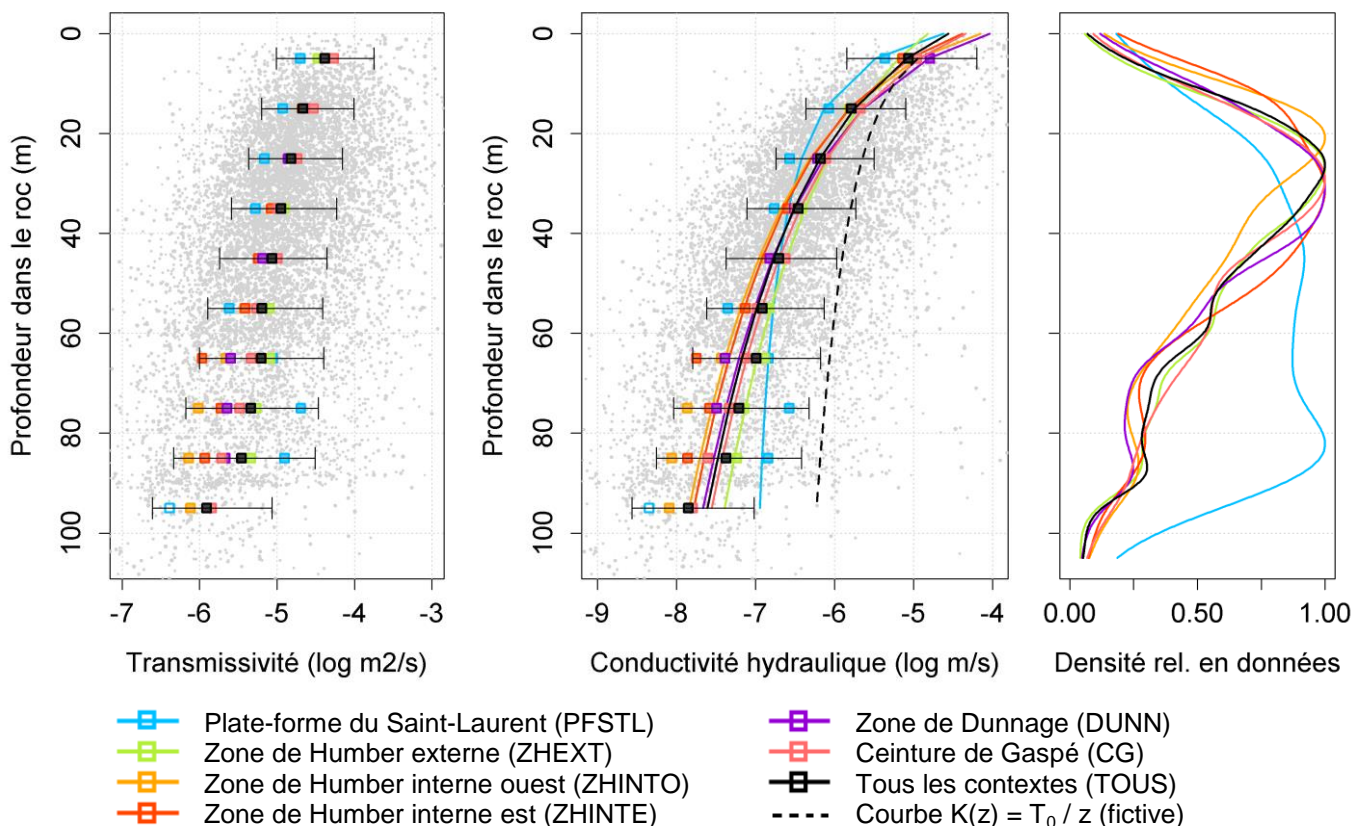
Contexte	Médiane du \log_{10} de T	Médiane du \log_{10} de K	Nombre d'estimations disponibles	Profondeur dans le roc (médiane)	Profondeur du toit du roc (médiane)	Prof. totale du forage (médiane)
Plate-f. du St-Laurent	-5.07	-6.73	241	57.9	4.9	67.9
Zone Humber externe	-4.95	-6.46	4966	38.1	3.7	45.1
Zones Humber internes	-5.02	-6.50	1431	35.3	4.0	41.9
Zone de Dunnage	-5.01	-6.46	1383	36.6	4.6	44.2
Ceinture de Gaspé	-4.97	-6.47	1023	38.4	3.7	45.7
Intrusifs	-4.86	-6.25	15	29.0	3.0	32.6
Ensemble	-4.97	-6.47	9061	38.1	4.0	45.1

Il est important de mentionner que les analyses de K et T en fonction de la profondeur, présentées plus loin dans cette section, démontrent que la K de l'aquifère rocheux est contrôlée par la profondeur dans le roc davantage que par la géologie locale. Les statistiques de K ou T par contexte ou par formation

géologique sont donc d'utilité et de pertinence limitées. Néanmoins, le tableau 4.1 synthétise, par contexte géologique, les tendances centrales de K , de T et de quelques profondeurs caractéristiques des puits.

La figure 4.4 synthétise plusieurs informations d'intérêt par rapport à la relation entre T ou K et la profondeur (z). Tout d'abord, en trame de fond, toutes les données de $T(z)$ ou $K(z)$ sont affichées sur les graphiques en points gris pâle. Ensuite, les médianes calculées à intervalles de profondeur réguliers (10 m) sont représentées par des carrés de couleurs correspondant aux contextes géologiques (voir la légende au bas de la figure). L'intérieur des carrés n'est pas coloré quand le nombre de données disponibles pour l'intervalle de profondeur est jugé insuffisant ($n_i < 10$). Une courbe, définie à l'aide de la fonction non linéaire suivante développée pour $K(z)$ (Jiang et al., 2010) peut être ajustée aux médianes de K , par contexte, tel que réalisé par Laurencelle et al. (2011; 2013) pour la Montérégie Est :

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



Remarque : les abréviations entre parenthèses sont utilisées dans la figure précédente (4.3)

Figure 4.4 : Dépendance des propriétés hydrauliques à la profondeur dans le roc, par contexte géologique : à gauche, relation $\log_{10} T(z)$; au centre, relation $\log_{10} K(z)$; à droite, densité relative en données par contexte, selon leur profondeur dans le roc (z) (densité normalisée par le maximum)

Dans l'équation 4.2, les indices 0 (zéro) réfèrent à la valeur qu'aurait la variable indiquée à une profondeur nulle ($z = 0$ m ; à la surface du roc), 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 intéressant. 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 $K_0 = 10^{\log K_0}$, notamment. À titre informatif, les valeurs des paramètres pour la courbe globale sont les suivantes : $\log_{10}(K_0) = -4.56$; $z_c = 10.02$; $b_r/b_0 = 0.001$. Cette fonction ne peut être ajustée aux médianes de T car leur décroissance avec la profondeur est linéaire (trop peu incurvée) et parce qu'elle est conçue pour prédire K , une propriété hydraulique non intégrée verticalement, au contraire de T . D'ailleurs, pour évaluer la part apparente de la décroissance de $K(z)$ qui serait due à la répartition de la productivité du puits sur toute sa longueur ouverte (on approxime $K \approx T/z$ tel qu'expliqué dans les sous-sections 4.1.1.3 et 4.1.1.4), une courbe fictive a été calculée par $K_{fict}(z) = T_0/z$, avec $T_0 \approx 6 \times 10^{-6}$, puis ajoutée au diagramme central de la figure 4.4. L'écart important entre la courbe $K_{tous}(z)$ et la courbe $K_{fict}(z)$ montre que la diminution de K avec la profondeur s'explique autant par la diminution de T avec la profondeur que par l'effet de répartition de T sur toute la longueur ouverte des puits. Il faut donc être prudent dans l'interprétation de tels graphiques.

Une autre limite méthodologique, liée aux données disponibles, est la profondeur z associée à chaque valeur de T ou K . Idéalement, la caractérisation de la variabilité verticale des propriétés hydrauliques d'un aquifère requiert des données approximativement ponctuelles dans l'espace $x y z$, c'est-à-dire le moins possible intégrées dans l'axe vertical z ; donc typiquement acquises par des essais hydrauliques avec obturateurs. Or, les données disponibles dans la BDPH sont essentiellement issues de tests de puits faits lors des opérations de forage ou d'essais de pompage conventionnels, donnant une valeur de transmissivité (moyenne) pour le puits entier qui est ouvert au roc. Dans la présente analyse, la profondeur z associée aux valeurs hydrauliques est la profondeur relative de la fin du forage par rapport à la surface du roc. Mais il est important de noter que d'autres approches seraient acceptables : la profondeur relative du milieu de l'intervalle ouvert du puits, par exemple, pourrait être utilisée comme z , ce qui modifierait l'aspect des dépendances de T et K par rapport à la profondeur.

Parallèlement, le graphique de droite dans la figure 4.4 montre les estimations de densité empirique (nombre disponible) des données hydrauliques selon la profondeur z (les points gris montrés sur les graphs de gauche et du centre de la figure 4.4), pour les différents contextes géologiques et pour l'ensemble de la zone à l'étude. La profondeur des puits est semblable pour toutes les zones géologiques des Appalaches, se situant généralement entre 20 et 40 m de profondeur. Les puits sont généralement plus profonds dans la Plate-forme du St-Laurent, allant de 20 m à 80 m de profondeur, mais il est important de préciser que le nombre de données disponibles dans la BDPH pour ce contexte (241) est de beaucoup inférieur aux autres contextes (>1000).

Étudiés conjointement, les graphiques de la figure 4.4 montrent la forte dépendance de K à la profondeur, ainsi que la dispersion des valeurs de K et les fréquences des puits en fonction de leur profondeur dans le roc. L'intervalle de confiance illustré (± 1 écart-type autour de la médiane) indique une dispersion d'amplitude indépendante de la profondeur, d'environ $\pm 3/4$ d'ordre de grandeur. Il ne semble donc pas y avoir de distinction entre les conductivités hydrauliques des différentes zones des Appalaches, qui montrent des courbes similaires de diminution de K avec la profondeur. Différemment, pour la Plate-forme du St-Laurent, la diminution de K avec la profondeur semble plus marquée à faible profondeur jusqu'à 30 m de profondeur, mais K demeure assez constant par la suite. Peut-être cette condition est-elle connue des puisatiers, qui ont ainsi avantage à poursuivre les forages jusqu'à ce que l'objectif de productivité du puits soit atteinte, expliquant ainsi pourquoi les puits sont plus profonds dans ce contexte géologique.

4.1.2.2 Statistiques sur l'emmagasinement

La figure 4.5 donne un aperçu des valeurs typiques de la propriété d'emmagasinement (S) pour les différents types d'aquifère, provenant exclusivement de rapports de consultants. Intentionnellement, aucune donnée disponible n'a été écartée de l'analyse. On remarque, tout d'abord, quelques points

probablement mal classés : en particulier, les deux valeurs d'environ 1×10^{-5} classées en tant que condition libre pour l'aquifère rocheux devraient probablement être reclassées en tant que condition captive. De même, les plages de valeurs des groupes captifs et semi-captifs s'entremêlent un peu trop. Malgré cela, on constate que l'étendue globale des valeurs rapportées ($\approx 1 \times 10^{-5}$ à 4×10^{-1}) est tout à fait réaliste. Sans considérer les classes de captivité, on peut estimer une valeur typique de S pour chaque type d'aquifère : pour l'aquifère rocheux, $S \sim 5 \times 10^{-5}$ en condition captive, $S \sim 5 \times 10^{-3}$ en condition semi-captive et $S \sim 0.05$ en condition libre ; pour les aquifères granulaires, $S \sim 1 \times 10^{-4}$ en condition captive, $S \sim 1 \times 10^{-3}$ en condition semi-captive et $S \sim 0.1$ en condition libre. Ces résultats limités, basés sur l'analyse d'un jeu de données restreint et sur un critère de classement (captivité) dont l'échelle d'évaluation est régionale, montrent d'une part que S est peu échantillonnée et, d'autre part, que la condition de confinement estimée à l'échelle régionale sur critères stratigraphiques (voir section 3.3 et livrable 17) peut être incohérente par rapport à la condition locale suggérée par la valeur de S , sur la base d'un critère hydraulique.

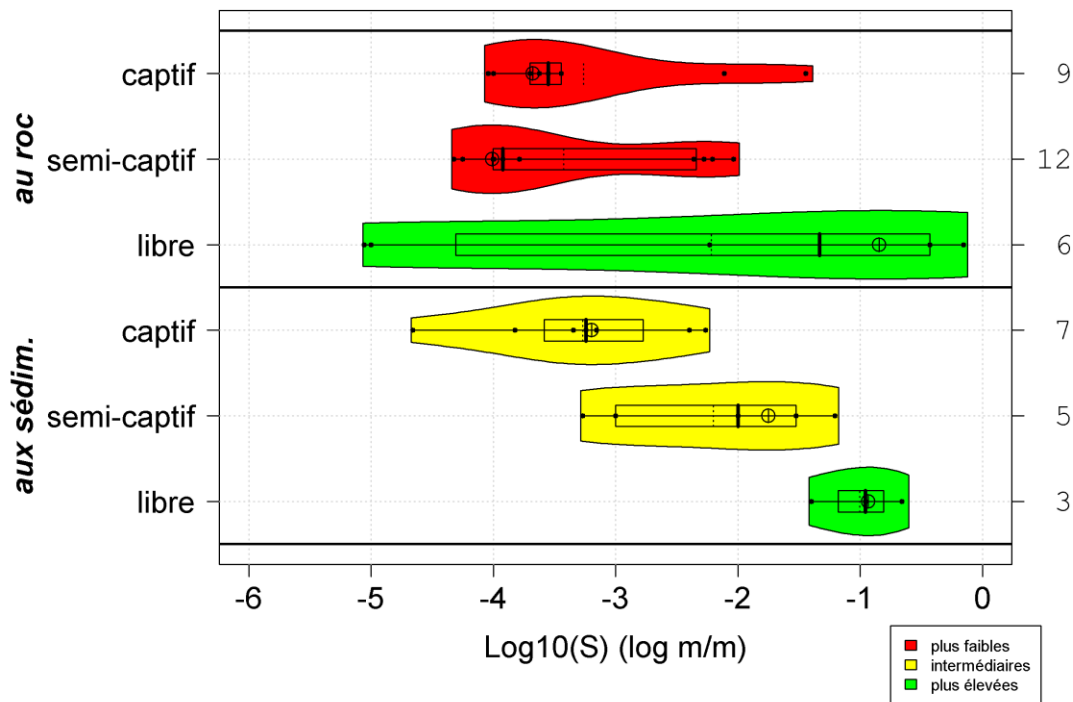


Figure 4.5 : Diagramme en violons des estimations de l'emmagasinement (S) par type d'aquifère

Considérés dans leur ensemble, les résultats présentés dans la section 4.1 montrent l'intérêt de disposer d'une base de données régionale incluant des données hydrauliques directes (valeurs de T , de K , de S) ou indirectes ($CS = Q_s$) accompagnées d'informations sur des essais hydrauliques. L'interprétation qui peut être faite de ces résultats demeure toutefois limitée par l'aspect partiel des BD régionales, dans lesquelles peu de champs sont systématiquement disponibles, vraisemblablement parce que les gens travaillant sur le terrain ne sont pas clairement informés de l'ensemble des données d'intérêt, d'une part, et parce que le processus de transmission de ces données au MDDELCC n'est pas encore optimal. Toute amélioration éventuelle de la qualité des BDs régionales ou provinciales (en particulier le SIH) permettrait d'affiner les analyses du type de celles présentées dans les sections 4.1 et 5.1 (cette dernière se concentrant sur les données hydrauliques des puits municipaux).

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 la charge est plus faible. La charge hydraulique représente l'élévation du niveau d'eau mesuré dans un puits (m) 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 isohypses. En Chaudière-Appalaches, une carte piézométrique a été produite pour l'aquifère rocheux régional. Toutefois, les aquifères granulaires ont une extension limitée et il n'a donc pas été possible de produire une carte piézométrique pour les aquifères granulaires.

Des détails sur la production des cartes piézométriques sont donnés dans les guides de cartographie hydrogéologique du MDDELCC (2008a et 2008b). Pour les projets PACES, le protocole détaillé utilisé pour la production de la carte piézométrique est présenté en annexe du rapport. Toutefois, une méthode un peu différente d'interpolation des niveaux d'eau a été utilisée par rapport au protocole en annexe qui représente l'approche utilisée pour le projet PACES de la Montérégie Est (Carrier et al., 2013a). La **carte 20** (figure 4.4) de la surface piézométrique a été produite pour l'aquifère rocheux fracturé régional. Pour ce faire, une sélection et validation des forages et données de niveaux d'eau pour des puits installés au roc a d'abord été faite. L'interpolation des niveaux d'eau a été faite par krigeage avec dérive externe avec la topographie (MNE) pour les Appalaches au-dessus de la limite marine où l'influence de la topographie est évidente. Pour la zone sous la limite marine, le niveau d'eau représente une moyenne pondérée entre les résultats du krigeage bayésien et les résultats du krigeage avec dérive externe avec le MNE. Compte tenu du nombre de points dans la zone d'étude (environ 9000 points pour 15 000 km²) et leur répartition spatiale, c'est la combinaison de méthodes d'interpolation qui a donné les résultats les plus réalistes et l'erreur la plus faible (environ 1.4 m en moyenne).

Sur la **carte 20** (figure 4.6), on montre des plages d'élévation des niveaux d'eau, allant de moins de 30 m à plus de 730 m. Cette carte piézométrique régionale donne une vue d'ensemble de l'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux régional. La **carte 28A** donne des précisions quant à la nature des liens entre l'aquifère rocheux et les cours d'eau et indique les zones de résurgence de l'eau souterraine, ce qui sera discuté à la section 4.4. Au niveau régional, la **carte 20** (figure 4.6) montre que les conditions d'écoulement sont très distinctes dans les contextes hydrogéologiques de la Chaudière-Appalaches. Dans les basses-terres, les très faibles gradients hydrauliques horizontaux indiquent que l'écoulement y est relativement faible et se fait généralement vers le fleuve Saint-Laurent, sauf en bordure des rivières Boyer et du Sud. Au contraire, dans les Appalaches au sud de la limite marine, les fortes variations de la topographie donnent des niveaux d'eau beaucoup plus élevés et variables. L'élévation topographique maximale se trouve dans la Zone de Humber interne et cela crée une grande ligne de partage des eaux souterraines orientée sud-ouest à nord-est au centre des Appalaches. Du côté nord de la ligne de partage l'eau souterraine s'écoule généralement vers le nord, tandis que du côté sud l'écoulement se fait vers le sud. Plusieurs vallées orientées perpendiculairement à la topographie créent toutefois des directions d'écoulement perpendiculaires à l'écoulement régional. L'écoulement est convergent vers les vallées appalachiennes, quelle que soit leur orientation. De plus, l'orientation de l'écoulement n'est pas régulière parce que la topographie des Appalaches est très morcelée par un dense réseau de cours d'eau qui sont des exutoires de l'eau souterraine qui a circulée dans l'aquifère rocheux régional. Il se dégage de ces conditions que l'écoulement de l'eau souterraine dans les Appalaches doit être rapide, à cause des forts gradients hydrauliques horizontaux, et que les voies d'écoulement devraient être généralement assez courtes parce que les cours d'eau abondants interceptent l'écoulement non loin des hauts topographiques où se fait la recharge. Il en découle que le temps de résidence de l'eau souterraine devrait être généralement court, ce qui est confirmé par la géochimie de l'eau souterraine décrite à la section 4.6.

Livrable PACES no. 20 : PIÉZOMÉTRIE DANS LE ROC

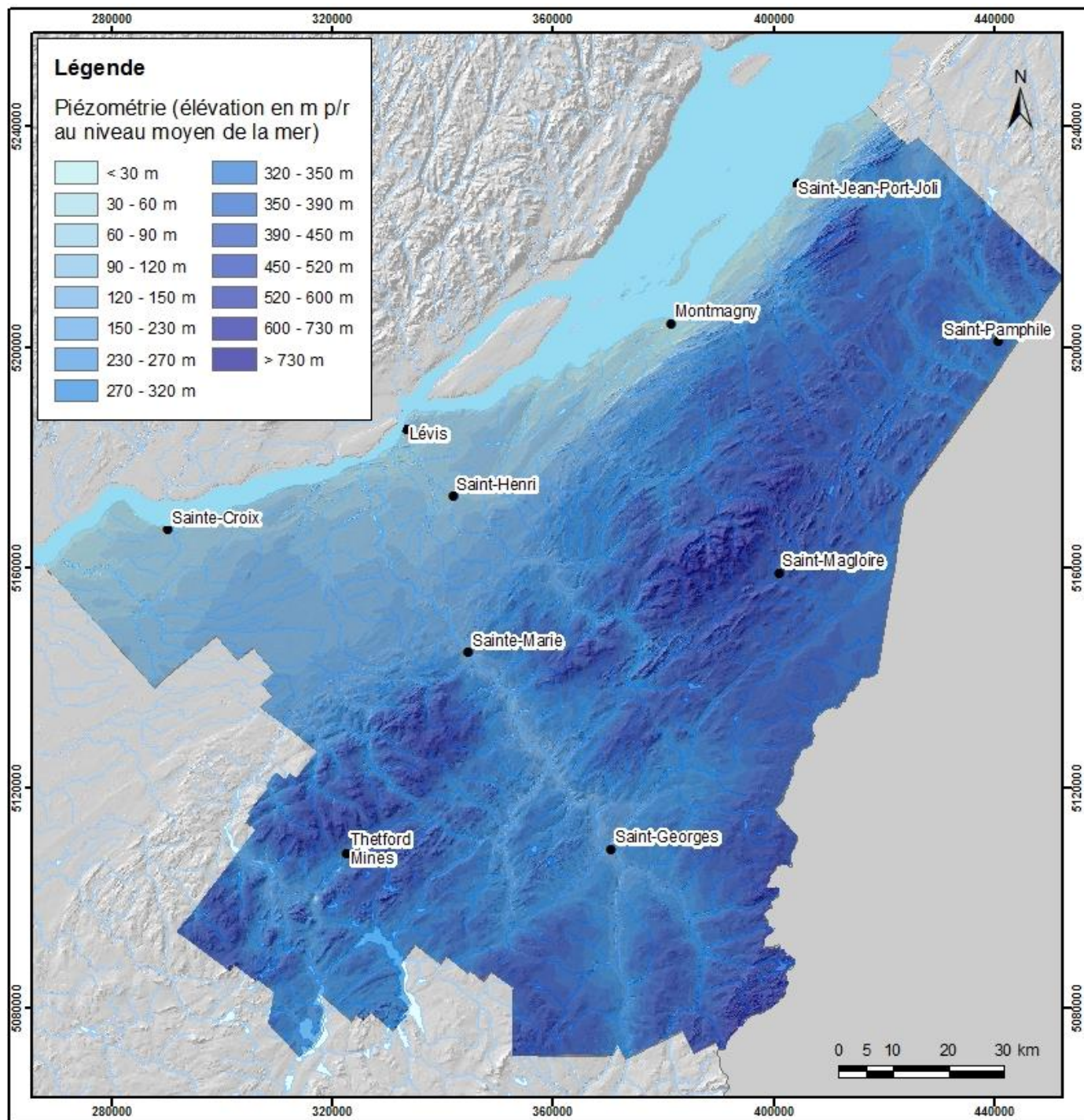


Figure 4.6 : Piézométrie de l'aquifère rocheux fracturé régional (carte 20)

4.3 Recharge et bilan hydrologique

Comme le mentionne un des guides sur la cartographie hydrogéologique du MDDELCC (2008a), l'évaluation de la recharge est une partie importante des études hydrogéologiques visant à évaluer les ressources en eau souterraine. En effet, les débits exploitables de façon durable dépendent grandement du renouvellement annuel de l'eau souterraine par la recharge. Cependant, 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 paramètres influencent la recharge et que ces paramètres sont difficiles à estimer. Généralement, plusieurs méthodes indirectes sont utilisées pour préciser la plage de valeur de la recharge (Rivard et al., 2014). 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, les méthodes existantes ne permettent généralement pas de définir la distribution spatiale de la recharge. Il est toutefois important de connaître la distribution spatiale de la recharge pour être en mesure 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 (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 PACES en Chaudière-Appalaches, la recharge a été estimée à l'aide de HELP pour produire la **carte 28B** (figure 4.8) montrant la distribution spatiale de la recharge dans l'aquifère rocheux régional. D'autres travaux ont aussi été consacrés à l'estimation des processus de recharge en Chaudière-Appalaches. La section 6.4 documente ainsi les résultats de la modélisation hydrologique réalisée par l'IRDA qui a permis, entre autre, d'évaluer la recharge distribuée spatialement, bien qu'à une échelle moins détaillée que ce qui a été obtenu de HELP.

La recharge à l'aquifère rocheux régional a donc été estimée à l'aide du logiciel HELP (*Hydrological Evaluation of Landfill Performance*) (Schroeder et al., 1994). Ce modèle d'infiltration a des fondements physiques et permet d'utiliser des données climatiques réelles ainsi que des propriétés physiques des matériaux. Normalement, HELP ne fournit des résultats que pour une cellule représentant une séquence de matériaux. Toutefois, les travaux de Croteau et al. (2010) ont permis de développer des capacités pour utiliser les résultats de maillages de couches cartographiques afin d'alimenter les simulations HELP et de réintégrer les résultats de simulation dans des couches cartographiques. Ces capacités rendent pratique l'application de HELP à l'estimation de la distribution spatiale (mais aussi temporelle) de la recharge dans un système aquifère. HELP fait l'estimation quotidienne des paramètres du bilan hydrologique :

$$\text{Recharge} = \text{Précipitation} - \text{Ruissellement} - \text{Évapotranspiration} \pm \text{Emmagasinement} \quad 4.3$$

HELP considère l'emmagasinement et le ruissellement de surface, la fonte de la neige, l'infiltration, l'évapotranspiration, la croissance de la végétation, l'emmagasinement d'eau dans le sol ainsi que le ruissellement hypodermique. La figure 4.7 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. Les données d'entrée nécessaires à HELP ont été préparées dans la base de données d'un SIG.

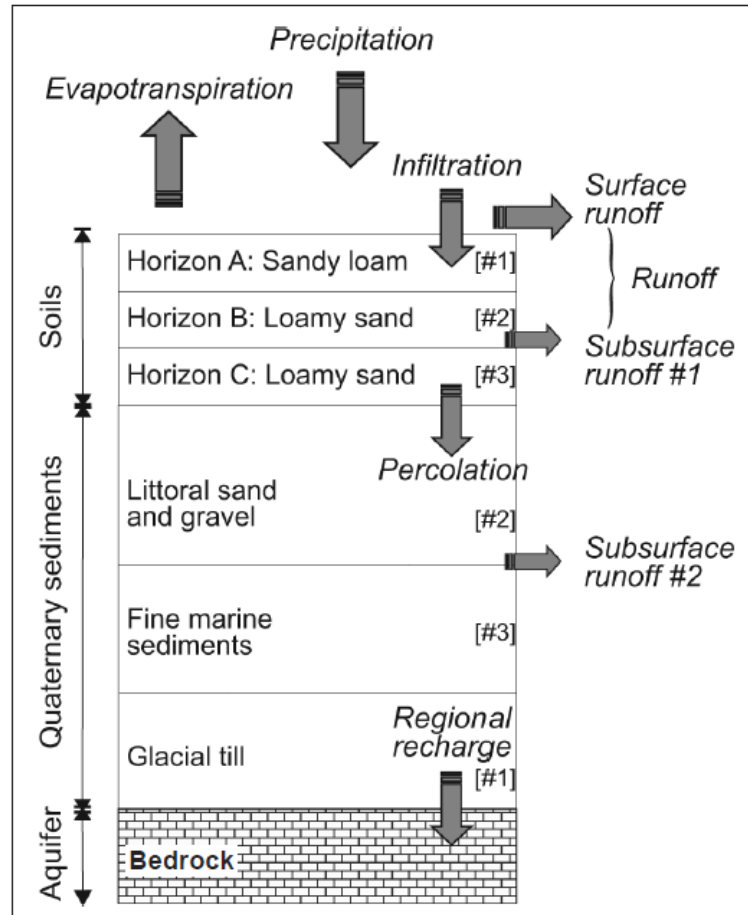


Figure 4.7 : Exemple de profil de matériaux utilisé pour estimer la recharge avec HELP et composantes du bilan hydrologique estimées par HELP (Croteau et al., 2010)

La **carte 28B** (figure 4.8) montre la distribution spatiale de la recharge alors que le tableau 4.2 résume les résultats du bilan hydrologique et de l'estimation de la recharge avec HELP pour chaque contexte hydrogéologique ainsi que pour l'ensemble de la Chaudière-Appalaches. La distribution spatiale des zones de recharge et de résurgence sera discutée à la prochaine section (section 4.4; **carte 28A**, figure 4.9). Mentionnons tout de même que la figure 4.8 permet de voir le contraste entre les conditions de recharge pour les basses-terres du St-Laurent, où la recharge est limitée (particulièrement dans la partie ouest), et les Appalaches, où la recharge est importante. Lorsque les vallées appalachiennes contiennent des épaisseurs importantes de sédiments (voir **carte 15A**), la recharge y est aussi limitée.

Le tableau 4.2 compare les composantes du bilan hydrologique obtenues de HELP pour chaque contexte hydrogéologique et pour l'ensemble de la Chaudière-Appalaches. Pour chaque composante, les valeurs minimales sont soulignées alors que les valeurs maximales sont indiquées par un caractère gras. On peut constater que plusieurs des composantes du bilan sont en fait assez similaires entre les contextes, avec quelques distinctions : les précipitations sont un peu moindres dans les hautes-terres appalachiennes, l'évapotranspiration est un peu plus faible dans les basses-terres, le ruissellement de surface est pratiquement identique pour les trois contextes mais le ruissellement de sous-surface est plus du double des deux autres contextes pour les basses-terres. Il résulte que la recharge est significativement plus faible dans les basses-terres que dans le reste de la région. La recharge n'est que légèrement plus faible dans les hautes-terres par rapport aux vallées appalachiennes.

Livrable PACES no. 28B : RECHARGE DISTRIBUÉE

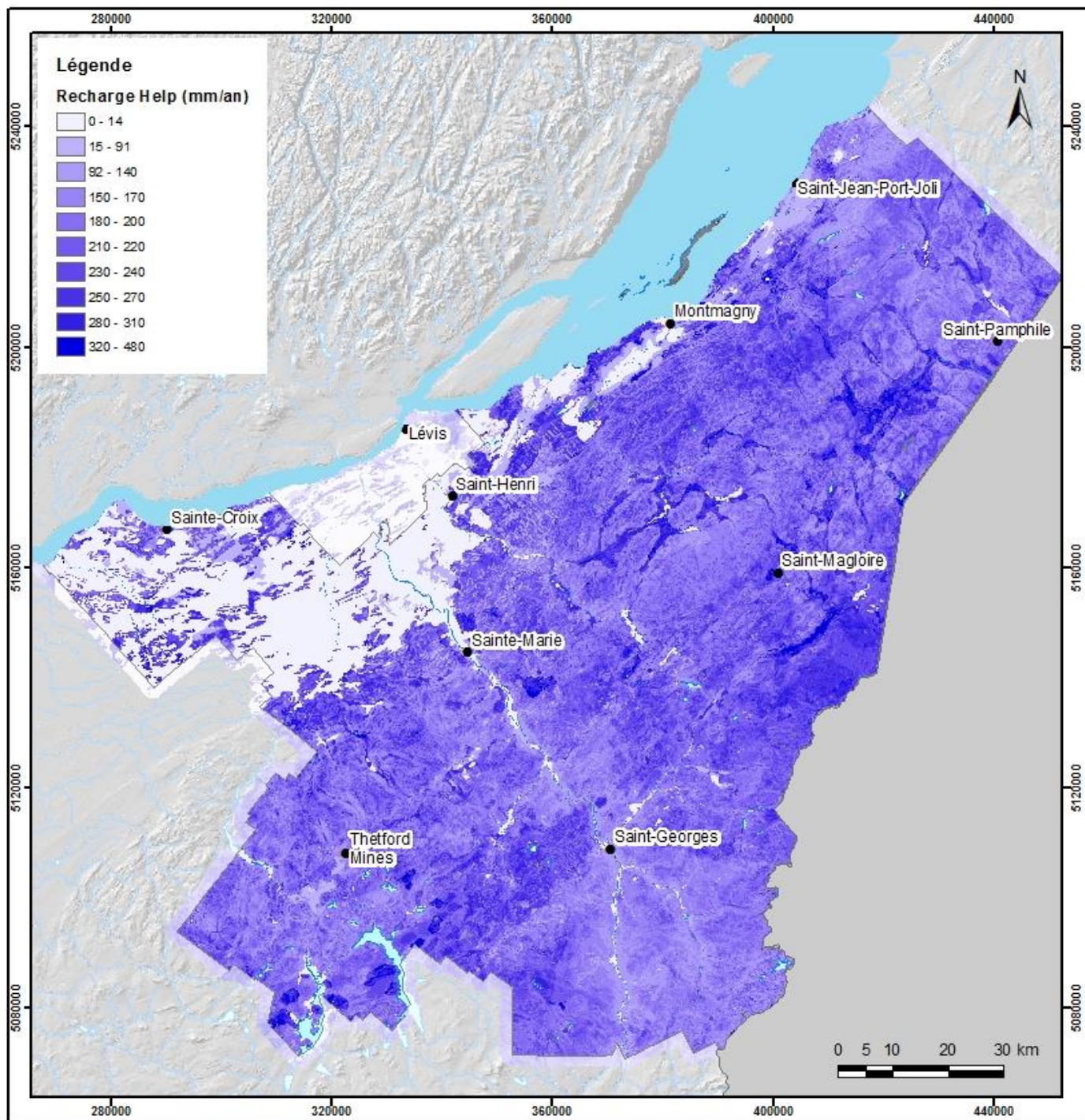


Figure 4.8 : Recharge de l'aquifère rocheux régional (carte 28B)

Tableau 4.2 : Bilan hydrologique et recharge obtenus de HELP par contexte hydrogéologique

Contexte hydrogéologique	Superficie (km ²)	Précipitation totale (mm/an)	Évapo-transpiration (mm/an)	Ruissellement de surface (mm/an)	Ruissellement sous-surface (mm/an)	Recharge (mm/an)
Basses-terres du St-Laurent	4 061	1158	<u>533</u>	318	216	<u>85</u>
Hautes-terres appalachiennes	9 744	<u>1145</u>	547	317	109	186
Vallées appalachiennes	<u>2 293</u>	1152	540	319	108	192
Région d'étude	16 098	1149	543	318	132	166

Globalement, avec 166 mm/an pour l'ensemble de la Chaudière-Appalaches, la recharge de l'aquifère rocheux régional peut être considérée relativement importante. Toutefois, la répartition spatiale de cette recharge est très variable à l'intérieur même des contextes hydrogéologiques (**carte 28B**, figure 4.8). La section 5.2 sur l'usage des ressources en eau souterraine va comparer l'importance de l'utilisation de l'eau souterraine dans chaque municipalité par rapport au renouvellement qui se fait grâce à la recharge à l'intérieur même de la municipalité, en considérant que l'eau souterraine exploitée dans une municipalité peut en fait provenir d'une recharge qui s'est faite en dehors de la municipalité.

Une vérification des résultats a été faite en comparant les recharges estimées par HELP avec des débits de base de sous-bassins versants. Cette vérification est présentée à la section 6.4.4 qui décrit la modélisation hydrologique qui permet aussi d'estimer la recharge. L'estimation de la recharge obtenue du modèle hydrologique est aussi comparée à l'estimation faite avec HELP à la section 6.4.4.

4.4 Zones de recharge et de résurgence

Le protocole traitant de la production de la **carte 28A** (en annexe) donne les détails sur la façon dont les zones de recharge et de résurgence ont été définies. Le fond de la **carte 28A** (figure 4.9) reproduit la piézométrie (niveau d'eau) de l'aquifère rocheux régional (**carte 20**). Des polygones de couleur sont superposés à la carte piézométrique pour souligner les limites des zones préférentielles de recharge et de résurgence. Pour définir les zones préférentielles de recharge, 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 (superficie > 1 km² hors des zones captives). À l'inverse, les zones préférentielles de résurgence ont été identifiées dans les dépressions de la surface piézométrique et les zones de nappe affleurante (< 1 m de profondeur), hors des zones captives et où la recharge est faible (< 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 28A** (figure 4.9) montre aussi la nature du lien entre l'aquifère rocheux et les cours d'eau qui a été définie sur la base des conditions de confinement (**carte 17**; section 3.3) et de l'épaisseur de la couche argileuse (**carte 15B**; section 3.2). La présence d'affleurements dans le lit des cours d'eau n'a pas été explicitement considérée pour définir la nature de liens entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux. Cependant, cette information avait été intégrée dans les points de contrôle pour la production de la carte d'épaisseur de dépôts meubles et les autres cartes d'épaisseur de sédiments (**cartes 15A, 15B et 15C**).

Livrable PACES no. 28A : ZONES POTENTIELLES DE RECHARGE ET DE RÉSURGENCE PRÉFÉRENTIELLES

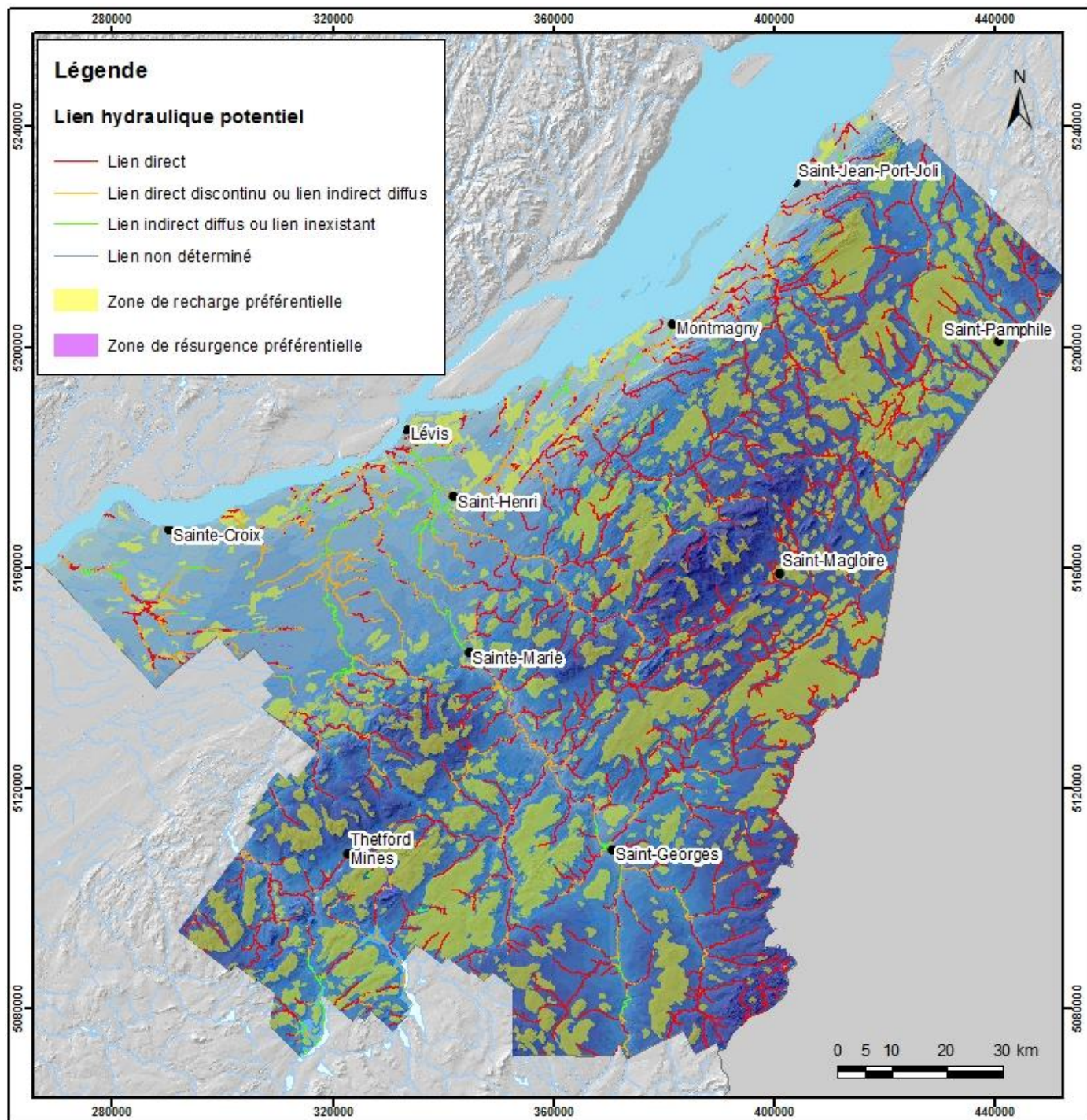


Figure 4.9 : Zones de recharge et de résurgence de l'aquifère rocheux régional montrant aussi la nature des liens entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux (**carte 28A**)

Les critères suivants ont été utilisés pour définir les liens entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux :

- Lien « direct » : conditions libres ou conditions semi-captives avec une couverture de dépôts meubles 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 (ordre de Strahler < 2)

Pour le contexte des basses-terres du St-Laurent, les **cartes 28A** et **28B** (figures 4.8 et 4.9) montrent de grandes étendues avec une recharge très faible (< 15 mm/an); ces zones correspondent généralement aux endroits avec des accumulations épaisses de sédiments fins (**carte 15B**) et des conditions captives (**carte 17**). Ces zones de faible recharge sont particulièrement étendues à l'ouest de Lévis. On retrouve tout de même dans les basses-terres des zones locales de recharge qui sont associées à des affleurements du roc (**carte 13**) et où les conditions sont libres (**carte 17**). La partie des basses-terres se trouvant à l'est de Lévis montre ainsi une grande proportion du territoire avec des valeurs de recharge modérées ou élevées. Nous verrons à la section 4.6 que ces conditions de recharge distinctes se reflètent dans les types d'eau souterraine qui se retrouvent dans les parties ouest et est des basses-terres, notamment la présence d'eaux souterraines évoluées chimiquement dans la partie ouest où il y a peu de recharge. Au niveau des zones de résurgence et des liens entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux régional, il y a encore un contraste marqué entre les parties ouest et est des basses-terres, de part et d'autre de Lévis. À l'ouest des basses-terres, on retrouve très peu de zones de résurgence et les liens entre l'aquifère rocheux régional et les cours d'eau sont souvent diffus ou inexistants. Dans cette partie ouest des basses-terres, les cours d'eau n'exercent donc pas un effet important sur l'écoulement de l'eau souterraine, ce qui se reflète par une piézométrie très régulière et montrant une tendance générale de l'écoulement vers le fleuve Saint-Laurent (**carte 20**). Au contraire, dans la partie des basses-terres à l'est de Lévis, les cours d'eau sont souvent en lien direct avec l'aquifère et représentent des exutoires de l'eau souterraine, particulièrement pour la rivière Boyer et dans une moindre mesure pour la rivière du Sud (**carte 28A**). Cette émergence est apparente par l'effet exercé par les cours d'eau sur la piézométrie (**carte 20**).

Au-delà de la limite marine, à l'intérieur des Appalaches, on retrouve des valeurs de recharge importantes, allant de 100 à plus de 300 mm/an (**carte 28B**). Ces fortes recharges sont favorisées par de faibles épaisseurs de sédiments assez perméables sur le roc (**carte 15B**) et des conditions libres (**carte 17**). Par contre, dans les vallées appalachiennes où il y a des accumulations importantes de sédiments, généralement fins (**cartes 15A et 15B**) et menant à des conditions semi-captives (**carte 17**), la recharge peut être très faible (<15 mm/an). On retrouve dans les hautes-terres appalachiennes de nombreuses zones de recharge préférentielle (**carte 28A**). À cause du relief morcelé et du dense réseau hydrographique, l'étendue des zones individuelles de recharge préférentielle est tout de même assez limitée, et généralement de moins de 10 km de diamètre. Les valeurs maximales de recharge ne se retrouvent généralement pas sur les sommets mais à leurs bordures où la topographie est plus plane (**carte 28B**); ce qui est causé par les pentes fortes qui mènent à un ruissellement important. Les vallées appalachiennes représentent d'importantes zones de résurgence, même si parfois le lien entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux est diffus. De plus, le relief dans les Appalaches est disséqué par un dense réseau de cours d'eau qui représentent des exutoires de l'eau souterraine, même s'ils sont parfois mineurs, car ils sont généralement en lien direct avec l'aquifère rocheux régional (**carte 28A**). La section 4.6 montre que la recharge importante sur l'ensemble des Appalaches fait en sorte que la géochimie de l'eau souterraine est typique d'une recharge récente. Le pendant négatif de la recharge importante dans les Appalaches est que les aquifères y sont généralement assez vulnérables (**carte 22**, section 4.5), de sorte qu'on retrouve dans les secteurs avec plus d'activités potentiellement polluantes (**carte 23**, section 5.3) des évidences de dégradation de la qualité de l'eau souterraine (section 4.6).

4.5 Vulnérabilité des nappes

Selon un des guides de cartographie hydrogéologique du [MDDELCC \(2008b\)](#), 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 à partir de la surface par des activités anthropiques potentiellement polluantes. Cette carte doit permettre d'identifier les zones les plus vulnérables, afin de prendre des mesures d'aménagement du territoire permettant de protéger la ressource. De telles mesures préventives évitent les travaux longs et onéreux de réhabilitation des nappes.

Toutefois, 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 est utilisée pour évaluer la vulnérabilité, 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 généralement 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 Chaudière-Appalaches.

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 donc à décrire brièvement l'approche suivie et à présenter ensuite les résultats obtenus pour l'aquifère rocheux régional de la Chaudière-Appalaches. Il n'y a pas dans la région 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 ([carte15B](#), section 3.2.5). 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 4.10.

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) (les valeurs sont documentées dans le protocole en annexe de ce rapport). Des poids, de 1 à 5, ont aussi été assignés à chacun des 7 paramètres (figure 4.10) 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 :

$$D_R D_w + R_R R_w + A_R A_w + S_R S_w + T_R T_w + I_R I_w + C_R C_w = \text{Indice DRASTIC} \quad 4.4$$

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 watertable*), 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*).

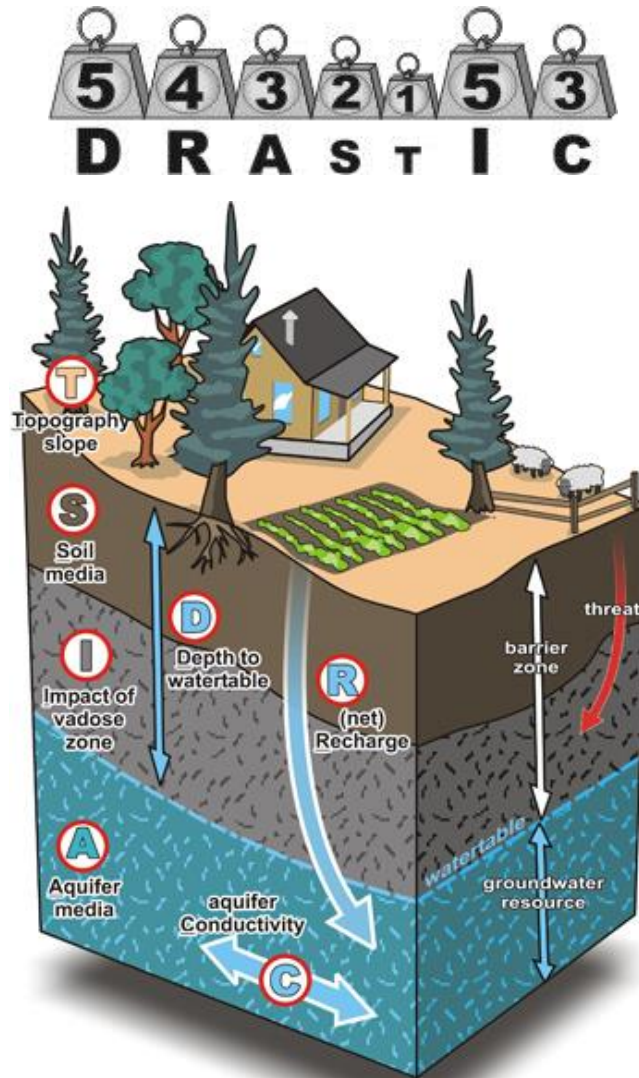


Figure 4.10 : Poids et définitions des paramètres de la méthode de vulnérabilité DRASTIC

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 définies par l'équation 4.4. Dans le cadre des projets PACES, des mailles de 250 m 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 acceptable en fonction des données disponibles. Ces opérations ont été réalisées dans le système d'information géographique (SIG) ArcGIS.

Les **cartes 22A** et **22B** (figures 4.12 et 4.13) montrent l'indice DRASTIC de vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional en Chaudière-Appalaches. Les deux cartes utilisent différents formats de présentation : 1) une échelle de couleur pour indiquer les plages de valeur de l'indice, telles que définies dans le guide de la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987) (**carte 22A**, figure 4.12); 2) une présentation alternative de l'indice DRASTIC avec des plages de valeurs définies de façon relative en utilisant les percentiles de la distribution des valeurs d'indice DRASTIC obtenues dans la région d'étude (**carte 22B**, figure 4.13). Le deuxième mode de présentation permet de mieux montrer le niveau relatif de la vulnérabilité en Chaudière-Appalaches. Les cartes de chacun des sept paramètres de la méthode DRASTIC (figure 4.10) sont présentées à l'annexe 2 du rapport en format électronique.

En termes absolus, les cotes DRASTIC maximales n'atteignent que la plage 160-180 (jaune) qui représente une vulnérabilité modérément élevée (**carte 22A**, figure 4.12). On ne retrouve pas en Chaudière-Appalaches de cotes plus élevées que 168 qui indiqueraient une forte vulnérabilité. Toutefois, la représentation de la vulnérabilité en fonction des cotes DRASTIC de la région permet de mieux indiquer la variabilité de la vulnérabilité et son importance relative dans différents secteurs. Des classes de vulnérabilité relative ont été établies en utilisant les cotes DRASTIC correspondant aux percentiles des superficies couvertes par les différentes plages de cotes DRASTIC. Le tableau 4.3 documente les cotes DRASTIC et les percentiles utilisés pour définir les classes de vulnérabilité. Des couleurs distinctes sont assignées à ces classes sur la carte de vulnérabilité relative (**carte 22B**, figure 4.13) :

- Entre la cote minimale de 50.7 du percentile 0 et la cote de 107.5 du 10^e percentile on définit les zones considérées à « très faible » vulnérabilité relative (vert foncé);
- Entre la cote 107.5 du 10^e percentile et la cote 118.5 du 25^e percentile on définit les zones considérées à « faible » vulnérabilité relative (vert pâle);
- Entre la cote 118.5 du 25^e percentile et la cote 138.5 du 75^e percentile on a les zones à vulnérabilité « intermédiaire » (jaune);
- Entre la cote 138.5 du 75^e percentile et la cote 144.5 du 90^e percentile la vulnérabilité est considérée relativement « élevée » (orange);
- Enfin, entre la cote 144.5 du 90^e percentile et la cote maximale de 168.1, la vulnérabilité relative est jugée « très élevée » (rouge).

Afin de mieux juger de la distribution des cotes DRASTIC et des classes de vulnérabilité relative sur la **carte 22B** (figure 4.13) un graphique montrant les proportions des classes de vulnérabilité relative à l'intérieur de chaque contexte hydrogéologique est montré à la figure 4.11. La carte de vulnérabilité relative (**carte 22B**, figure 4.13) reflète bien les conditions auxquelles on aurait pu s'attendre sur la base des différentes cartes déjà présentées dans le rapport : topographie et pentes (**cartes 1, 3 et 4**), épaisseur de sédiments fins (**carte 15B**), conditions de confinement (**carte 17**) et recharge distribuée (**carte 28B**).

Les basses-terres du St-Laurent ont les plus grandes étendues de vulnérabilité relative faible ou même très faible. La figure 4.11 nous indique qu'en fait plus de 60% des basses-terres ont une vulnérabilité faible ou très faible. La vulnérabilité est particulièrement faible sur de grandes étendues dans la partie des basses-terres à l'ouest de Lévis qui correspond aux endroits où il y a des accumulations épaisses de sédiments fins (**carte 15B**). On trouve tout de même des vulnérabilités relatives élevées dans plusieurs secteurs des basses-terres où les conditions sont libres (**carte 17**) et la recharge importante (**carte 28B**). Dans la partie des basses-terres à l'est de Lévis, la proportion des zones à vulnérabilité faible et élevée est partagée.

Dans les hautes-terres appalachiennes, puisqu'elles occupent la majorité de la région d'étude, on retrouve surtout des zones à vulnérabilité moyenne (jaune). Les hauts topographiques les plus importants n'ont toutefois que des vulnérabilités faibles parce que les pentes y sont fortes (**carte 4**) et la recharge plus modérée qu'ailleurs (**carte 28B**), mais aussi parce que la profondeur à la nappe y est plus importante. Les plus fortes vulnérabilités des hautes-terres appalachiennes sont présentes en marge des plus hauts

sommets, dans les secteurs de plateaux ou en bordure des vallées, où se trouvent aussi parfois d'intenses activités anthropiques (**carte 23**, section 5.3).

C'est en fait dans les vallées appalachiennes qu'on trouve proportionnellement le plus de zones à vulnérabilité élevée ou très élevée (tableau 4.3, figure 4.11). Les plus fortes vulnérabilités dans les vallées appalachiennes se retrouvent toutefois dans les parties des MRC de l'Islet, Montmagny, Bellechasse et des Etchemins où la densité de population est moindre qu'ailleurs en Chaudière-Appalaches. La vulnérabilité est plutôt moyenne, ou même faible aux endroits où on retrouve de plus grandes épaisseurs de sédiments fins (**carte 15B**) et des conditions semi-captives (**carte 17**). C'est le cas notamment de la rivière Chaudière et de la rivière Etchemin. Toutefois, la vulnérabilité est souvent élevée, ou même très élevée, en bordure des vallées d'où provient l'eau souterraine qui fait résurgence dans les vallées et où se trouvent souvent des activités anthropiques assez intenses ainsi que de l'agriculture.

Tableau 4.3 : Cotes DRASTIC des contextes de la région

Cote DRASTIC	Percentile	Région	Basses-terres	Hautes-terres	Vallées
		Superficie (km ²)	Superficie (km ²)	Superficie (km ²)	Superficie (km ²)
50.7 - 107.5	Min. - 10e	1522	<u>1143</u>	278	101
107.5 - 118.5	10e -25e	2387	<u>1055</u>	1042	291
118.5 - 138.5	25e - 75e	<u>7781</u>	864	<u>5973</u>	<u>844</u>
138.5 - 144.5	75e - 90e	2371	224	1774	<u>575</u>
144.5 - 168.1	90e - Max.	1541	284	679	481
Total		15601	3565	9746	2293

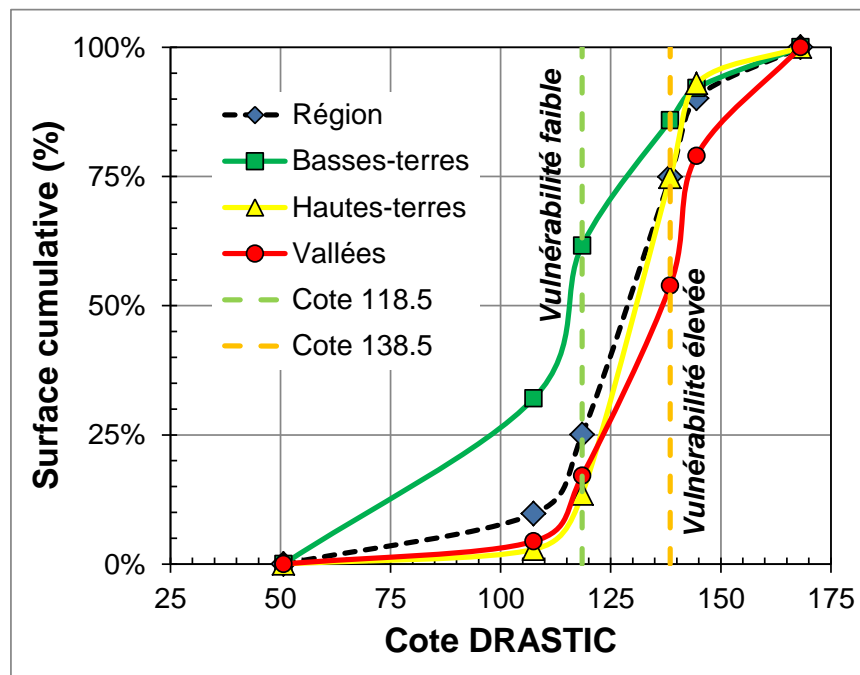


Figure 4.11 : Superficie cumulative des contextes hydrogéologiques en fonction des cotes DRASTIC

Livrable PACES no. 22A : VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES (DRASTIC - ABSOLU)

COTES ET COULEURS DRASTIC STANDARD

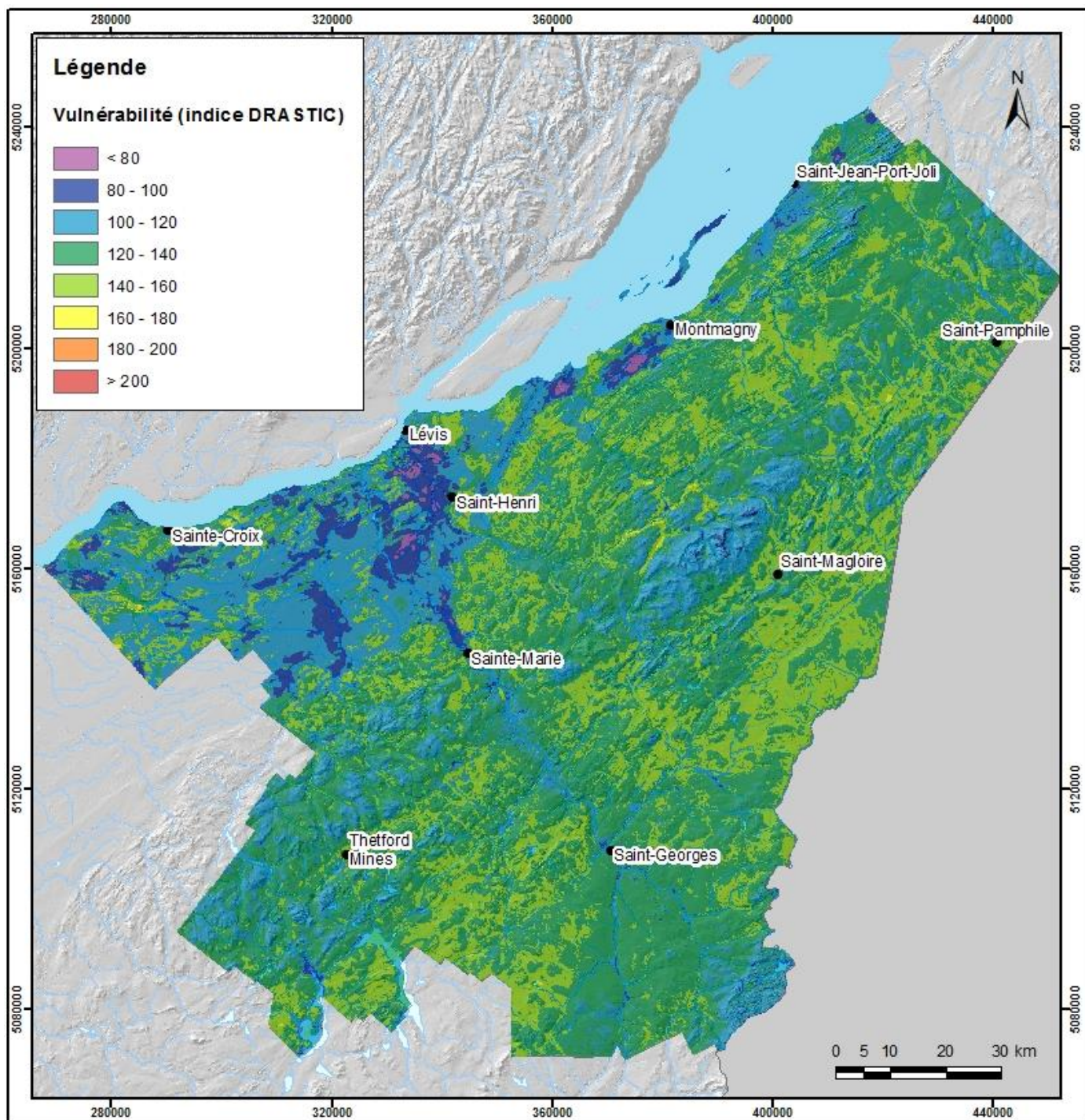


Figure 4.12 : Vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional illustrée avec les cotes et couleurs standard DRASTIC (carte 22A)

Livrable PACES no. 22B : VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES (DRASTIC - RELATIF) INTERVALLES DRASTIC PAR RAPPORT AUX VALEURS RÉGIONALES

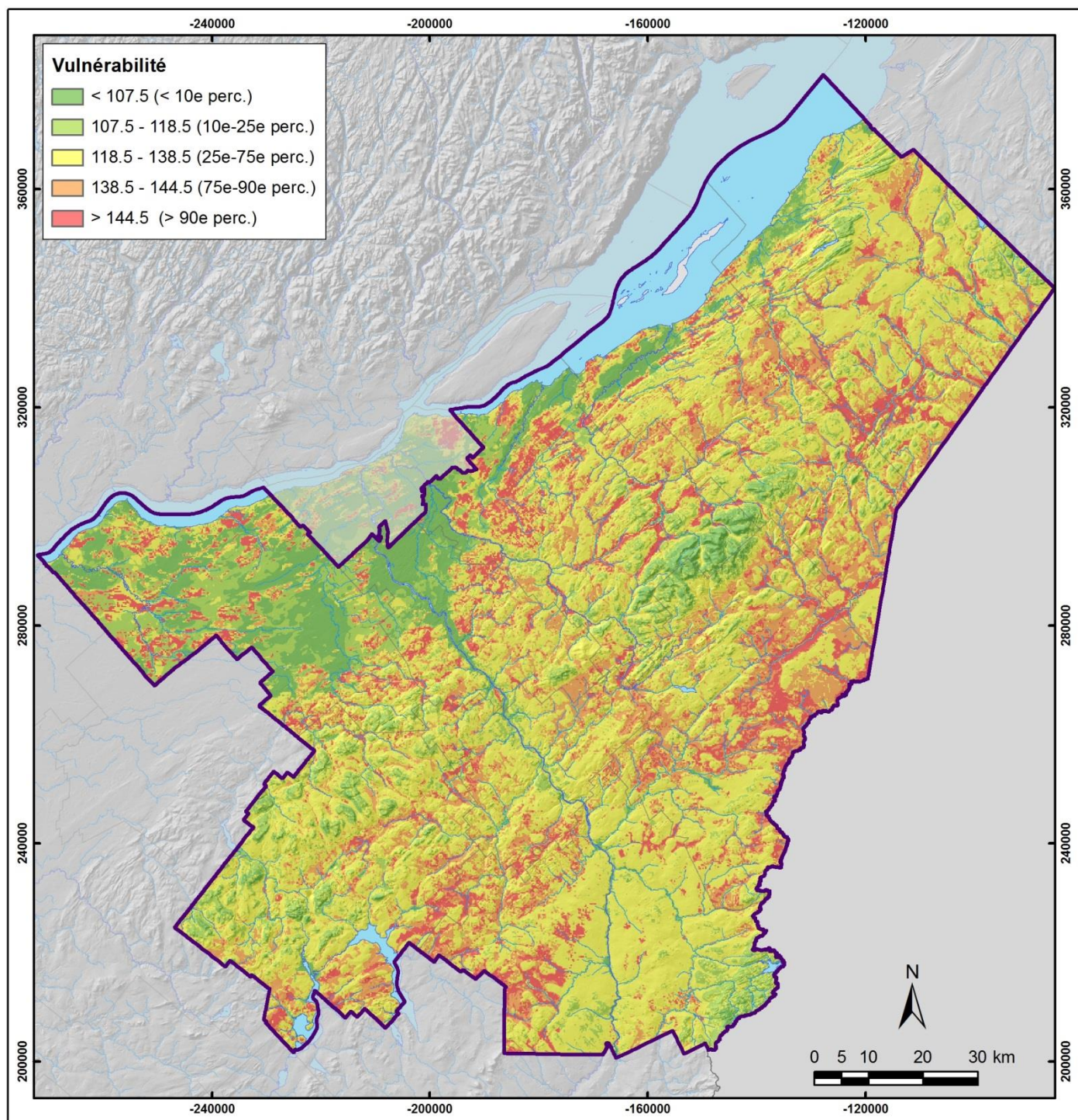


Figure 4.13 : Vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional illustrée avec les intervalles et couleurs en fonction des valeurs régionales des cotes DRASTIC (**carte 22B**)

4.6 Géochimie de l'eau souterraine

4.6.1 Travaux, objectifs et méthodologie

Les propriétés physiques et chimiques des eaux souterraines sont influencées par les différents milieux dans lesquels elles ont évoluées tout au long du cycle de l'eau, des zones de recharge jusqu'aux zones d'émergence de l'eau souterraine. Les gaz et aérosols de l'atmosphère, l'altération et l'érosion des sols et du substrat rocheux, les dissolutions et précipitations minérales ainsi que les activités anthropiques sont tous des mécanismes laissant chacun leur signature chimique dans les eaux souterraines (Hem, 1985). L'objectif de l'étude géochimique de l'eau souterraine est donc de mettre en relation les propriétés physiques et chimiques des eaux souterraines de la Chaudière-Appalaches afin de permettre une meilleure compréhension des mécanismes contrôlant la géochimie régionale et ainsi venir appuyer la compréhension du système hydrogéologique régional. La démarche suit les 4 étapes suivantes :

1. Élaborer une **base de données géochimique** à l'aide d'un maximum d'échantillons représentatifs de l'ensemble de la région d'étude (cette partie est traitée à la section 2.2.7);
2. Identifier et **définir des groupes d'eau** ayant des caractéristiques géochimiques distinctes et préciser leurs compositions chimiques et leurs répartitions spatiales;
3. Identifier et expliquer les **processus géochimiques** contrôlant les caractéristiques géochimiques des groupes d'eau et en déduire les implications sur les conditions hydrogéologiques;
4. Déduire les implications de la géochimie des groupes d'eau sur la **qualité des eaux souterraines** (cette partie est traitée à la section 5.4.1).

4.6.2 Définition et nature des groupes d'eau

4.6.2.1 Base de données géochimiques

La section 2.2.7 a décrit comment l'analyse d'échantillons d'eau souterraine prélevés dans le cadre du présent projet et la compilation des données géochimiques d'autres projets a permis d'assembler des données géochimiques à 389 localisations couvrant l'ensemble de la région d'étude. Afin de poursuivre l'analyse géochimique, les données compilées ont été révisées afin d'éliminer les données erronées ou incomplètes. Les échantillons conservés doivent répondre aux critères suivants :

- Posséder des résultats analytiques pour chacun des ions majeurs suivants : HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^- , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ ;
- Présenter un bilan ionique acceptable : la somme des cations majeurs et des anions majeurs, exprimés en meq/L, doit être située entre -15% et +15%.

Au total, 318 échantillons provenant de puits distincts répondent à ces critères. De plus, 37 échantillons supplémentaires provenant de divers rapport d'expertise hydrogéologique mais ayant des résultats analytiques incomplets, sans concentrations pour le potassium (K^+), ont pu être intégrés. Il a été possible d'attribuer un groupe d'eau à chacun de ces 37 échantillons en négligeant le potassium, montant ainsi à 355 le nombre d'échantillons utilisés pour l'analyse hydrogéochimique (graphs et cartes). Toutefois, seuls les 318 échantillons parfaitement conformes ont été considérés pour le calcul des statistiques descriptives et l'analyse en composantes principales présentée à la section suivante.

4.6.2.2 Définition des groupes d'eau

La définition des groupes d'eau comprend l'établissement des règles de partage utilisées pour faciliter l'identification des ressemblances et différences entre chacun des échantillons d'eau. Une fois les échantillons regroupés selon des règles bien définies, il est possible de produire des statistiques descriptives, par groupe, pour les paramètres physiques et chimiques d'intérêt. Une analyse en composante principale (ACP) a également été réalisée avec les données (par groupe) afin d'étudier les paramètres qui influencent davantage la variation de la composition des eaux à l'échelle de la région.

Tel que réalisé dans les projets antérieurs (Cloutier et al., 2008; Beaudry, 2013), l'interprétation des données hydrogéochimiques de la Chaudière-Appalaches a d'abord été tentée avec des méthodes d'analyses multivariées (*clustering* et analyse en composantes principales, ACP). Cependant, appliqués à la présente base de données, ces méthodes n'ont pas permis d'obtenir des regroupements d'échantillons géochimiques cohérents. Les groupes définis par *clustering* étant entremêlés en termes de compositions géochimiques ainsi qu'en termes de répartition spatiale sur le territoire étudié. Le traitement statistique multivarié n'étant pas concluant, les groupes ont dû être formés sur la base plus traditionnelle, soit selon les proportions relatives en ions majeurs.

Sept (7) groupes d'eau ont donc été définis d'après les proportions relatives en ions majeurs telles que représentées sur un diagramme de Piper (figure 4.14). Le tableau 4.4 présente cette définition de façon quantitative. Il est à noter que le groupe 4 correspond simplement aux échantillons exclus, soit les échantillons ne répondant pas aux critères de répartition des 6 autres groupes. Dans la définition des groupes, tous les échantillons sont traités sans distinction quant au type d'aquifère (granulaire ou fracturé). Pour le reste de l'étude hydrogéochimique, les groupes seront identifiés selon leur numéro (1 à 7) ainsi que la couleur leur ayant été attribuée au tableau 4.4 ainsi qu'à la figure 4.14.

Les diagrammes de Stiff de la figure 4.14B présentent quelques évidences sur les caractéristiques géochimiques de chacun des groupes :

- Groupe 1 (orange): Eau de type Mg-HCO₃ pouvant être qualifié de « magnésienne ».
- Groupe 2 (vert): Eau de type Ca-HCO₃ aux proportions typiques des eaux de recharge.
- Groupe 3 (jaune): Eau de recharge de type Ca-HCO₃, semblable aux eaux du groupe 2, mais avec une plus grande proportion en chlorures (Cl⁻) et/ou nitrates (NO₃⁻) et sulfates (SO₄⁻).
- Groupe 4 (bleu): Eau de type Na-HCO₃ semblable au groupe 2, mais enrichie en Na et Cl.
- Groupe 5 (violet): Eau de type Na-HCO₃, présentant moins de Cl et de Ca que le groupe 4.
- Groupe 6 (rouge): Eau de type Na-HCO₃ ayant le profil type d'une évolution selon le mécanisme d'échange ionique Na-Ca : forte proportion de sodium (Na) et peu ou pas de calcium (Ca). Semblable au groupe 5, mais plus évoluée.
- Groupe 7 (bleu clair): Eau de type Na-Cl extrêmement chargée en sels et autres matières dissoutes totales, pouvant être associée à une eau marine ou contaminée.

Tableau 4.4 : Règles quantitatives définissant les 7 groupes d'eau, basées sur les proportions ioniques relatives exprimées en pourcentage (% meq/L)

Groupes d'eau :		Compositions ioniques relatives (% meq/L)													
		1		2		3		4		5		6		7	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Cations	Mg ²⁺	50	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ca ²⁺	-	-	60	100	60	100	-	-	20	70	0	20	20	100
	Na ⁺ + K ⁺	0	30	0	40	0	40	-	-	30	80	80	100	40	100
Anions	Cl ⁻ + NO ₃ ⁻	0	20	0	20	20	100	-	-	0	30	-	-	70	100
	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻	80	100	80	100	0	80	-	-	70	100	-	-	0	30

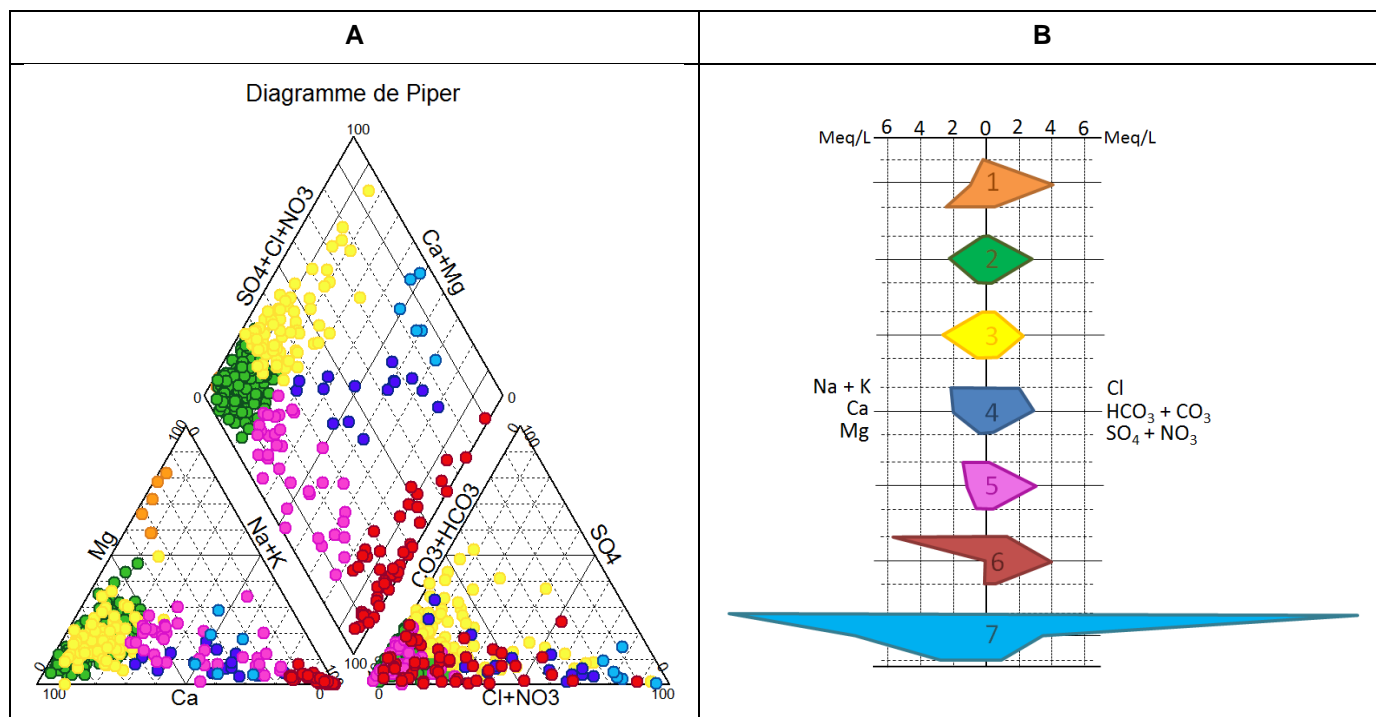


Figure 4.14 : Définition et représentation des 7 groupes d'eau selon leurs proportions d'ions majeurs. A) Diagramme de Piper représentant la composition relative en ions majeurs. B) Diagrammes de Stiff illustrant la composition ionique médiane pour chacun des 7 groupes d'eau

La carte de la figure 4.15 présente la répartition géographique des groupes d'eau, tout en faisant la distinction entre les puits de l'aquifère rocheux et les puits des aquifères granulaires. La répartition spatiale des groupes d'eau présente certaines tendances générales :

- Le groupe 1 est limité exclusivement aux environs de Thetford Mines, dans les Appalaches au sud-ouest de la région où on retrouve des roches ultramafiques magnésiennes;
- Le groupe 2 est réparti sur l'ensemble du territoire, mais il prédomine dans les Appalaches.
- Le groupe 3 est présent surtout dans la vallée de la rivière Chaudière ainsi que les vallées adjacentes de ses principaux affluents, dans les Appalaches;
- Les groupes 4, 5, 6 et 7 sont présents principalement dans les basses-terres, bien qu'on retrouve ces types d'eau de façon éparse sur tout le territoire, principalement dans la vallée de la rivière Chaudière et les vallées adjacentes de ses principaux affluents.

Sur la base de la répartition des groupes d'eau souterraine, quatre (4) zones géochimiques ont été définies en Chaudière-Appalaches, telles que montrées aussi sur la carte de la figure 4.15 :

- 1 : La zone d'eau magnésienne du groupe 1 est restreinte à la région de Thetford Mines;
- 2 : La zone appalachienne, présente au-delà de la limite marine, où on retrouve des eaux peu évoluées de type recharge, principalement le groupe 2;
- 3 : La zone d'eaux évoluées, présente sous la limite marine qui représente l'extension de la Mer de Champlain (trait bleu), où les eaux des groupes 5 et 6 dominent;
- La zone d'effet anthropique, où se trouvent des types d'eau présentant des évidences de dégradation par les activités anthropiques (surtout le groupe 3, mais aussi les groupes 4 et 7). Cette zone est présente principalement dans la vallée de la rivière Chaudière et les vallées adjacentes de ses principaux affluents.

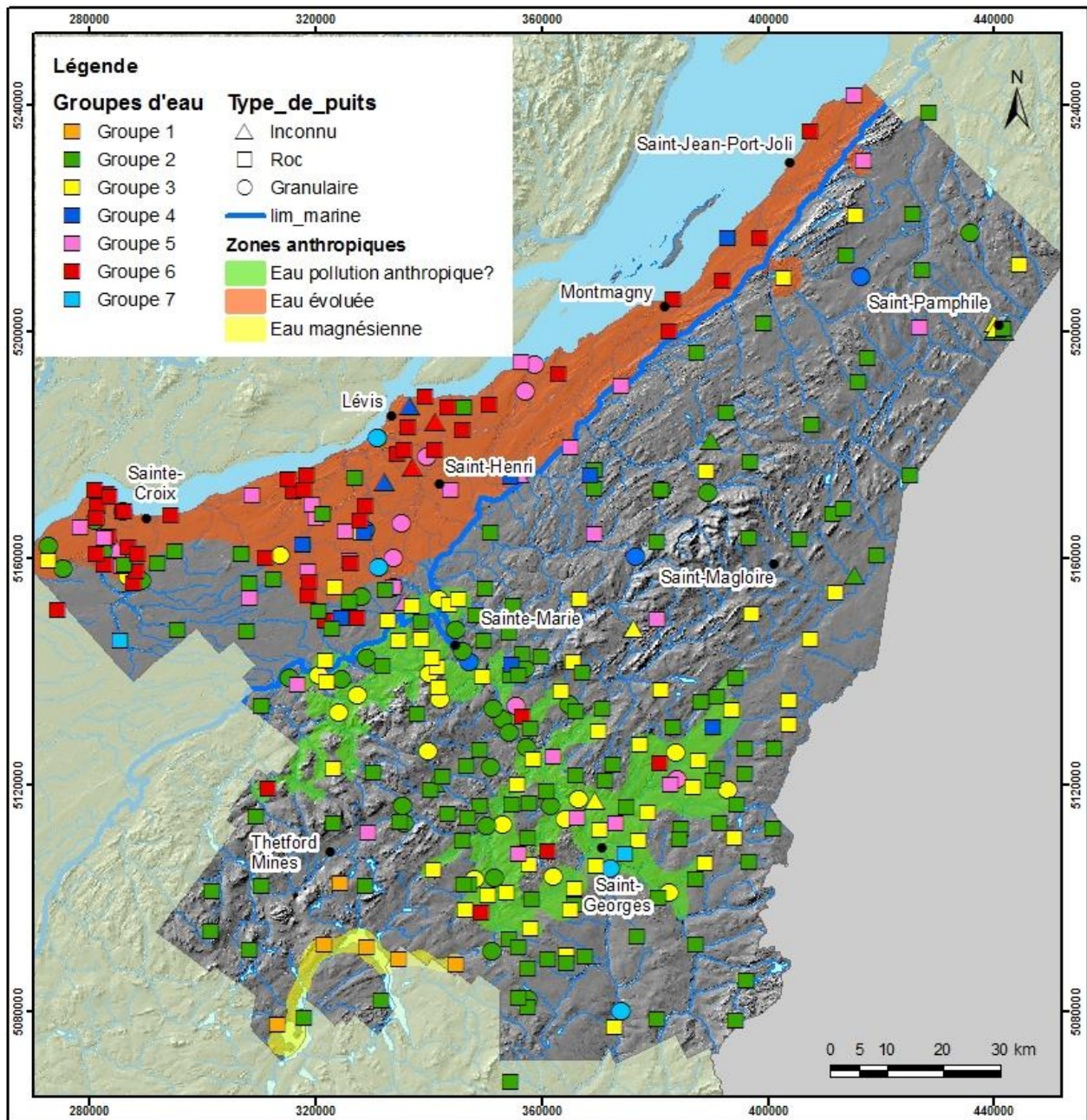


Figure 4.15 : Répartition spatiale des groupes d'eau ainsi que des zones géochimiques

4.6.2.3 Statistiques descriptives des groupes d'eau

Les caractéristiques physico-chimiques des groupes d'eau sont résumées au tableau 4.5 pour les principaux paramètres analytiques. Le nombre d'échantillons de référence (N) composant chaque groupe y est indiqué. Pour chaque paramètre, la valeur la plus élevée est indiquée en gras et la valeur la plus faible est soulignée. Tel que mentionné précédemment, 318 échantillons ont servi aux calculs statistiques. Les résultats analytiques inférieurs à la limite de détection n'étant pas considérés lors des calculs statistiques, certains centiles ont dû être calculés en référence à une valeur de N inférieure au N du groupe. Le nouveau nombre d'échantillons de référence (N) est alors indiqué entre parenthèses.

Tableau 4.5 : Statistiques descriptives (25^e, 50^e et 75^e percentiles) des paramètres physiques et des éléments majeurs, calculées par groupe d'eau

	Paramètre (unités)	Centile	Gr 1 N=6	Gr 2 N=140	Gr 3 N=68	Gr 4 N=15	Gr 5 N=34	Gr 6 N=49	Gr 7 N=6
Paramètres physiques	pH	25	7.67	7.12	6.51	6.52	7.56	8.52	7.28
		50	7.73	7.52	<u>7.02</u>	7.02	7.93	9.01 (48)	7.36 (5)
		75	7.80	7.82	7.56	7.82	8.23	9.43	7.55
	Eh	25	170.3	251.3	249.6	8.3	210.1	16.7	154.2
		50	210	253.2	252.3	253.1	263.5	<u>146.0</u>	258.0
		75	254.8	335.2	253.6	395.6	363.4	252.3	263.5
	O.D. (mg/L)	25	0.54	0.50	0.82	0.77	0.44	0.00	0.83
		50	0.57	1.66 (138)	2.32 (67)	1.48	0.65 (32)	<u>0.28</u> (48)	1.36 (4)
		75	0.71	4.41	5.52	7.31	3.37	1.05	2.86
	MDT (mg/L)	25	328.6	203.2	166.4	131.4	230.3	401.0	1303.2
		50	370.5	<u>273.8</u>	304.8	401.2	319.9	561.6	1602.5
		75	648.2	395.7	436.5	621.5	501.0	894.6	2270.8
	CS (mS/cm)	25	0.27	0.17	0.15	0.2	0.19	0.27	1.4
		50	0.36	<u>0.24</u> (138)	0.29	0.34	0.29 (32)	0.62 (47)	2.19 (4)
		75	0.65	0.35	0.39	0.5	0.47	1.17	3.3
Éléments majeurs	Ca (mg/L)	25	17	32	27.5	12	15.8	1.4	144.6
		50	20.5	44	53.5	42	26	<u>3.7</u> (48)	155
		75	26.3	64	78.5	67.5	40.5	7.9	190
	Mg (mg/L)	25	23.3	3.4	4	2.7	3.6	0.3	11.6
		50	31	6.1	6.7	4.5	7	<u>0.9</u> (46)	33.7
		75	54.5	8.5	11	5.5	11	1.8	103.5
	Na (mg/L)	25	2.3	3.1	5.03	23.5	17.3	92.4	267.5
		50	<u>4.8</u>	5.6	8.05	47	32	130	360
		75	6.2	9.6	19	97	50.2	228.6	453.7
	HCO ₃ (mg/L)	25	218.5	118.09	75.3	47.5	119.0	185.8	107.5
		50	243.2	163.9	<u>133.3</u>	169.9	185.3	219.3	207
		75	431.6	219.25	173	218.9	310.2	338.9	263.7
	Cl (mg/L)	25	0.9	0.92	6.95	28.5	1.3	14	630
		50	<u>2</u>	2.65	19	71	5.4	40	799
		75	6.1	9	43.5	130	14.8	99	1037
SO ₄ (mg/L)	25	8.8	8.05	13.75	11.4	8.9	10.8	32	
	50	15.5	<u>12</u>	27.5	18	15	19.5 (48)	43	
	75	21	20	44.75	27	19.5	33.3	51.8	

Tableau 4.5 (suite 1) : Statistiques descriptives (25^e, 50^e et 75^e percentiles) des paramètres physiques et des éléments majeurs, calculées par groupe d'eau

Paramètre (unités)	Centile	Gr1 N=6	Gr2 N=140	Gr3 N=68	Gr4 N=15	Gr5 N=34	Gr6 N=49	Gr7 N=6	
Éléments mineurs	K (mg/L)	25	0.44	0.41	0.55	1.8	0.96	0.87	2.43
		50	<u>0.53</u>	0.62	0.93	2.2	2.00	1.75 (48)	3.3
		75	0.63	1.83	1.8	4.5	4.68	2.84	3.97
	Si (mg/L)	25	8.58	4.7	4.4	3.42	4.63	3.75	3.59
		50	11.5	5.8 (139)	5.5 (67)	4.95	5.35	<u>4.30</u> (48)	5.35
		75	14.5	7.2	6.3	5.6	6.48	5.06	7.83
	Sr (mg/L)	25	0.14	0.27	0.22	0.11	0.33	0.06	0.87
		50	<u>0.17</u>	0.42	0.44	0.53	0.84	0.20 (48)	1.70
		75	0.19	0.71	0.74	0.80	1.48	0.48	2.90
	F (mg/L)	25	–	0.1	0.09	0.14	0.20	0.40	0.17
		50	–	0.1 (56)	<u>0.1</u> (23)	0.15 (7)	0.26 (25)	0.71 (47)	0.20 (4)
		75	–	0.17	0.14	0.2	0.48	1.60	0.23
	Fe (mg/L)	25	0.30	0.003	0.004	0.002	0.02	0.01	0.46
		50	0.42 (4)	0.04 (94)	0.02 (56)	<u>0.01</u> (9)	0.07 (15)	0.01(16)	0.91 (3)
		75	0.61	0.26	0.15	0.27	0.49	0.43	0.96
	NO ₃ +NO ₂ (mg N/L)	25	0.09	0.08	0.18	0.39	0.04	0.03	1.13
		50	0.16 (2)	0.27 (99)	0.57 (54)	1.70 (12)	0.08 (16)	<u>0.05</u> (18)	2.20 (3)
		75	0.23	0.97	1.5	3.74	1.19	0.36	2.77
	NH ₄ (mg/L)	25	0.02	0.04	0.02	0.02	0.07	0.12	0.07
		50	<u>0.02</u> (2)	0.07 (70)	0.03 (38)	0.18 (7)	0.17 (28)	0.22 (43)	0.13 (5)
		75	0.02	0.18	0.06	0.82	0.85	0.49	0.18
	CH ₄ (µg/L)	25	–	30.75	13.5	747.1	38	2414.3	24
		50	–	69.5 (10)	26 (4)	1455.2 (2)	120 (9)	11152 (18)	<u>24</u> (1)
		75	–	198.25	41	2163.3	450.1	15969.5	24
	COD (mg/L)	25	0.57	0.49	0.58	1.47	1.09	0.91	1.60
		50	1.12	<u>0.83</u> (130)	0.89 (62)	2.60 (13)	1.56 (32)	1.50 (31)	1.70 (5)
		75	1.85	1.8	1.55	3.40	2.68	2.55	1.78
Br (mg/L)	25	–	0.01	0.009	0.02	0.01	0.02	0.08	
	50	–	<u>0.01</u> (75)	0.015 (49)	0.03 (8)	0.02 (11)	0.13 (23)	0.10 (4)	
	75	–	0.02	0.022	0.05	0.03	0.37	0.10	
Li (mg/L)	25	–	0.0017	0.002	0.001	0.01	0.03	0.005	
	50	–	0.003 (86)	0.004 (54)	<u>0.003</u> (8)	0.02 (21)	0.05 (42)	0.02 (5)	
	75	–	0.01	0.009	0.01	0.04	0.13	0.06	

Tableau 4.5 (suite 2) : Statistiques descriptives (25^e, 50^e et 75^e percentiles) des paramètres physiques et des éléments majeurs, calculées par groupe d'eau

Paramètre (unités)	Centile	Gr1 N=6	Gr2 N=140	Gr3 N=68	Gr4 N=15	Gr5 N=34	Gr6 N=49	Gr7 N=6	
Éléments traces	Mn (mg/L)	25	0.098	0.004	0.003	0.003	0.02	0.003	0.04
		50	0.195	0.08 (131)	0.08 (67)	0.04	0.07	<u>0.01</u> (48)	0.38
		75	0.268	0.3	0.26	0.26	0.21	0.029	1.66
	B (mg/L)	25	0.02	0.005	0.006	0.01	0.04	0.12	0.01
		50	0.02 (1)	0.01 (94)	<u>0.007</u> (57)	0.04 (12)	0.06 (32)	0.34 (48)	0.02 (4)
		75	0.02	0.03	0.014	0.05	0.18	0.54	0.04
	Ba (mg/L)	25	0.01	0.01	0.014	0.06	0.05	0.05	0.15
		50	<u>0.01</u>	0.04 (137)	0.04 (67)	0.14	0.11	0.09	0.19
		75	0.02	0.1	0.078	0.28	0.45	0.30	0.26
	Br (mg/L)	25	–	0.01	0.009	0.02	0.01	0.02	0.08
		50	–	<u>0.01</u> (75)	0.015 (49)	0.03 (8)	0.02 (11)	0.13 (23)	0.10 (4)
		75	–	0.02	0.022	0.05	0.03	0.37	0.10
	Li (mg/L)	25	–	0.0017	0.002	0.001	0.01	0.03	0.005
		50	–	0.003 (86)	0.004 (54)	<u>0.003</u> (8)	0.02 (21)	0.05 (42)	0.02 (5)
		75	–	0.01	0.009	0.01	0.04	0.13	0.06

Notes : Le nombre d'échantillons de référence (N) est indiqué entre parenthèses lorsqu'il diffère du N indiqué en entête. **Valeurs en gras** : maximum des valeurs médianes pour un paramètre. Valeurs soulignées : minimum des valeurs médianes pour un paramètre.

4.6.2.4 Analyse en composante principale (ACP)

Afin de mieux comprendre la variabilité de la composition de l'eau souterraine à l'échelle régionale, l'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à l'aide du logiciel Statistica. L'ACP permet de présenter la composition des échantillons en termes de composantes. L'analyse a été réalisée sur la base de 13 paramètres géochimiques jugés représentatifs : pH, MDT, HCO₃, Ba, Ca, Cl, Mg, Mn, K, Si, Na, Sr, SO₄. Le tableau 4.6 présente les résultats de l'ACP, soit les 5 premières composantes associées aux 13 paramètres considérés. Le paramètre prédominant est indiqué (en gras et souligné) pour chaque paramètre. Il a été déterminé que les 3 premières composantes sont les plus représentatives avec des proportions de la variance totale de 36.6%, 22.0% et 9.6%, respectivement.

Voici quelques observations sur les résultats de l'ACP présentés au tableau 4.6 :

- Par ordre d'importance, la 1^{re} composante est influencée par les variations des paramètres suivants: MDT, HCO₃, Ba, Sr, Cl, Mn et K. Ces paramètres peuvent être représentatifs d'une source de salinité quelconque, soit d'origine naturelle (marine) ou anthropique.
- La seconde composante est influencée par le Ca et le Mg principalement, mais aussi inversement par le Na et le pH. Cette composante pourrait refléter l'évolution des eaux souterraines par échange ionique Na-Ca ou encore être l'expression de la dureté de l'eau due à la géologie locale.
- Le Si est l'élément ayant le plus d'influence sur la 3^e composante, ce qui peut refléter le temps de contact de l'eau souterraine avec les minéraux composants les aquifères.

Tableau 4.6 : Valeur de chacun des 13 paramètres pour les 5 premières composantes de l'ACP

Paramètres	Composante 1	Composante 2	Composante 3	Composante 4	Composante 5
pH	-0.313	0.604	-0.470	-0.361	0.158
MDT	-0.882	0.297	-0.116	0.129	0.181
HCO ₃	-0.803	0.173	-0.325	0.003	0.201
Ba	-0.731	0.100	0.222	-0.377	-0.174
Ca	-0.428	-0.836	0.164	-0.030	0.145
Cl	-0.616	0.389	0.389	0.302	0.023
Mg	-0.528	-0.731	0.046	-0.051	0.093
Mn	-0.581	-0.310	-0.328	-0.002	-0.244
K	-0.559	0.129	0.402	-0.169	-0.526
Si	-0.266	-0.377	-0.627	0.207	-0.423
Na	-0.605	0.706	0.054	0.062	-0.045
Sr	-0.697	-0.478	0.107	-0.295	0.244
SO ₄	-0.541	-0.080	0.072	0.620	0.068
% Variance totale :	36.63	22.04	9.62	7.16	5.69

Valeurs en gras et soulignées : paramètres dominants pour chaque facteur.

La figure 4.16 présente les graphiques comparatifs entre les 1^{re} et 2^e composantes (A) et entre les 2^e et 3^e composantes (B). Bien que moins bien définies que la 1^{re} composante, les composantes 2 et 3 semblent donner de meilleures indications d'un effet anthropique. En effet, la 2^e composante semble reliée au niveau d'évolution naturelle des groupes d'eau puisque les groupes d'eau jugés a priori les plus évolués ont des valeurs plus élevée de la 2^e composante. De même, il est présumé que la 3^e composante reflète l'importance des effets anthropiques puisque dans ce cas ce sont les types d'eau qui sont jugés avoir subi un effet anthropique qui ont des valeurs plus fortes de cette composante. Les observations qui supportent l'hypothèse d'un effet anthropiques seront développées plus loin.

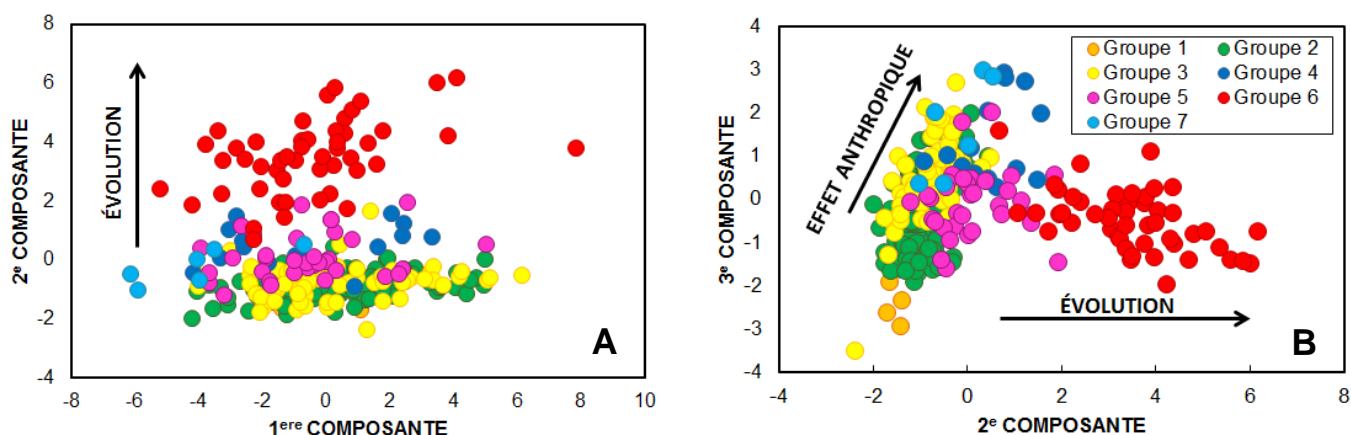


Figure 4.16 : Relations entre les 7 groupes d'eau selon les valeurs des composantes principales de l'ACP. A) 1^{re} composante en fonction de la 2^e. B) 2^e composante en fonction de la 3^e.

4.6.2.5 Processus géochimiques principaux

Une fois les groupes d'eau bien définis et quantifiés, les relations entre les groupes peuvent être étudiées à l'aide de divers graphiques géochimiques. Les graphiques jugés les plus pertinents sont présentés dans cette section selon différentes thématiques dans le but d'appuyer différentes hypothèses sur les mécanismes contrôlant l'hydrogéochimie régionale. Les thématiques discutées sont les suivantes :

- Proportions en ions majeurs
- Source des chlorures (Cl⁻)
- Échange cationique Na-Ca
- Propriétés physico-chimiques
- Datation isotopique
- Gaz dissous
- Isotopes de l'eau et droite météorique

Proportions en ions majeurs

La figure 4.17, bien que semblable au diagramme de Piper (figure 4.14A), illustre la variation dans la composition en ions majeurs des groupes d'eau. Afin d'en faciliter l'interprétation, le graphique est divisé en 4 quadrants. Le quadrant supérieur gauche regroupe les eaux de type Na-HCO₃; le cadran supérieur droit, les eaux de type Ca-HCO₃ et Mg-HCO₃; les eaux de type Ca-Cl, Ca-SO₄ et Mg-SO₄ sont dans le quadrant inférieur droit; et les eaux Na-Cl et Na-SO₄ dans le quadrant inférieur gauche.

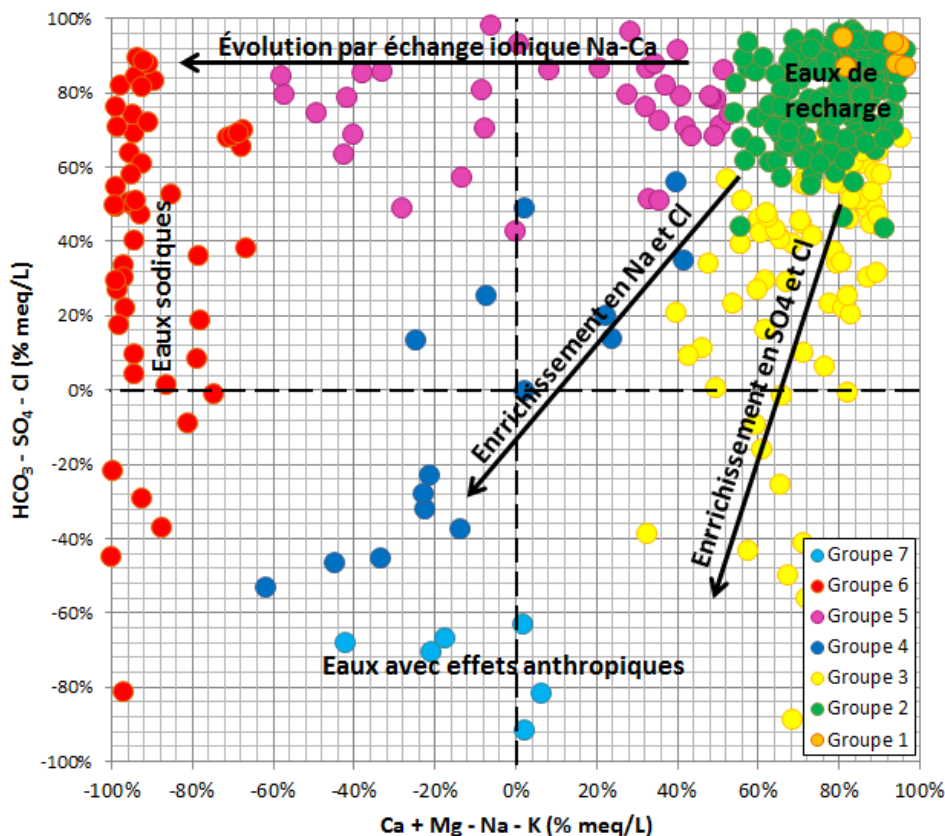


Figure 4.17 : Concentrations relatives des cations majeurs (Ca, Mg, Na, K) en fonction des anions majeurs (HCO₃, SO₄, Cl) pour chacun des échantillons identifiés selon leur groupe d'eau respectif.

La figure 4.17 permet de soutenir l'interprétation suivante des principaux processus géochimiques et des relations entre les groupes d'eau qui sera développée et appuyée par d'autres graphiques géochimiques :

- Les groupes 1, 2 et 3 se situent près du pôle typique aux eaux de recharge, jeunes et peu évoluées, soit des eaux de type Ca-HCO₃ ou Mg-HCO₃. Le groupe 3 présente toutefois un enrichissement en SO₄⁻ et Cl⁻ au détriment du HCO₃⁻. La composition géochimique du groupe 1 est particulière, car riche en Mg. Les quelques échantillons de ce groupe sont présents uniquement dans le secteur de Thetford Mines où des lithologies mafiques magnésiennes sont présentes.
- Les groupes 5 et 6 se déplacent radicalement vers la gauche du graphique, soit vers les eaux de type Na-HCO₃. Cet enrichissement en Na peut être causé par un échange ionique entre Na et Ca, ce qui met en solution du Na adsorbé dans l'aquifère. Ce mécanisme sera élaboré plus loin.
- Les groupes 4 et 7 évoluent en direction du pôle Na-Cl ou Na-SO₄, soit à l'opposé des eaux de recharge. Le pôle Na-Cl est typique des eaux marines, ce qui, dans le présent cas, ne concorde pas avec le contexte régional où on retrouve ces types d'eau. Il est donc envisagé que cette évolution des eaux est plutôt causée par une dégradation anthropique de l'eau souterraine. La localisation géographique des eaux des groupes 4 et 7 est éparse et est parfois à l'extérieur des limites de la mer de Champlain, ce qui vient appuyer l'hypothèse de l'effet anthropique.

Sources de chlorures

Communément, les sources de chlorures dans les eaux souterraines sont les suivantes:

- Épisode d'invasion marine de l'aquifère (Armandine Les Landes et al., 2014; Cloutier et al., 2010);
- La dissolution des minéraux présents dans l'aquifère (certaines roches ignées et évaporites) peut libérer de faibles proportions des chlorures en solution (Hem, 1985);
- Les eaux de précipitations contiennent des chlorures en faible quantité. Les concentrations peuvent cependant être notables dans les régions arides et semi-arides si les précipitations subissent une évaporation importante avant de s'infiltrer dans les sols (Appelo et Postma, 2005);
- Les sources anthropiques de chlorures sont nombreuses : utilisation industrielle de HCl (effluents ou pollution atmosphérique), production pétrolière, sels liés à la production d'aliments, effluents de fosses septiques et de sites d'enfouissements ainsi que le sel déglacant sur les routes (Feth, 1981). L'épandage de fertilisants en agriculture peut également introduire différents ions, notamment les chlorures et nitrates, dans les aquifères (Appelo et Postma, 2005).

Considérant les contextes géologique, climatique et anthropique de la Chaudière-Appalaches, les sources de chlorures les plus probables sont les vestiges de la mer de Champlain dans les basses-terres du St-Laurent (sous la limite marine) ainsi que des sources anthropiques. Lorsque l'origine des chlorures est marine, la proportion entre les ions chlorures (Cl⁻) et bromures (Br⁻) est constante. La figure 4.18 présente la relation entre les concentrations en Cl⁻ et en Br⁻ pour les échantillons de chacun des groupes d'eau. Les compositions typiques de l'eau de mer (Hem, 1985) et de l'eau de la mer de Champlain, diluée par l'eau de fonte des glaciers (selon Cloutier et al., 2010), sont représentées sur le graphique. La ligne de dilution de l'eau de mer passe par ces 2 points. Ainsi, les échantillons dont les proportions en Cl et Br se rapprochent de la ligne de dilution de l'eau de mer ont possiblement une origine marine. À l'inverse, les échantillons s'éloignant de cette ligne, et présentant un excès de Cl⁻ par rapport au Br⁻, sont possiblement affectés par une contamination anthropique puisqu'il y a très peu de processus naturels pouvant ajouter des Cl à l'eau souterraine. La figure 4.18 montre que la plupart des eaux du groupe 6 (rouge), quelques échantillons du groupe 5 (violet) ainsi que quelques échantillons du groupe 2 (vert) suivent la tendance de la ligne de dilution de l'eau de mer. Quant aux échantillons des groupes 3 (jaune), 4 (bleu) et 7 (bleu clair), ils sont pour la plupart au-delà de la limite des effets anthropiques, à l'écart de la ligne de dilution de l'eau de mer. Il faut toutefois une interprétation plus fine pour identifier les types d'activités anthropiques qui auraient pu causer cette augmentation des concentrations en Cl.

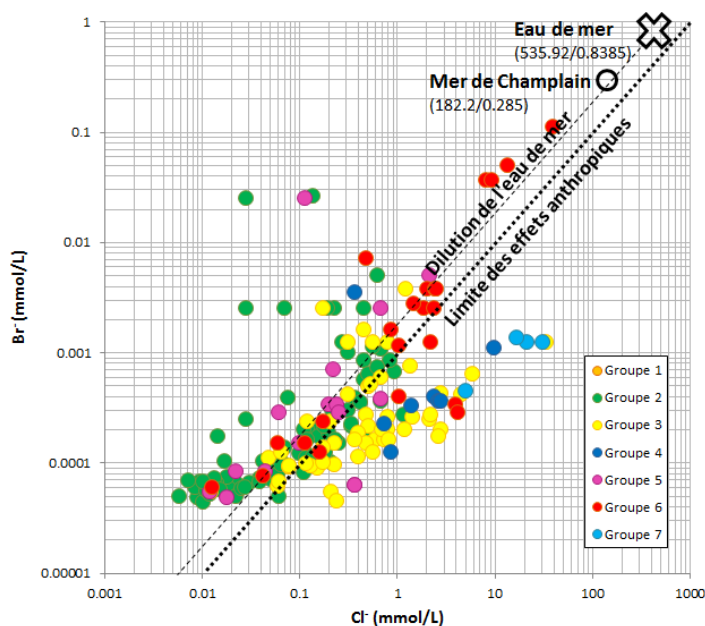


Figure 4.18 : Concentration en chlorures (Cl⁻) en fonction des concentrations en bromures (Br⁻) pour les échantillons de chacun des 7 groupes d'eaux. La composition de l'eau de mer est illustrée par une croix (Hem, 1985) et la composition de l'eau de la mer de Champlain (Cloutier et al., 2010) par un cercle. La ligne de dilution de l'eau de mer et la limite des effets anthropiques (surplus en Cl⁻) sont indiquées

L'étude de Panno et al. (2006) a porté sur les sources de Na et Cl dans les eaux souterraines dans un contexte nord-américain. La figure 4.19 montre un graphique du rapport Cl/Br en fonction des concentrations en Cl où Panno et al. (2006) ont défini des zones représentant l'origine naturelle ou anthropique de l'eau. Ces zones ont été définies à partir d'échantillons d'eau d'origines connues.

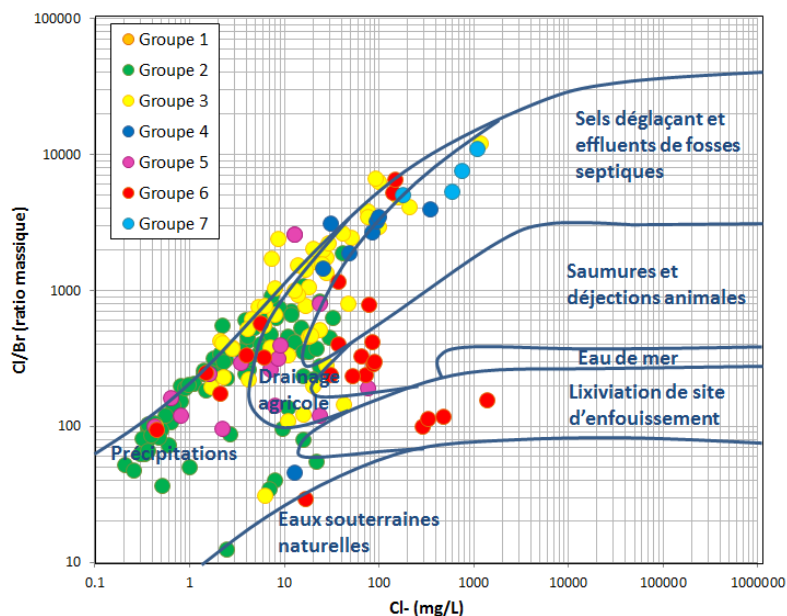


Figure 4.19 : Échantillons identifiés par leur groupe d'eau par rapport aux champs reliés à différents effets naturels et anthropiques selon le rapport Cl/Br et les concentrations en Cl (selon Panno et al., 2006)

Les échantillons d'eau souterraine de la Chaudière-Appalaches, identifiés par les groupes d'eau, sont superposés au graphique de Pano et al. (2006) de la figure 4.19 afin d'identifier leurs origines possibles. On y note deux tendances distinctes dans les échantillons de Chaudière-Appalaches. Les eaux du groupe 2 (vert) sont regroupées près du secteur des eaux de précipitations (eaux jeunes, de recharge), ce qui est cohérent avec leur type d'eau Ca-HCO₃ et le lien présumé du groupe 2 avec une recharge récente. Les eaux des groupes 3 (jaune), 4 (bleu), et 7 (bleu clair) sont reliées plutôt aux zones représentant du drainage agricole, des sels déglaçants et des effluents de fosses septiques. Les eaux des groupes 5 (violet) et 6 (rouge) présentent une tendance en direction de l'eau de mer, ce qui est cohérent avec leur niveau d'évolution important et les indications fournies par la figure 4.16. La figure 4.19 donne donc une autre indication que les groupes d'eau 2, 5 et 6 auraient des compositions naturelles, tandis que les compositions des groupes d'eau 3, 4 et 7 auraient été affectées par des effets anthropiques.

Échange cationique Na-Ca

L'adsorption du Na par les minéraux argileux présents dans un aquifère est un processus naturel qui se produit notamment lors de l'intrusion d'eau douce dans un aquifère salin (Appelo et Postma, 2005). Progressivement, lorsque l'eau douce vient adoucir l'aquifère, les ions Na sont remis en solution et les ions Ca viennent alors prendre leur place au niveau des sites d'adsorption des minéraux argileux. Une eau de type Ca-HCO₃ évolue donc vers le type Na-HCO₃ au contact de cet aquifère. Tel que démontré par Cloutier et al. (2010), un tel phénomène se produit dans les aquifères rocheux des basses-terres du St-Laurent qui ont été sous la limite marine. On s'attend donc à retrouver des évidences de ce phénomène dans la partie nord de la région d'étude qui est à l'intérieur des limites de l'ancienne mer de Champlain (figure 4.15). Afin de distinguer l'apport de sodium résultant de l'échange ionique de tout autre apport en sodium, les figures 4.20A et 4.20B mettent en relation, respectivement, les concentrations en Na et Cl ainsi qu'entre les concentrations en Ca et Na. Sur la figure 4.20A, la ligne pointillée représente un rapport 1:1 entre les deux ions. Les flèches indiquent quant à elles deux tendances évolutives, soit un enrichissement en Na causé par l'échange ionique avec le Ca ainsi qu'un enrichissement en Cl dû à une contamination anthropique des eaux. Les deux mêmes tendances évolutives sont aussi indiquées à la figure 4.20B.

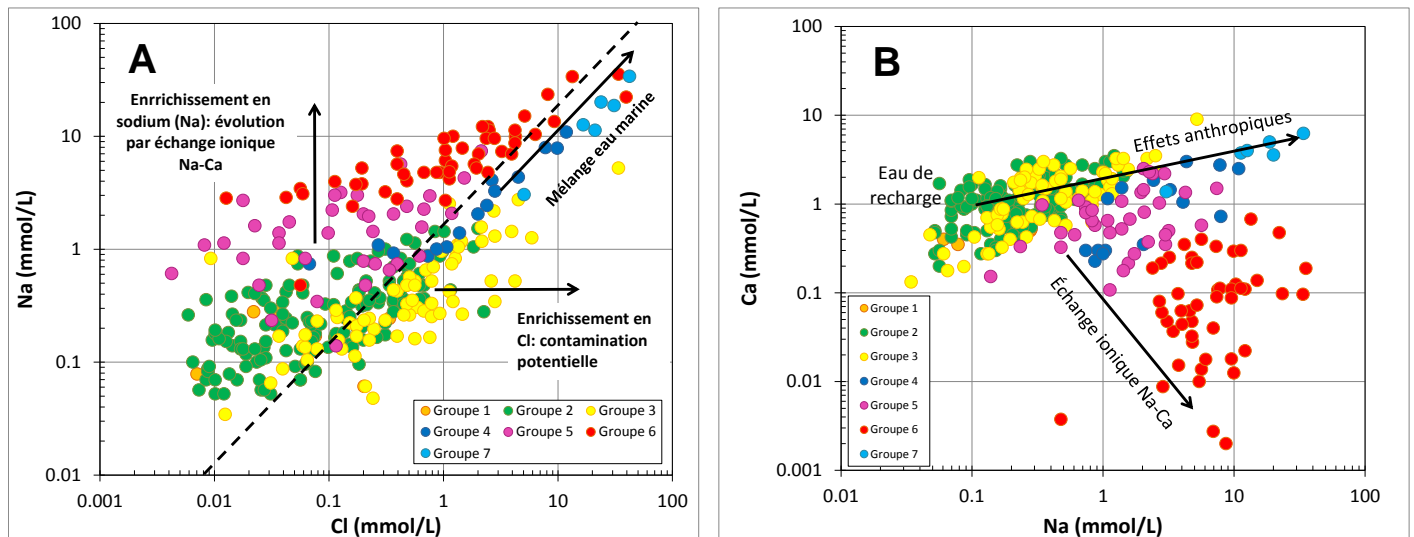


Figure 4.20 : Évidences de l'échange ionique Na-Ca. A) Cl en fonction de Na. B) Na en fonction de Ca.

Sur la figure 4.20A, les échantillons au-dessus de la ligne pointillée (rapport 1:1) présentent un excès de sodium par rapport au Cl. Cet excès est interprété comme résultant de l'échange ionique Na-Ca pour les eaux des groupes 5 (violet) et 6 (rouge), et dans une moindre mesure pour le groupe 2 (vert). Toutefois, pour les eaux des groupes 1 (orange) et 2 (jaune), l'échange ionique ne peut expliquer tout l'excès étant donné que ces groupes d'eau se situent majoritairement hors des limites de la mer de Champlain. Les échantillons sous cette même ligne pointillée présentent un excès de Cl par rapport au Na. Cet excès de Cl peut être dû à divers effets anthropiques (figure 4.19), tel que du drainage agricole ou tout autre apport de Cl autre que l'halite (NaCl). Il est à noter que les échantillons présentant un excès en Cl sont, à deux exceptions près, situés dans le bassin versant de Chaudière, là où l'on retrouve une activité agricole plus intense et une plus grande densité de population. Les groupes d'eau 4 (bleu) et 7 (bleu pâle) évoluent sur la ligne pointillée peuvent être contaminés au sel déglaçant ou toute autre source de NaCl. La figure 4.20B montre aussi l'effet de l'échange ionique Ca-Na par la tendance des échantillons des groupes 5 (mauve) et 6 (rouge) vers le coin inférieur droit du graphique, ce qui correspond à un enrichissement en Na concomitante à une réduction de la concentration en Ca. Les groupes d'eau 4 (bleu) et 7 (bleu clair) tendent vers le coin supérieur droit, soit un enrichissement proportionnel en Na et Ca, pouvant être le résultat d'une contamination anthropique. Les effets anthropiques sont plus clairement apparents sur la figure 4.20B pour les groupes 4 (bleu foncé) et 7 (bleu pâle) et ils correspondent à des augmentations simultanées des concentrations en Ca et en Na.

Propriétés physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines peuvent fournir des indications générales sur leur niveau d'évolution. La figure 4.21A compare les valeurs médianes en oxygène dissous et en pH pour chacun des 7 groupes d'eau. Il est attendu que les eaux de recharge, soient les groupes 1 (orange), 2 (vert) et 3 (jaune) possèdent des valeurs élevées d'oxygène dissous ainsi que des pH acides. La présence d'oxygène dissous étant un indice de l'infiltration d'eau jeune (Hounslow, 1995), elle est associée à une plus grande vulnérabilité des aquifères, donc sujette à une contamination anthropique potentielle. L'évolution normale des eaux en présence de minéraux carbonatés tend vers un pH plus élevé ainsi qu'une disparition de l'oxygène dissous. Les groupes d'eau 5 (violet) et 6 (rouge) montrent cette tendance, pour deux niveaux différents d'évolution de l'eau.

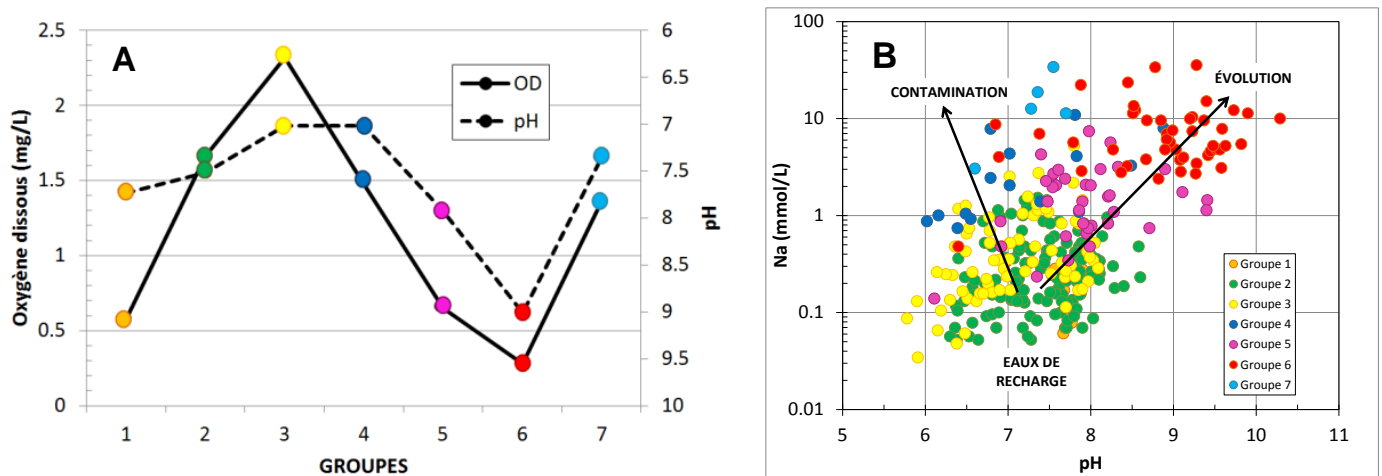


Figure 4.21 : Paramètres physico-chimiques des groupes d'eaux. A) Valeurs médianes de l'oxygène dissous et du pH. B) Évolution du Na par rapport au pH pour les échantillons par groupes d'eau

Au contraire, les groupes d'eau présumés être affectés par les activités anthropiques ne montrent pas ces indications de l'évolution naturelle de l'eau souterraine. Ainsi, les groupes d'eau 3, 4 et 7 ont des pH acides et contiennent de l'oxygène dissous, montrant que les composés qui les caractérisent (Cl, SO₄ et NO₃ pour le groupe 3; Cl, Na et Ca pour les groupes 4 et 7) résultent d'apports récents à partir de la surface plutôt que d'une évolution naturelle de l'eau souterraine. La figure 4.21B montre bien cette distinction entre l'évolution naturelle et l'effet anthropique. Le graphique de la figure 4.21B montre qu'il y a une augmentation du pH reliée à l'enrichissement en Na pour les groupes d'eau 2, 5 et 6, ce qui est typique de l'effet de la substitution du Ca par le Na lors de l'échange ionique (Cloutier et al., 2010). Par contre, les eaux présumées être affectées par un effet anthropique (groupes 3, 4 et 7) gardent des pH faibles (et des OD élevés), malgré l'augmentation des concentrations en Na, ce qui ne représente pas l'effet d'une évolution naturelle de l'eau souterraine.

Datation isotopique

Le carbone-14 (¹⁴C) est produit naturellement dans la haute atmosphère, et possède une demi-vie de 5730 ans; il sert notamment à dater des eaux anciennes (<30 000 ans environ) (Kazemi et al., 2006). Le ¹⁴C est incorporé dans les eaux souterraines sous forme de carbone inorganique dissous (CID) principalement lors de leur passage dans les sols riches en matière organique (Clark et Fritz, 1997). L'utilisation du ¹⁴C comme indicateur de temps de résidence est compliquée par la multitude de processus affectant le carbone dissous dans les eaux souterraines, notamment la dissolution de carbonates, l'échange avec la matrice de l'aquifère, l'oxydation de composés organiques anciens et la méthanogenèse microbienne (Clark et Fritz, 1997). Le phénomène de dissolution des carbonates, lors de l'interaction entre l'eau souterraine et l'aquifère, met en solution du carbone inorganique exempt de ¹⁴C (le ¹⁴C ayant été dégradé compte tenu de l'âge des minéraux carbonatés composant les roches). En système clos, cela engendre la dilution du ¹⁴C en solution et donc la surévaluation de l'âge des eaux souterraines (Clark et Fritz, 1997). Cette dissolution des carbonates est parfaitement illustré par les données en Chaudière-Appalaches (figure 4.22).

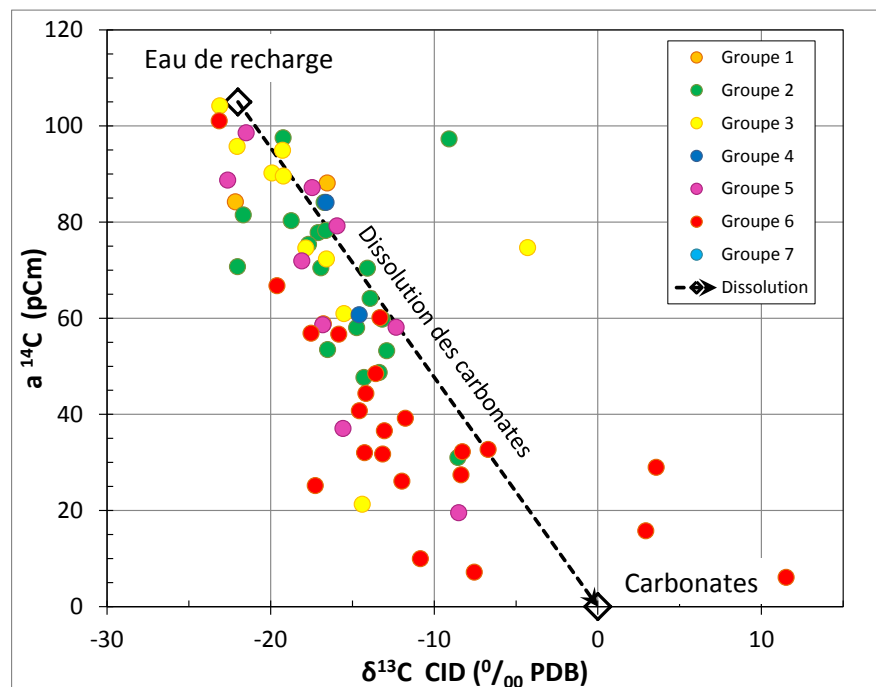


Figure 4.22 : $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ (‰ PDB) du carbone inorganique dissous (CID) en fonction de l'activité en ¹⁴C de l'eau souterraine, a¹⁴C (% de carbone moderne, pmC)

La figure 4.22 qui présente l'isotope $\delta^{13}\text{C}$ issu du carbone inorganique dissous (CID) en fonction de l'activité du ^{14}C ($a^{14}\text{C}$) exprimée en pourcentage de carbone moderne (pCm) pour les échantillons d'eau de la Chaudière-Appalache illustrées en fonction de leur groupe d'eau. Le graphique montre que l'activité du ^{14}C diminue proportionnellement avec l'augmentation de $\delta^{13}\text{C}$. De plus, cette diminution linéaire rejoint les valeurs typiques des eaux de recharge (^{14}C d'un peu plus que 100%, $\delta^{13}\text{C}$ d'environ -25) et les valeurs des minéraux (^{14}C absent, $\delta^{13}\text{C}$ de 0). Cela confirme qu'une partie importante du CID dans l'eau souterraine provient de la dissolution de carbonates et qu'une correction est requise afin obtenir un âge plus représentatif des eaux souterraines à l'aide du ^{14}C . La correction simplifiée suivante (Hoque et Burgess, 2012) a donc été appliquée :

$$^{14}\text{C}_{\text{âge (ans)}} = 8267 \times \ln\left[\left(105/^{14}\text{C}_m\right) \times \left(\delta^{13}\text{C}_m / -22\right)\right]$$

Où $^{14}\text{C}_m$ et $\delta^{13}\text{C}_m$ sont les valeurs mesurées, tandis que, d'après la figure 4.22, les valeurs représentatives des eaux de recharge sont de 105% pour le ^{14}C et de -22 pour le $\delta^{13}\text{C}$. La correction ne considère que l'effet de la dissolution des carbonates et le considère pas les autres processus; la figure 4.22 montre des valeurs positives de $\delta^{13}\text{C}$ qui pourraient résulter de l'oxydation du méthane. Les âges ^{14}C corrigés sont montrés à la figure 4.23 en relation avec le tritium. Le tritium (^3H) est un isotope radioactif naturel qui possède une demi-vie de 12.43 ans (Kazemi et al., 2006). On le retrouve dans l'atmosphère, et donc dans les précipitations. Les essais thermonucléaires réalisés entre les années 1950 et 1980 ont longtemps été la principale source de tritium atmosphérique. Cette source étant aujourd'hui enrayée, les précipitations actuelles possèdent à nouveau des concentrations naturelles (Clark et Fritz, 1997). La présence du tritium dans les eaux souterraines permet donc d'établir la présence d'une composante de recharge « moderne » puisqu'après un temps de résidence d'environ 50 ans il ne reste plus de tritium dans l'eau souterraine.

Le tableau 4.7 présente les statistiques descriptives pour les isotopes radioactifs, incluant le ^3H , l'âge ^{14}C non corrigé ainsi que l'âge corrigé, l'activité $a^{14}\text{C}$ ainsi que l'isotope $\delta^{13}\text{C}$ (CID). Puisque les analyses isotopiques ont été réalisées uniquement sur une sélection d'échantillons, les nombres d'échantillons « N » pour chacun des groupes sont inférieurs aux « N » présentés précédemment pour les groupes au tableau 4.5. Aucune analyse de datation isotopique n'a été réalisée pour le groupe 7 (N=0), la sélection des échantillons ayant été faite avant la définition des groupes d'eau. La figure 4.23 présente la concentration en tritium en fonction de l'âge ^{14}C corrigé pour chacun des échantillons analysés, identifiés par la couleur de leur groupe d'eau respectif. Selon les informations présentées au tableau 4.7 et sur la figure 4.23, il semble que le groupe 6 (rouge) correspond aux eaux les plus anciennes (médiane de 7 164 ans BP, selon l'âge ^{14}C corrigé), mais contenant une certaine composante moderne (médiane de 5.2 T.U. de ^3H).

Les groupes présentant la plus importante composante d'eau moderne sont, en ordre décroissant, les groupes 2 (vert), 3 (jaune) et 5 (violet). Ces groupes d'eau ont donc des âges isotopiques cohérents avec le fait que les autres paramètres géochimiques indiquent que ce sont des eaux de recharge. Selon les âges ^{14}C corrigés, le groupe 3 (jaune) est de loin le plus jeune (887 ans BP), suivi du groupe 1 (orange) (1384 ans BP). Les concentrations élevées en tritium et les pourcentages élevés de ^{14}C pour les groupes 3 et 4 sont une autre évidence que la géochimie de ces eaux ne représente pas une évolution naturelle mais plutôt un effet anthropique. L'absence d'analyses isotopiques des échantillons du groupe 7 ne permet pas d'avoir ces indications additionnelles d'une provenance récente et présumée anthropique. À deux exceptions près, les eaux du groupe 5 n'ont pas des âges isotopiques significativement plus importants que les eaux du groupe 2 qui représente une recharge assez récente. Toutefois, ce qui distingue ces deux groupes est la région où on les retrouve; le groupe 5 étant sous la limite marine, tandis que le groupe 2 est dans les Appalaches. On peut donc présumer que la présence historique d'eau marine a eu un effet important sur l'évolution géochimique d'eau ayant des temps de résidence équivalents.

Tableau 4.7 : Statistiques descriptives (25^e, 50^e et 75^e percentiles) des isotopes radioactifs et isotopes du carbone inorganique par groupe d'eau

Paramètre (unités)	Centile	Gr 1 N=3	Gr 2 N=15	Gr 3 N=9	Gr 4 N=1	Gr 5 N=8	Gr 6 N=11	Gr 7 N=6
³ H (T.U.)	25	5.9	8.05	8.6	-	7.4	4.24	-
	50	6.6	9.5	9.3	8.7	9.1	<u>5.2</u>	-
	75	7.2	10.7	10.06	-	9.2	9.6	-
Âge ¹⁴ C (ans BP)	25	1 200	1 839	418	-	1 646	6 494	-
	50	1 384	2 813	<u>887</u>	4 011	3 472	9 159	-
	75	2 825	4 254	2 550	-	4 365	10 158	-
Âge ¹⁴ C _{corr} (ans BP)	25	942	401	294	-	271	3003	-
	50	1 885	1 706	<u>469</u>	1 133	1 565	7 164	-
	75	2 218	2 614	1 608	-	3 388	9 956	-
a ¹⁴ C (pmC)	25	71.49	58.89	72.28	-	52.8	27.50	-
	50	84.17	70.46	89.55	60.7	65.2	<u>31.98</u>	-
	75	86.15	79.26	94.92	-	81.6	44.57	-
δ ¹³ C _{CID} (‰ PDB)	25	-19.46	-17.91	-19.91	-	-18.94	-15.92	-
	50	-16.77	-14.73	<u>-19.21</u>	-14.59	-16.37	-13.56	-
	75	-16.66	-13.63	-16.57	-	-12.31	-10.70	-

Valeurs en gras : maximum des valeurs médianes pour un paramètre.

Valeurs soulignées : minimum des valeurs médianes pour un paramètre.

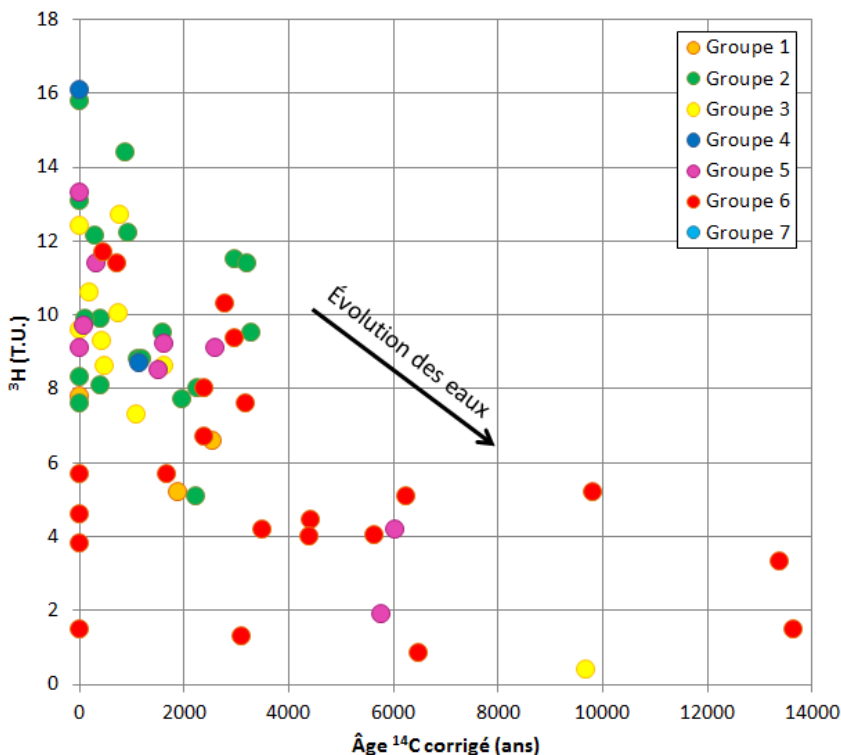


Figure 4.23 : Concentrations en tritium en fonction de l'âge ¹⁴C corrigé

Les gaz dissous

Le méthane dans les eaux souterraines peut se former dans 3 environnements distincts (Clark et Fritz, 1997). 1) Le méthane biogénique peut être présent dans les aquifères de faible profondeur et il est formé par la réduction microbienne de la matière organique. 2) Le méthane thermocatalytique est plutôt formé par la décomposition, à température élevée, d'hydrocarbures lourds. Il est associé au gaz naturel se trouvant dans les bassins sédimentaires à plus grande profondeur. 3) Le méthane abiogénique est formé en conditions extrêmement réductrices, sans intervention bactérienne, en présence d'un catalyseur inorganique (ex. : fer). La méthanogenèse microbienne dans les eaux souterraines est un phénomène très répandu; la majorité des aquifères superficiels caractérisés par des eaux peu oxygénées contiennent des quantités mesurables de méthane dissous en raison de l'activité microbienne (Gorody, 2012).

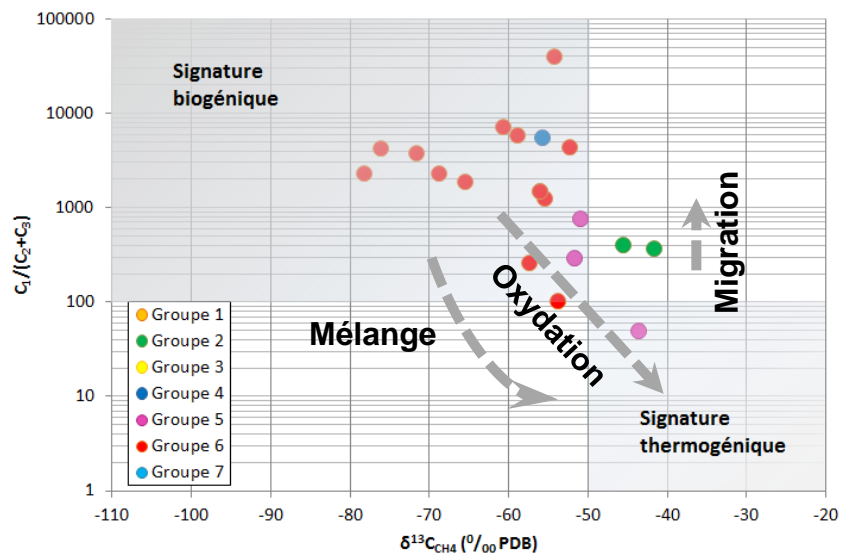


Figure 4.24 : Isotope $\delta^{13}C$ du méthane en fonction du rapport molaire méthane/(éthane+propane) (modifié de Bernard et al., 1978)

La figure 4.24 montre des indications isotopiques de l'origine du méthane (selon Bernard et al., 1978) en Chaudière-Appalaches grâce à la comparaison de l'isotope $\delta^{13}C$ du méthane et du rapport des concentrations molaires méthane/(éthane+propane). D'abord, la grande majorité des échantillons présentant des concentrations en méthane suffisantes appartient au groupe 5 (rouge) qui est le plus évolué géochimiquement. La figure 4.24 montre que la signature biogénique est prédominante, et elle implique une proportion plus importante en méthane relativement à l'éthane et au propane, ainsi qu'une composition isotopique plus légère (plus négative). Il y a toutefois une tendance des échantillons allant du champ thermogénique vers le champ biogénique qui pourrait être causée par l'oxydation du méthane, dont la signature $\delta^{13}C$ du CID donne des indications par certaines valeurs positives (figure 4.22). Toutefois, certains échantillons pourraient avoir une composante thermogénique (1 échantillon du groupe 5 principalement), ou résulter de la migration de gaz thermogénique (2 échantillons du groupe 2). Une étude plus poussée serait requise avant de tirer des conclusions plus fermes. Les résultats obtenus en Chaudière-Appalaches sont cohérents avec ce que Pinti et al. (2013) avaient montré lors de leur caractérisation des gaz dissous dans l'eau souterraine couvrant une grande partie des basses-terres du Saint-Laurent entre Bécancour et la Montérégie Est. Pinti et al. (2013) ont montré que le méthane dans les eaux souterraines de cette région a une origine biogénique dominante, bien que quelques évidences d'apport de gaz thermogéniques aient été observées dans les Appalaches. Le projet de la CGC dans Lotbinière va évaluer l'origine du méthane dans l'eau souterraine de ce secteur (Rivard et al., 2013).

Le méthane n'est pas toxique pour les humains, mais il peut présenter un risque d'explosion ou d'asphyxie lorsqu'il s'accumule dans des espaces clos (Gorody, 2012; Jackson et al., 2013). De plus, des bulles de méthane dans les puits peuvent mobiliser des particules fines qui pourront interférer avec le fonctionnement de la pompe et ainsi avoir un impact négatif sur la turbidité, la couleur, le goût et l'odeur de l'eau (Gorody, 2012). Au Québec, un seuil d'alerte de 7 mg/L de méthane a été prescrit dans le nouveau *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* adopté en 2014 (MDDELCC, 2014). Ce seuil implique que des actions doivent être entreprises pour s'assurer que la concentration en méthane n'augmente pas dans le temps et aussi que des mesures soient considérées pour ventiler le méthane avant son introduction dans la tuyauterie de la résidence. Ce seuil est considérablement sous la concentration de 28 mg/L considérée aux États-Unis comme critique et nécessitant une intervention immédiate (ventilation, changement du système d'approvisionnement en eau) (DOI, 2001). Lorsque les concentrations sont comprises entre 10 mg/L et 28 mg/L, la situation n'est pas considérée comme immédiatement dangereuse, mais une surveillance rapprochée de l'évolution de la concentration du méthane dans l'eau des puits est néanmoins recommandée (DOI, 2001).

Dans le cadre du projet PACES réalisé en Chaudière-Appalaches, des analyses ont été faites des concentrations en méthane, éthane et propane sur 74 échantillons prélevés dans la région. Sur ces analyses, 44 échantillons (59%) ont présenté des concentrations en méthane quantifiables. Les valeurs de la médiane, de la moyenne et maximale des concentrations analysées ont été de 0.2 mg/L, 5.1 mg/L et 31.2 mg/L, respectivement. Onze (11) échantillons (15% des analyses et 25% des valeurs quantifiables) ont présenté des concentrations excédant le seuil d'alerte de 7 mg/L. Deux échantillons ont présenté des concentrations excédant 28 mg/L. Tous les propriétaires des puits dont les concentrations en méthane dépassaient le seuil d'alerte ont été avisés et informés des mesures envisageables dans cette situation. Il faut mentionner que certaines de ces analyses ont été faites sur des échantillons prélevés dans des puits d'observation, notamment plusieurs des analyses montrant les plus fortes concentrations.

Isotopes de l'eau et droite météorique

Faisant partie du cycle de l'eau à l'échelle planétaire, les eaux souterraines peuvent, tout comme les eaux météoriques, être étudiées à l'aide de leur composition en isotopes stables, soit $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (Clark et Fritz, 1997). La recharge des aquifères se faisant principalement grâce aux précipitations, il est possible de comparer la signature isotopique des eaux de recharge à la droite météorique locale (DML) représentant la signature en $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations. La DML de référence a été réalisée à l'aide des résultats du suivi des précipitations pour le secteur du bassin de la rivière Chaudière dans le cadre de travaux de caractérisation géochimique ayant fait suite au projet de la CDAQ (Benoit et al., 2009 et 2014). La DML de la Chaudière est présentée à la figure 4.25A par une ligne bleue. Les DML d'Ottawa et des Basses-Laurentides (Cloutier, 2004) ainsi que la droite météorique mondiale (DMM ou communément GMWL, en anglais) (Clark et Fritz, 1997) y sont présentées à titre comparatif. La DML locale se situe entre les DML d'Ottawa et des Basses-Laurentides, montrant que les données utilisées pour l'établir sont cohérentes.

La figure 4.25B présente une comparaison entre la composition isotopique des eaux souterraines identifiées par groupe d'eau avec la droite météorique locale (DML) de Chaudière-Appalaches ainsi qu'avec la droite météorique mondiale (DMM). Les eaux souterraines s'alignent de façon générale avec la DML, bien que certains points s'en éloignent légèrement. Ceci implique que les eaux souterraines en Chaudière-Appalaches sont dérivées de l'infiltration des précipitations, que ce soit pour les types d'eau récents des zones de recharge (ex. : groupe 2) que les eaux évoluées (ex. : groupes 5 et 6).

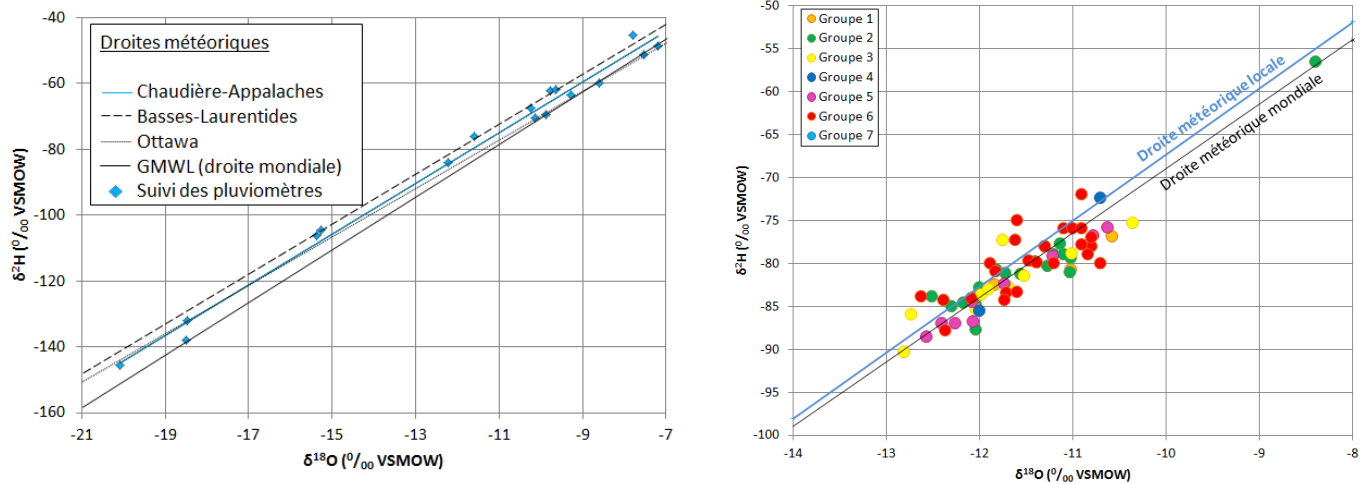


Figure 4.25 : Isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$). A) Comparaison entre les droites météoriques locales de différentes régions et la droite météorique mondiale (GMWL). B) Composition isotopique des échantillons d'eau souterraine par rapport aux droites météoriques

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 Chaudière-Appalaches 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 probants que ce qui aurait pu être développé uniquement sur la base de données hydrauliques (section 4.7). Les contributions les plus importantes de l'étude géochimique à ce niveau sont les suivantes :

- Validation de l'identification des zones préférentielles de recharge qui sont caractérisées par des eaux jeunes et peu minéralisées de type Ca-HCO₃ avec un pH acide. Les zones de recharge les plus importantes sont dans le contexte hydrogéologique des hautes-terres appalachiennes (groupes 1, 2 et 3). La présence d'eau de type Ca-HCO₃ par endroits dans les basses-terres du St-Laurent confirme qu'il s'y trouve aussi des zones de recharge locales.
- Dans les hautes-terres appalachiennes, on ne trouve que des eaux de recharge peu évoluées. Des eaux jeunes, mais avec effets anthropiques, dominent aussi dans les vallées appalachiennes. L'écoulement à l'intérieur des Appalaches pourrait donc être relativement superficiel et ne pas impliquer de longs cheminements et temps de résidence. La topographie très irrégulière pourrait contribuer à la création de cheminements d'écoulement généralement courts et rapides.
- Dans les basses-terres du St-Laurent, on trouve des eaux évoluées, et même très évoluées. Il est toutefois difficile d'évaluer si ces eaux sont reliées à de longs cheminements d'écoulement, qui prendraient leur origine dans les Appalaches, ou à des écoulements très lents à cause des faibles gradients hydrauliques qu'on y retrouve. Ces eaux sont marquées par la présence de la mer de Champlain qui donne une composante marine aux eaux et qui a laissé en place une grande quantité de sodium (Na) dans les aquifères, ce qui contribue à l'échange ionique Ca-Na.
- Enfin, les données géochimiques indiquent qu'une partie importante des vallées appalachiennes, surtout autour de la rivière Chaudière, subit une dégradation de qualité à cause d'effets anthropiques. Le fait que ces effets apparaissent dans des eaux souterraines jeunes et de type recharge montre que l'aquifère rocheux dans ce secteur est vulnérable à la contamination et cela montre aussi que les effets sur la géochimie de l'eau souterraine proviennent d'émissions relativement récentes de polluants (< 50 ans).

4.7 Synthèse des conditions hydrogéologiques

La figure 4.26 montre la localisation des trois (3) contextes hydrogéologiques définis pour la région de Chaudière-Appalaches. Le tableau 4.8 résume les conditions hydrogéologiques très distinctes retrouvées dans ces contextes et ces conditions sont brièvement décrites dans la présente section.

Le contexte des **basses-terres du St-Laurent** est caractérisé par une très faible topographie et, par endroits, une couverture argileuse épaisse (> 10 m). Ces conditions impliquent que la recharge ne se fait que localement, notamment le long de crêtes rocheuses orientées SO-NE. Le potentiel aquifère est pratiquement restreint au roc fracturé. Le très faible gradient hydraulique horizontal fait en sorte que l'écoulement de l'eau souterraine est lent et généralement dirigé vers le fleuve Saint-Laurent, sauf aux bordures des rivières Boyer et du Sud. Ce contexte se trouve aussi à l'intérieur de l'extension de la mer de Champlain. De cette situation découle la présence d'eaux évoluées ou très évoluées, montrant encore par endroit une signature marine. On retrouve aussi dans la partie ouest de ce contexte du méthane dissous dans l'eau souterraine d'origine prédominante biogénique. La qualité de l'eau souterraine est acceptable pour les eaux de type recharge mais les eaux évoluées ont une qualité acceptable à passable. Localement, des types d'eau montrant des effets anthropiques ont une qualité passable à non potable. Dans ce contexte, on retrouve assez fréquemment des dépassements des critères de potabilité pour le fluor (F) et le baryum (Ba), tandis que plusieurs critères esthétiques ont des dépassements (Cl, Na, MDT, dureté, Al, Mn, et pH alcalin). L'approvisionnement en eau dans ce contexte se fait surtout à partir de l'eau souterraine dans les MRC de Lotbinière et de L'Islet, alors que c'est l'inverse pour les MRC de Bellechasse et de Montmagny. La consommation d'eau souterraine est partagée entre les différents usages, sauf dans la MRC de Montmagny où l'usage industriel-commercial-institutionnel est faible.

Le contexte des **hautes-terres appalachiennes** montre une topographie élevée et rugueuse, avec beaucoup de variabilité. Un potentiel aquifère au roc est présent dans l'ensemble du contexte, ainsi qu'un potentiel aquifère très local associé aux dépôts fluvio-glaciaires. On y retrouve une importante recharge à cause du faible couvert de till. Une grande ligne de partage des eaux souterraines est associée aux sommets topographiques dans la Zone de Humber interne. L'écoulement diverge à partir de cette ligne avec une orientation générale NO-SE. Toutefois, l'écoulement est affecté par la topographie locale irrégulière et l'émergence dans les cours d'eau dont le réseau est dense. La meilleure qualité d'eau souterraine de la Chaudière-Appalaches est présente dans ce contexte. La consommation d'eau provient d'un approvisionnement en eau souterraine et l'usage dominant de l'eau souterraine est résidentiel.

Enfin, dans le contexte des **vallées appalachiennes**, on retrouve des accumulations variables mais parfois épaisses de sédiments, mais ces sédiments sont généralement fins et ne présentent un potentiel aquifère que très localement. C'est l'aquifère rocheux fracturé qui présente un potentiel aquifère dans l'ensemble de ce contexte. La recharge y est importante, sauf où il y a des accumulations de sédiments fins. Les gradients hydrauliques sont forts en bordure des vallées et l'écoulement se dirige vers les cours d'eau. On retrouve des eaux généralement jeunes et de type recharge dans ce contexte, mais ces eaux montrent des évidences de dégradation de qualité par les activités anthropiques. Cette dégradation n'implique toutefois pas de dépassements de critères de potabilité et il y a aussi peu de dépassements de critères esthétiques (Mn et pH acide). Il y a une utilisation importante de l'eau souterraine dans ce contexte où se trouvent plusieurs des principales municipalités de la région. Toutefois, c'est l'approvisionnement par de l'eau de surface qui domine l'approvisionnement, surtout à cause des réseaux des principales municipalités le long de la rivière Chaudière. La proportion de l'usage industriel-commercial-institutionnel de l'eau souterraine est dominante pour les MRC de la Nouvelle-Beauce et Robert-Cliche.

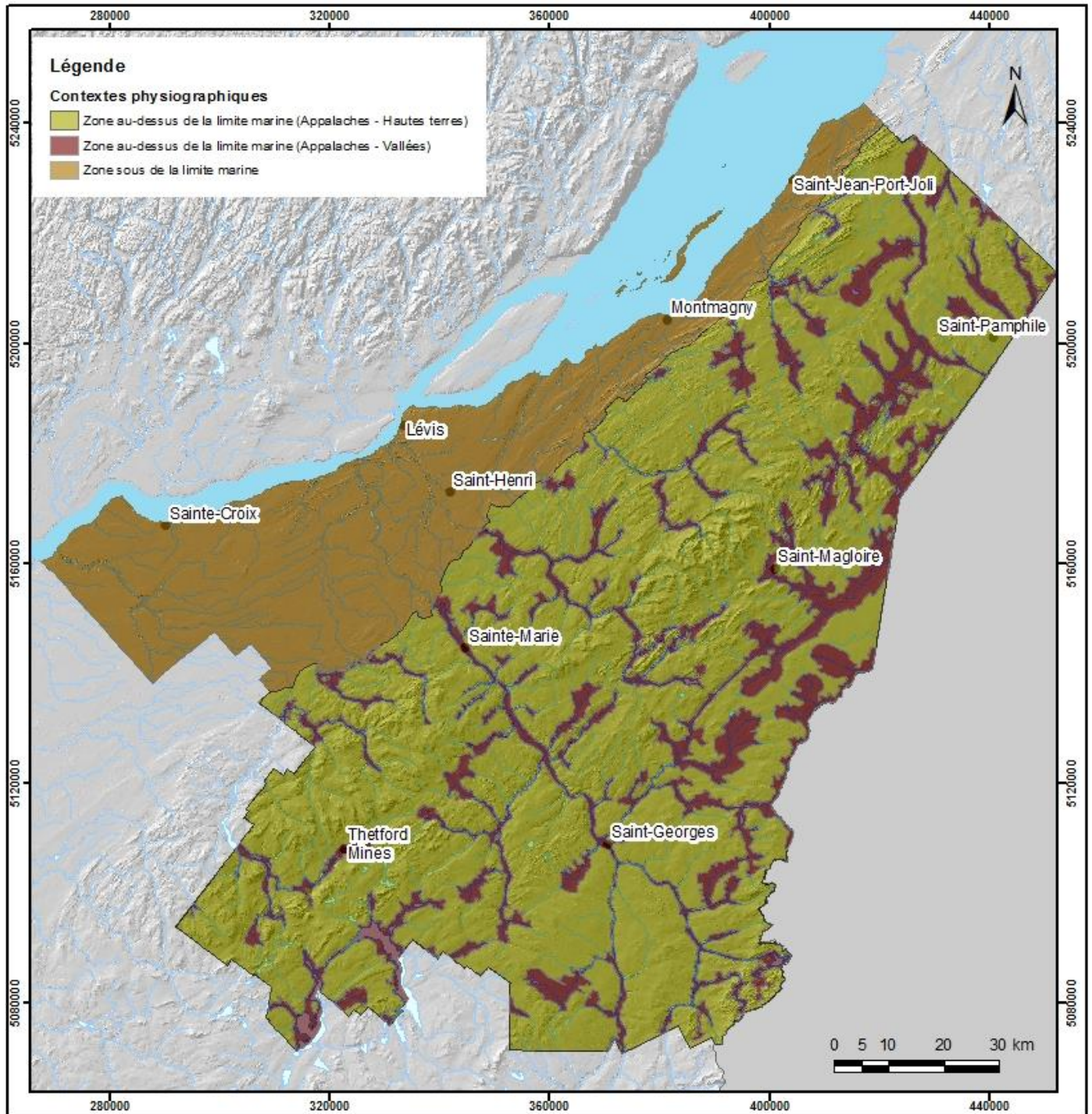


Figure 4.26 : Répartition des trois contextes hydrogéologiques définis pour Chaudière-Appalaches : les basses-terres du St-Laurent, les hautes-terres appalachiennes et les vallées appalachiennes

Tableau 4.8 : Synthèse des contextes hydrogéologiques de la Chaudière-Appalaches

Condition (Livrable PACES)	Basses-terres du St-Laurent	Vallées appalachiennes	Hautes-terres appalachiennes
Localisation et superficie	Bande de 10 à 30 km de largeur allant de la bordure du fleuve Saint-Laurent jusqu'à la limite marine à 180 m NMM (~ 4 061 km ²).	Vallées des principaux cours d'eau qui incisent le relief montagneux à des élévations inférieures à 350 m NMM (~ 2 293 km ²).	Parties des Appalaches en dehors des vallées (~ 9 744 km ²).
Topographie (Cartes 1 & 3)	Bas plateau généralement à faible relief allant de 10 m NMM en bordure du fleuve jusqu'à 90 m NMM en bordure des Appalaches.	Vallées incisées dans les Appalaches à des élévations inférieures à 350 m NMM.	Topographies de collines et de montagnes en dehors des vallées pouvant atteindre une élévation de 900 m NMM.
Hydrographie (Cartes 5 & 6)	Contient les parties les plus en aval des rivières du Chêne, Chaudière, Boyer et du Sud. Bassins versant peu développés, sauf pour les rivières du Chêne et Boyer.	Vallées encaissées des principales rivières : Bécancour, Chaudière et ses affluents, Etchemin, du Sud et Ouelle.	Parties amont des principaux bassins versants : Bécancour, Chaudière, Etchemin, du Sud, St-Jean et Ouelle
Géologie du roc (Carte 13)	Roches sédimentaires paléozoïques peu déformées de la Plate-forme du St-Laurent à l'ouest de Lévis et Zone de Humber externe pour le reste de ce contexte.	Les vallées traversent les différentes zones des Appalaches, du NO au SE : Humber externe, Humber interne, Dunnage, Ceinture de Gaspé. Schistes, ardoises, grès, shale, roches volcaniques. Grandes failles SO-NE, roches déformées.	Couvrent les différentes zones des Appalaches, du NO au SE : Humber externe, Humber interne, Dunnage, Ceinture de Gaspé. Schistes, ardoises, grès, shale, roches volcaniques. Grandes failles SO-NE, roches déformées.
Géologie du Quaternaire (Carte 12)	Sédiments fins sous 100 m NMM. Couverture sableuse jusqu'à la limite marine à 180 m NMM. Sédiments deltaïques en aval de la bordure des Appalaches des rivières du Chêne, Chaudière, Etchemin et du Sud.	Vallées peuvent être comblées de plusieurs dizaines de mètres de sédiments, souvent fins, qui recouvrent de la roche altérée. Sédiments fluvio-glaciaires par endroits.	Hautes-terres recouvertes d'une mince couche de till relativement perméable.
Séquence de sédiments quaternaires (Coupes 14A et carte 18)	Sables généralement minces (< 3 m) et discontinus; argile parfois épaisse (10 - 25 m) recouvrant roc ou till.	Sables généralement minces (< 3 m) et discontinus; argile parfois épaisse (10 - 25 m) recouvrant roc ou till. Le roc peut être altéré. Intervalles granulaires plus grossiers en profondeur ou en bordure de vallées.	Till mince (< 5 m) sur roc sur hauts topographiques, et plus épais dans le bas des versants.
Épaisseur totale des sédiments quaternaires (Carte 15A)	Environ 0 à 30 m (moyenne de 4.7 m). Accumulations plus importantes et étendues dans le bassin de la du Chêne et entre le Bras d'Henri et l'Etchemin. Accumulations locales près des rivières Boyer et du Sud.	Accumulations variables et localement > 15 m, surtout au centre des vallées ou paléo-vallées (moyenne de 3.0 m).	Accumulations généralement faibles < 5 m, localement plus importantes où se trouvent des dépôts fluvio-glaciaires (moyenne de 1.9 m).

Tableau 4.8 : (suite 1)

Condition (Livrable PACES)	Basses-terres du St-Laurent	Vallées appalachiennes	Hautes-terres appalachiennes
Topographie du roc (Carte 16)	Topographie du roc plus rugueuse que la surface qui est assez plane, avec des profondeurs à > 25 m sous la surface par endroits. Crêtes de roc orientées SO-NE.	Vallées plus accentuées que la topographie de la surface.	Topographie du roc très semblable à celle de la surface à cause de la faible accumulation de sédiments.
Aquifères et aquitards	Aquitard : argiles lacustre et marine (5 - 15 m) Unité semi-perméable : till (moyenne de 2 m) Le roc fracturé constitue l'aquifère régional.	Aquifères granulaires potentiels dans les vallées. Le roc fracturé constitue l'aquifère régional.	Aquifères granulaires potentiels par endroits où on trouve du fluvio-glaciaire. Le roc fracturé constitue l'aquifère régional.
Conductivité hydraulique (K) (Figures 4.1 à 4.3)	K dans les aquifères granulaires : 10^{-7} à 10^{-3} m/s K dans le roc : 10^{-8} à 10^{-5} m/s K dans le roc n'est pas contrôlé par les unités géologiques mais par la profondeur.		
Profondeur des puits (Figure 5.2)	Appalaches : puits au roc généralement entre 10 et 60 m et plus souvent entre 20 et 40 m. Plate-forme du St-Laurent : puits au roc entre 10 à 90 m (très variable). Puits municipaux dans les sédiments ont généralement moins de 20 m.		
Confinement / Vulnérabilité (Cartes 17 & 22)	Conditions généralement captives dans la parties ouest, jusqu'à l'est de Lévis. Conditions semi-captives et captives dans la partie est, avec conditions libres très locales sous des hauts topographiques.	Conditions généralement semi-captives dans les vallées et libres en bordure des vallées.	Conditions généralement libres sur les hauts topographiques.
Recharge HELP (moyenne : 166 mm/an)	85 mm/an	192 mm/an	186 mm/an
Zones de recharge (Cartes 28A & 28B)	Recharge généralement nulle à faible jusqu'à l'est de Lévis. Zones de recharge associées surtout aux crêtes rocheuses qui sont plus abondantes entre Lévis et St-Jean-Port-Joly.	Recharge nulle à faible dans les vallées et modérée à élevée en bordure des vallées.	Recharge importante, pouvant dépasser 300 mm/an, surtout dans les zones à plus faible pente et faible couvert de till.
Zones de resurgences (Carte 28A)	Résurgence importante au fleuve St-Laurent et dans les cours d'eau majeurs, où la résurgence peut toutefois être surtout diffuse à cause de la présence de sédiments fins.	Résurgence discontinue et diffuse dans les cours d'eau sous lesquels on retrouve souvent des sédiments fins.	Résurgence locale dans les cours d'eau mineurs coulant directement sur le roc ou avec de faibles épaisseurs de sédiments parfois perméables.
Patron d'écoulement (Carte 20)	Gradients hydrauliques horizontaux faibles et allant généralement du front des Appalaches au fleuve St-Laurent. La rivière Boyer contrôle l'écoulement local, ce que fait aussi, dans une moindre mesure, la rivière du Sud.	Gradients hydrauliques horizontaux importants en bordure des vallées. Écoulement provenant des hauts topographiques vers les vallées.	Gradients hydrauliques horizontaux importants reliés à la topographie rugueuse. De part et d'autre de la Chaudière, grande ligne de partage SO-NE sur les hauts topographiques dans la Zone de Humber interne, d'où il y a écoulement vers le NO et le SE.

Tableau 4.8 : (suite 2)

Condition (Livrable PACES)	Basses-terres du St-Laurent	Vallées appalachiennes	Hautes-terres appalachiennes
Géochimie (Figure 4.10 & tableau 4.5)	Types d'eau variés allant des eaux de recharge Ca-HCO ₃ aux eaux évoluées Na-HCO ₃ et Na-Cl. Eau avec indices d'effet anthropique présente localement.	Dominance d'eau de recharge Ca-HCO ₃ mais avec un type d'eau avec SO ₄ donnant des indices d'effet anthropique.	Presqu'exclusivement des eaux de recharge Ca-HCO ₃ mais avec des eaux magnésienne dans la région de Thetford Mines.
Qualité d'eau générale (Tableaux 5.2 & 5.3)	Eau de recharge acceptable, eaux évoluées acceptables à passables et eaux avec effet anthropique passable à non potable.	Eau de recharge acceptable, avec ou sans effet anthropique. Eaux avec effet anthropique plus important passable à non potable.	Qualité d'eau généralement acceptable.
Dépassements de critères de potabilité (Cartes 24A & 24B)	Fluor (F) et baryum (Ba).	Rares.	Arsenic (As)
Dépassements de critères esthétiques (Cartes 25A & 25B)	Cl, Na, MDT, Dureté, Al, Mn, S ²⁻ , pH (alcalin)	Mn, S ²⁻ , pH (acide)	Mn, pH (acide)
Consommation d'eau (Cartes 26 ABC)	Surtout eau souterraine dans Lotbinière et L'Islet, alors que c'est surtout l'eau de surface dans Bellechasse et Montmagny. Consommation d'eau souterraine partagée entre les différents usages, sauf dans Montmagny où l'usage ICI est faible.	Consommation d'eau de surface dominante à cause des réseaux des principales municipalités. La proportion de l'usage ICI d'eau souterraine domine pour Nouvelle-Beauce et Robert-Cliche.	La consommation d'eau souterraine est généralement dominante. L'usage résidentiel de l'eau souterraine domine.

Le modèle conceptuel du système aquifère développé dans le cadre de la présente étude comporte des similarités mais aussi des distinctions par rapport aux travaux réalisés précédemment en Chaudière-Appalaches, notamment dans le cadre des projets CDAQ (Tecsult, 2008; COBARIC et UPA, 2008; Benoit et al., 2008, 2009, et 2014; Carrier et al., 2014) et PACES de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) (Talbot Poulin et al., 2013). Ces différences peuvent découler, entre autres, de l'utilisation de données différentes (nature, quantité, mode de validation), d'approches méthodologiques différentes pour la production des cartes ou pour l'analyse des données, des ressources dédiées aux projets et de décisions professionnelles au niveau de l'interprétation des conditions hydrogéologiques.

Les travaux réalisés dans le cadre du projet PACES CMQ ont utilisé les protocoles de production des livrables PACES, de sorte que les méthodes utilisées sont très semblables à celles utilisées pour produire les livrables du projet PACES Chaudière-Appalaches. Notre projet n'a toutefois pas été en mesure d'accéder à toutes les données utilisées par le projet PACES CMQ car certaines de ces données étaient confidentielles et ne pouvaient pas être retransmises. Le portrait des conditions hydrogéologiques dressé pour Lévis dans le cadre du projet PACES CMQ documenté par Talbot Poulin et al., (2013) est très compatible avec celui des environs de Lévis produit dans le cadre de notre projet, mais il pourrait y avoir certaines différences reliées surtout à l'utilisation de données un peu différentes.

Il y a toutefois des différences notables dans les conditions représentées pour la partie du bassin de la rivière Chaudière dans le cadre du projet CDAQ (Carrier et al., 2014) et celui produit par le présent projet. Ces différences se retrouvent, notamment, au niveau des conditions de confinement, de la vulnérabilité et de la recharge. Les données géochimiques utilisées pour notre projet étant celles produites par le projet CDAQ, il n'y a pas de distinction majeure à ce niveau. Sans entrer dans une analyse détaillée des causes

des différences dans le portrait hydrogéologique entre ces deux projets, on peut noter certains points concernant les données et les méthodes utilisées. Au niveau des données, le projet CDAQ a utilisé la carte du Quaternaire de [Caron et al. \(2007\)](#), alors que nous avons utilisé une combinaison de cartes (voir sections 2.2.1 et 6.1). Les approches utilisées pour la cartographie étaient toutefois semblables dans les deux cas et n'ont pas mené à des cartes très différentes. Toutefois, ces deux projets ont utilisé des données et couches de base différentes pour les forages, les affleurements rocheux, le modèle numérique d'élévation, l'occupation du sol et la pédologie. Enfin, les travaux réalisés sur le terrain étaient différents ainsi que la zone couverte par les projets. Au niveau des différences méthodologiques, on peut noter une spatialisation (interpolation) différente de l'épaisseur des dépôts meubles ainsi que de la piézométrie. Les critères pour définir les conditions de confinement étaient aussi différents. Même si la recharge a été estimée avec HELP pour les deux projets, il y avait des différences notables aux niveaux de la période de temps considérée, des données d'entrée (occupation du sol, météo, pédologie, géologie...) et de la méthode et données utilisées pour le calage des résultats. Enfin, pour la vulnérabilité DRASTIC, les projets ont utilisé des intrants différents, notamment pour la conductivité hydraulique, le confinement, le type d'aquifère, la recharge et la profondeur à la nappe. Ces différences de données et de méthodes peuvent avoir des effets notables sur les cartes produites, et expliquer en partie les résultats différents obtenus.

5 RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

5.1 Sources d'approvisionnement et potentiel d'exploitation

La recharge de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux régional de la Chaudière-Appalaches a été décrite à la section 4.3. La recharge représente le renouvellement annuel de l'eau souterraine dans l'aquifère. Une certaine proportion de la recharge peut être exploitée de façon durable par des puits d'approvisionnement. En plus de la recharge, le niveau d'exploitation durable doit tenir compte de l'utilité écologique de l'eau souterraine qui contribue aux débits de base des cours d'eau, et dont l'apport est nécessaire au maintien des écosystèmes aquatiques. Le concept de gestion durable des ressources en eau souterraine sera abordé plus en détail à la section 5.5.

Si la recharge détermine ainsi la « disponibilité » de l'eau souterraine, elle ne contrôle cependant pas son « exploitabilité ». La capacité d'exploiter l'eau souterraine dépend plutôt de la capacité (débits) des puits d'approvisionnement en eau. Cette capacité est fonction, en partie, du type d'installation du puits, mais surtout de l'épaisseur saturée de l'aquifère b (m) et de ses propriétés hydrauliques. La propriété la plus importante est la conductivité hydraulique K (m/s) qui représente la capacité d'un milieu à permettre l'écoulement de l'eau souterraine. Intégrée sur l'épaisseur saturée de l'aquifère, la transmissivité T (m^2/s) est toutefois la propriété (dérivée de K par $T = K \cdot b$) la plus couramment estimée lors d'essais de pompage.

La section 4.1 a déjà dressé le portrait des propriétés hydrauliques des unités géologiques de Chaudière-Appalaches. La présente section dresse maintenant le portrait de l'exploitation de l'eau souterraine par les puits municipaux. Les propriétés de ces puits donnent un meilleur aperçu de la capacité « maximale » d'exploitation des eaux souterraines dans la région d'étude. En effet, la recherche en eau réalisée par les firmes spécialisées en hydrogéologie pour déterminer la localisation des puits municipaux et leurs aménagements optimaux donne une idée du potentiel maximal d'exploitation des aquifères de la Chaudière-Appalaches.

5.1.1 Sources d'approvisionnement en eau municipal

À la section suivante 5.2, la **carte 26A** (figure 5.6) montre que l'approvisionnement en eau municipal se fait principalement à partir d'eau souterraine, d'où l'importance de définir les propriétés et les capacités des puits municipaux qui donnent des indications de la capacité maximale de production des puits dans la région d'étude. En Chaudière-Appalaches, 257 puits municipaux ont été identifiés à l'aide du Système d'Information Hydrogéologique (SIH) du MDDELCC, des informations transmises par les municipalités ainsi que via la compilation de rapports de consultants (Rapport de forages, Recherche en eau souterraine, Implantation de nouveaux forages, Mise aux normes des puits, Études hydrogéologiques diverses, etc.). Ainsi, il convient de prendre ce nombre total de puits municipaux recensés avec précautions, l'information sur l'existence et l'utilisation actuelle de certains puits étant parfois difficilement identifiable. Pour évaluer le potentiel d'exploitation des aquifères par des puits municipaux en Chaudière-Appalaches, seules les données des puits identifiés comme « municipaux » dans le SIH ou dans les rapports de consultants ont été utilisées.

Du fait de la grande variété de sources d'informations utilisées, en plus de la nature typiquement partielle des bases de données régionales (décrite en fin de section 4.1), il n'y a pas d'homogénéité sur les données de puits disponibles. Pour certains puits, toutes les informations nécessaires à l'évaluation du potentiel aquifère local sont disponibles (construction du puits, propriétés hydrauliques, paramètres tirés d'essais hydrauliques réalisés dans le puits, etc.), alors que pour d'autres, seules quelques informations générales sont disponibles (principalement la localisation du puits et quelques caractéristiques de construction). En conséquence, le nombre de données utilisées varie entre les types d'analyses.

Sur les 257 puits pour lesquels des informations sont disponibles, 45% (117) des puits sont installés dans les dépôts meubles et 55% (140) des puits sont ouverts au roc. Le tableau 5.1 et la figure 5.1 montrent des informations sur le mode de construction des puits.

Tableau 5.1 : Diamètre des puits municipaux et privés par rapport à l'aquifère capté

Puits Municipaux				Puits Privés			
Diamètres (pouce)	Puits aux sédiments	Puits au roc	Tous les puits	Diamètres (pouce)	Puits aux sédiments	Puits au roc	Tous les puits
~ 6	13.9%	48.5%	39.1%	~ 6	91.0%	97.2%	96.9%
~ 8	30.6%	32.0%	31.6%	~ 8	3.7%	2.5%	2.6%
~ 10	30.6%	16.5%	20.3%	~ 10	2.4%	0.2%	0.3%
> 10	25.0%	3.1%	9.0%	> 10	2.8%	0.1%	0.2%
(sans donnée)				(autre valeur) (sans donnée)	9.5	3.9	4.1
	225.0	44.3	93.2		86.8	19.4	22.6
Nb données :	36	97	133	Nb données :	748	14 977	15 725

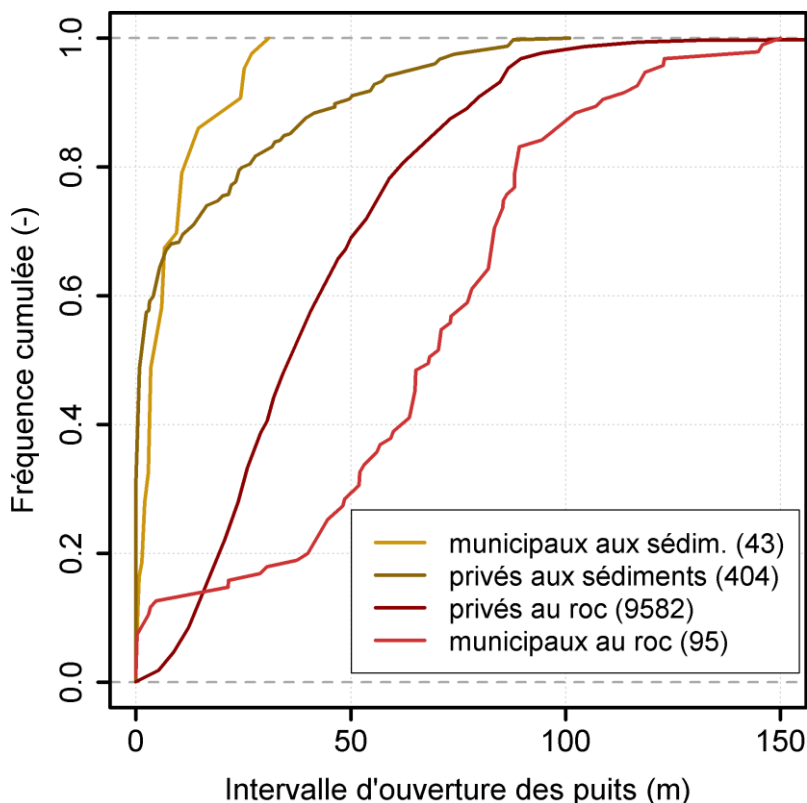


Figure 5.1 : Fréquence cumulative des longueurs d'intervalle ouvert des puits selon l'utilisation (municipale ou privée) et l'aquifère capté (roc ou sédiments)

Au niveau de leur construction, les puits municipaux recensés ont le plus souvent un tubage de 6 po (15 cm) de diamètre lorsqu'ils sont installés dans l'aquifère rocheux, tandis que des diamètres légèrement supérieurs (8 ou 10 po; 20 ou 25 cm) sont privilégiés lorsqu'ils sont installés dans des aquifères granulaires (tableau 5.1, partie gauche). De même, des diamètres supérieurs à 10 po (25 cm) sont nettement plus courants dans les sédiments (9/36) que dans le roc (3/97). Différemment, les tubages des puits privés sont très majoritairement de 6 po (15 cm) de diamètre, peu importe l'aquifère capté (tableau 5.1, partie droite). De plus, on constate d'importantes lacunes sur les données du diamètre : pour les puits municipaux (dont les données proviennent pourtant principalement des rapports de consultants), la donnée sur le diamètre est manquante pour 124/257 puits, et pour les puits privés (dont les données proviennent essentiellement du SIH), la donnée de diamètre est manquante pour 3554/19279 puits. Sachant que cette donnée est requise pour plusieurs analyses concernant l'hydraulique, il serait important que des mesures soient prises pour qu'à l'avenir cette donnée soit consignée plus systématiquement.

La figure 5.1 compare les longueurs des intervalles ouverts des puits selon l'utilisation et l'aquifère capté par ces puits. Les résultats sont plutôt attendus : les puits dans les sédiments ont une longueur d'ouverture contrainte par l'épaisseur limitée des formations quaternaires (voir section 3.2.5 et la **carte 15** de l'épaisseur de sédiments); à l'opposé, les puits au roc sont ouverts sur de plus grands intervalles. De plus, les puits au roc municipaux sont forés plus profondément dans l'aquifère rocheux que les puits privés, vraisemblablement parce qu'un puits d'approvisionnement municipal a typiquement besoin d'une plus grande capacité de production et d'espace « réservoir » à même le puits, que les puits privés.

5.1.2 Propriétés hydrauliques des puits municipaux

Les capacités spécifiques (CS ou Q_s) représentent le rapport entre les débits pompés Q (m^3/s) par un puits sur le rabattement s (m) de la nappe ($Q_s = Q/s$). Le rabattement est la baisse de niveau d'eau dans le puits en conditions de pompage par rapport au niveau d'eau statique sans pompage. Bien que les capacités spécifiques ne représentent pas directement les propriétés hydrauliques des aquifères, les données sur Q_s sont abondantes dans les bases de données existantes sur les puits, et il est possible d'estimer la transmissivité (T) d'un aquifère à partir de valeurs de Q_s . La section 4.1 a déjà présenté des statistiques réalisées à partir de milliers d'estimations indirectes de T à partir de Q_s , principalement pour l'aquifère rocheux régional.

Dans cette section, on s'intéresse aux données de capacité spécifique et de transmissivité associées aux puits municipaux. Tel que mentionné dans la sous-section 5.1.1, les propriétés de ces puits donnent un aperçu de la capacité « maximale » d'exploitation des eaux souterraines dans la région d'étude. Quelques comparaisons sont faites avec les résultats présentés à la section 4.1, qui considéraient l'ensemble des données disponibles, largement dominées en nombre par les puits privés (données du SIH) et plutôt représentatifs, par conséquent, des valeurs « moyennes » des propriétés hydrauliques de la région.

La figure 5.2 montre les distributions statistiques des valeurs de transmissivité et de conductivité hydraulique des puits qualifiés de « municipaux » dans la BDPH (provenant à 80% des rapports de consultants), en distinguant les puits installés dans les dépôts meubles de ceux dans le roc fracturé. D'après ces résultats, la productivité des dépôts meubles est, environ, de 15 à 120 fois plus forte que celle de l'aquifère rocheux fracturé, selon qu'on compare les modes de T ou de K , respectivement. Les valeurs de T sont plus concentrées entre 1×10^{-3} et $6 \times 10^{-3} m^2/s$ (sédiments) ou entre 5×10^{-5} et $4 \times 10^{-4} m^2/s$ (roc) ; les valeurs de K sont plus concentrées entre 2×10^{-4} et $1 \times 10^{-3} m/s$ (sédiments) ou entre 6×10^{-7} et $2 \times 10^{-5} m/s$ (roc). Occasionnellement, des installations municipales profitent de T remarquablement élevées, jusqu'à $\sim 10^{-2} m^2/s$, plus fréquentes dans les dépôts que dans le roc cependant. De plus, la plus grande variance des valeurs au roc suggère que la productivité de l'aquifère rocheux est plus variable (hétérogène) et donc moins prévisible que celle des aquifères granulaires. Les puits au roc ont néanmoins l'avantage de permettre un approfondissement et une longueur ouverte plus importantes, comme nous l'avons vu précédemment (figure 5.1).

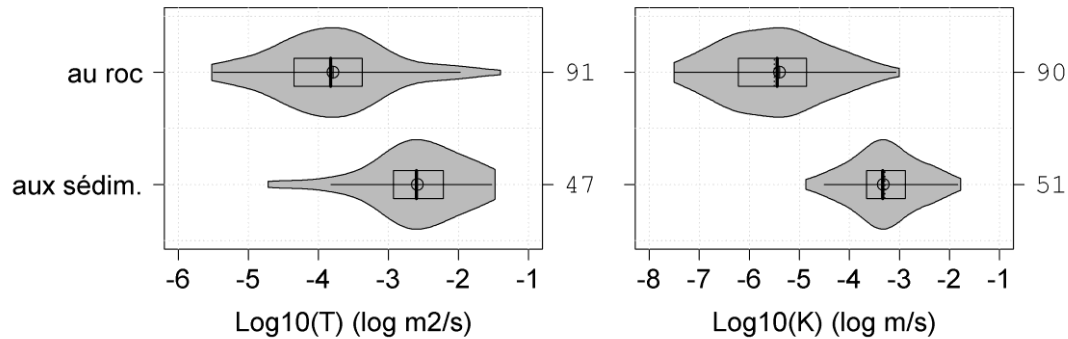
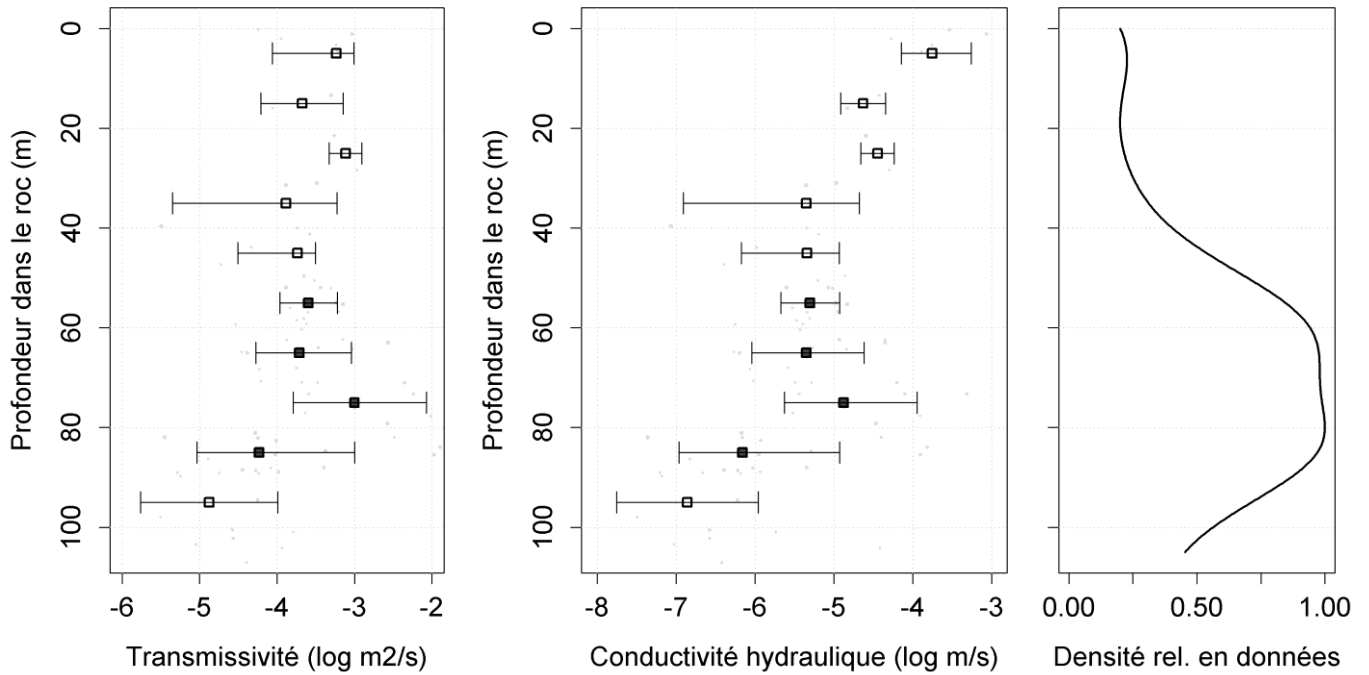


Figure 5.2 : Distributions statistiques de la transmissivité (T) et de la conductivité hydraulique (K) des puits municipaux selon le type d'aquifère capté

Aussi, il est intéressant de comparer les statistiques de T ou K des puits municipaux (figure 5.2) aux tendances observées pour l'ensemble des puits (majoritairement résidentiels), présentées précédemment (section 4.1). Pour l'ensemble des puits installés dans les dépôts meubles (figure 4.2), K a une distribution bimodale avec des modes à 1×10^{-6} et à 1×10^{-4} m/s et une valeur médiane d'environ 1×10^{-5} m/s ; la T médiane est d'environ 3×10^{-5} m²/s. Tel que nous venons de le voir, les puits municipaux installés dans les dépôts meubles ont des valeurs généralement beaucoup plus élevées (K de 1×10^{-4} à 1×10^{-3} m/s, T de 1×10^{-3} à 1×10^{-2} m²/s, figure 5.2). Pour le roc, les puits municipaux ont une valeur médiane de K au-dessus de 1×10^{-6} m/s alors que la valeur médiane de l'ensemble des puits au roc est sous 1×10^{-6} m/s (figure 4.2) ; de façon similaire, la T médiane des puits municipaux au roc est environ 10 fois plus élevée que celle de l'ensemble des puits au roc.

Toutefois, comme le montre la figure 5.3, la profondeur des puits au roc installés pour approvisionnement municipal est le plus souvent entre 60 et 90 m, alors que la profondeur des puits résidentiels est généralement moindre : de 20 à 40 m (figure 4.4). Cette profondeur accrue des puits municipaux permet d'aller chercher la capacité de production souhaitée. La figure 5.3 montre aussi que, si K paraît diminuer avec la profondeur, T ne montre pas une tendance aussi claire en fonction de la profondeur. En d'autres mots, le diagramme de $T(z)$ montre avant tout une variabilité de T indépendante de la profondeur, à travers laquelle on peut entrevoir une diminution d'environ 1 ordre de grandeur de 0 à 100 m de profondeur dans le roc. Ce taux de diminution de T est approximativement comparable à celui de l'ensemble des puits présenté à la figure 4.4. On peut en déduire que les consultants ont tendance à installer et mettre en production des puits qui ont des propriétés hydrauliques avantageuses, ce qui place ces puits nettement au-dessus des autres puits de la région en termes de capacité de production.

Enfin, parmi les puits municipaux, 68 ont à la fois des valeurs de Q_s et de T estimées directement à partir d'essais de pompages. Une corrélation linéaire directe liant ces deux paramètres est mise en évidence à la figure 5.4, où la relation $T(Q_s)$ est étudiée graphiquement en représentation log-log. La forme et la couleur des symboles permettent de distinguer les différents aquifères captés par les puits. Malgré le peu de données disponibles, cette analyse suggère une relation extrêmement simple entre T et Q_s , au moins pour l'aquifère rocheux, soit : $T \approx Q_s$. La corrélation quasi-linéaire démontrée par ces données vient aussi vérifier la pertinence de la méthode d'estimation de T puis K à partir de la CS, présentée dans la sous-section 4.1.1.4. Lors de travaux exploratoires, pour obtenir une première approximation de T pour un puits récemment foré, par exemple, l'utilisation de $T \approx Q_s$ est donc recommandée (Neville, 2011). L'estimation des propriétés hydrauliques devra ensuite être précisée par la réalisation d'essais de pompage plus rigoureux et plus finement interprétés, surtout si le puits est destiné à l'approvisionnement en eau.



Remarque : la figure est construite en suivant la même méthode que la figure 4.4 (voir section 4.1)

Figure 5.3 : Dépendance des propriétés hydrauliques à la profondeur dans le roc pour les puits municipaux : à gauche, relation $\log_{10} T(z)$; au centre, relation $\log_{10} K(z)$; à droite, densité relative en données, selon leur profondeur dans le roc (z) (densité normalisée par le maximum)

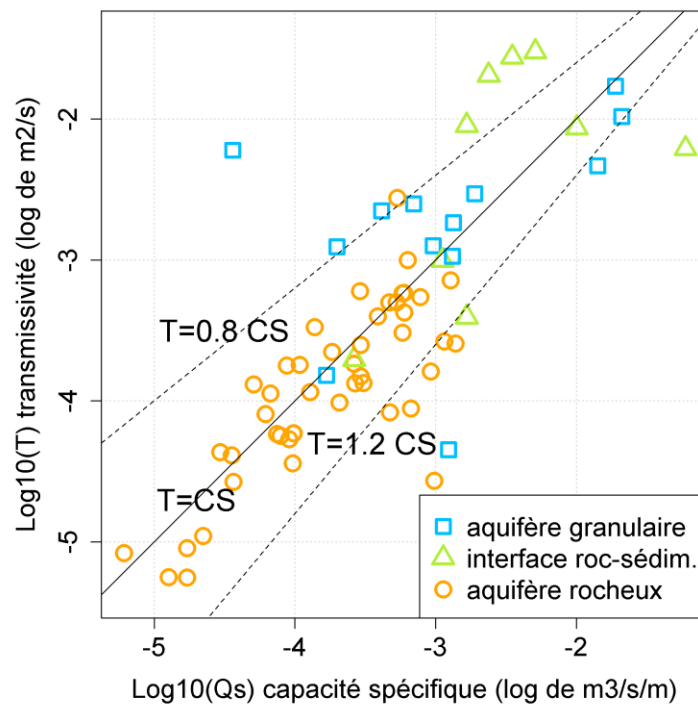


Figure 5.4 : Transmissivité (T) en fonction de la capacité spécifique (Q_s) pour les puits municipaux

5.2 Usage des ressources en eau souterraine

Pour combler les besoins en eau, plusieurs sources d'approvisionnement sont souvent nécessaires en fonction de la quantité et de la qualité de l'eau disponible localement. L'évaluation des ressources en eau qui sont nécessaires pour combler les différents besoins reliés aux activités humaines n'est pas un exercice facilement réalisable. Actuellement, au Québec, il n'existe pas de source d'information regroupant l'ensemble des informations permettant de dresser le portrait de la provenance et des débits de l'eau utilisée. L'information disponible provient généralement de sources publiques (ministères provinciaux, municipalités, MRC, régies intermunicipales, etc.), mais elle est souvent fragmentaire et incomplète. En recoupant les informations disponibles, il est tout de même possible de dresser le portrait régional de l'utilisation totale de l'eau ainsi que de l'eau souterraine. Les sections qui suivent décrivent la démarche et les résultats de l'évaluation de l'utilisation de l'eau en Chaudière-Appalaches. L'annexe 6 présente le détail des données et calculs ayant servi à cette évaluation.

5.2.1 Sources et traitement des données

L'INRS et les OBV-CA ont fait la collecte et l'intégration des données sur la consommation d'eau dans la région d'étude, principalement par le biais d'un questionnaire transmis aux municipalités, mais aussi par l'intégration de diverses sources de données disponibles dans les ministères du Québec (ex. : MDDELCC, MAMROT, MAPAQ, etc.). Au Québec, lorsqu'il n'y a pas de réseau d'aqueduc, on peut présumer que l'approvisionnement en eau se fait à partir de l'eau souterraine.

Afin d'identifier les secteurs desservis par des systèmes d'approvisionnement municipaux, il y a eu une collecte et une compilation de l'étendue des réseaux d'aqueduc municipaux. Cependant, comme il n'a pas été possible d'obtenir les informations auprès de toutes les municipalités concernées, les données sur les réseaux d'aqueducs n'ont pas été utilisées pour compiler les bilans d'utilisation de l'eau. Ces informations sur la localisation des réseaux auraient notamment permis d'estimer la proportion des agriculteurs qui s'alimentent à partir de réseaux par rapport à ceux qui utilisent des puits privés. Cependant, puisqu'en Chaudière-Appalaches les agriculteurs s'approvisionnent généralement à partir avec de puits privés, l'impact sur les bilans d'utilisation de l'eau est considéré minime.

Pour les besoins résidentiels et commerciaux, un questionnaire rédigé conjointement par l'INRS et les OBV-CA a été transmis à chacune des municipalités couvertes par le projet. Ce questionnaire avait pour but de compléter et de comparer les informations sur la consommation de l'eau provenant du répertoire des réseaux municipaux de distribution d'eau potable du MDDELCC et du Rapport annuel de l'usage de l'eau potable du MAMROT. À noter que plusieurs des municipalités (38) sont moins concernées par l'usage de l'eau souterraine puisqu'elles ne possèdent aucun système municipal de distribution d'eau (tableau 5.2). Un exemple du questionnaire est présenté à l'annexe 6.

Tableau 5.2 : Statistiques des types d'approvisionnement en eau par municipalité

Type d'approvisionnement en eau	Nombre de municipalités	%
Eau souterraine	84	62
Eau de surface	10	7
Source mixte	4 (incluant Lévis)	3
Aucun	38	28
Total	136	100.0

5.2.2 Approche générale

Les volumes d'eau consommée ont été regroupés selon les 3 usages principaux : résidentiel, agricole et industriel/commercial/institutionnel (ICI). L'organigramme de la figure 5.5 présente l'organisation des données disponibles pour l'estimation de l'utilisation d'eau pour chaque type d'usage. L'information a été regroupée par municipalité puisqu'une bonne partie des données est disponible et compilée de façon naturelle à l'échelle municipale (ex. : débits des réseaux d'aqueduc, populations desservies). Un regroupement des données par MRC a aussi été produit afin d'obtenir un portrait régional basé sur un plus grand nombre de données, ce qui permet de réduire les effets de limites de juridiction affectant surtout l'usage agricole de l'eau souterraine.

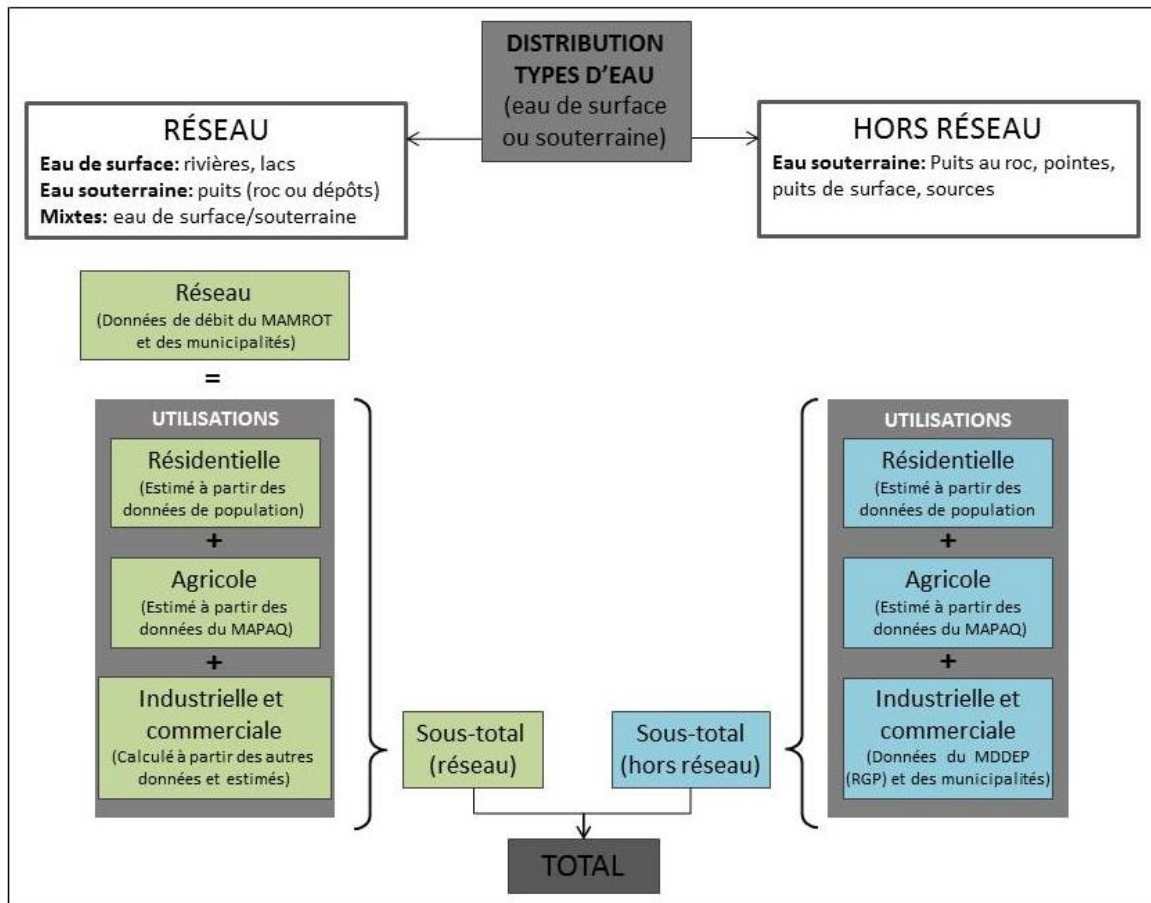


Figure 5.5 : Estimation des usages de l'eau en fonction du type d'utilisation et de la provenance de l'eau

Les bilans d'eau sont réalisés séparément selon que la distribution d'eau est faite de façon privée, principalement par les puits résidentiels, ou par les réseaux d'aqueducs, principalement gérés par les municipalités. Ainsi, toutes les données disponibles concernant les débits des réseaux municipaux, de même que la provenance de l'eau distribuée est colligée dans le bilan en attribuant une priorité aux données selon leurs provenances, dans l'ordre décroissant de priorité suivant : données provenant du sondage de l'OBV-CA réalisé auprès des municipalités, informations complémentaires obtenues par la MRC de la Nouvelle Beauce par le biais de sondages, communications directes avec les responsables des municipalités qui sont plus récentes (2014), données provenant du recensement du [MAMROT \(2011 et 2012\)](#) et données sur les populations desservies par un réseau d'aqueduc obtenues du [MDDELCC \(2012a\)](#). Les données sur les débits des réseaux d'aqueduc fournies par les municipalités servent de base

pour valider les volumes d'eau estimés pour chaque usage desservi par les réseaux de distribution d'eau de surface ou souterraine. Les valeurs de débit obtenues devraient représenter la quantité réelle d'eau distribuée et non pas la capacité totale du réseau.

L'**utilisation d'eau à des fins résidentielles** est comptabilisée pour chaque municipalité à partir des estimations de population (desservies et non desservies), multipliées par un facteur de consommation moyenne journalière (250 L/personne/jour) qui s'applique aux régions rurales.

L'**utilisation d'eau à des fins agricoles** est plus complexe à estimer, en particulier parce qu'il est difficile d'identifier la provenance (surface ou souterraine) de l'eau utilisée pour les productions agricoles. Cette estimation est faite à partir des données sur les types de production agricole (ex. : nombre de têtes de bétail, superficie cultivée), auxquelles est associée une consommation moyenne estimée à partir de chartes de consommation. Les informations sur les productions agricoles végétales et animales ont été obtenues du MAPAQ. Les quantités d'eau consommée sont estimées 1) en additionnant les productions agricoles (ex. : nombre d'animaux, superficies cultivées par type de production) et 2) en multipliant ces productions par la consommation moyenne estimée à partir de la charte. Il est aussi nécessaire de faire des approximations afin d'identifier la source et le type d'eau utilisée. De façon générale, les fermes en Chaudière-Appalaches ne sont pas reliées aux systèmes d'approvisionnement municipaux et, à moins de renseignements spécifiques provenant des municipalités, nous avons utilisé les statistiques provenant de Statistiques Canada pour estimer les quantités d'eau provenant des réseaux (annexe 6).

Pour les **utilisateurs industriels, commerciaux et institutionnels** (ICI) desservis par un réseau, l'approche consiste à calculer le débit restant non utilisé par les autres usages (i.e. résidentiel et agricole) en soustrayant du volume d'eau distribué par les réseaux les volumes d'eau utilisés pour les usages résidentiels et agricoles. Par définition, le bilan pour les usages ICI desservis par un réseau inclut donc aussi toutes les autres utilisations possibles. Pour les utilisateurs ICI hors réseau, les volumes d'eau utilisés (principalement pour l'eau souterraine) sont estimés à partir du registre des grands préleveurs du MDDELCC (RGP) (dernière mise à jour transmise par le MDDEP en octobre 2012) et, lorsque possible, complétés avec les informations provenant des registres municipaux ou obtenus auprès des entreprises par un sondage.

5.2.3 *Portrait de l'utilisation d'eau en Chaudière-Appalaches*

Le tableau 5.3 présente des statistiques sur l'utilisation d'eau pour les MRC de Chaudière-Appalaches. Le tableau indique la quantité totale d'eau consommée avec la proportion de l'approvisionnement provenant de l'eau souterraine et de l'eau de surface, ainsi que la proportion des usages agricoles, industriels-commerciaux-institutionnels et résidentiels. Ces résultats sont aussi illustrés graphiquement sur la **carte 26A** (figure 5.6) qui montre la source d'approvisionnement des réseaux d'aqueduc par municipalité. De plus, un tableau plus complet de l'ensemble des informations sur l'utilisation de l'eau et des statistiques compilées à l'échelle municipale et par MRC est présenté à l'annexe 6. La principale carte du **livrable 26A** (annexe 2) montre aussi la localisation des puits municipaux et le type d'aquifère capté par ces puits, le roc fracturé ou dépôts meubles (section 5.1). Pour la majeure partie des Appalaches, l'approvisionnement en eaux se fait de façon privée par des puits au roc, alors les réseaux des plus grandes villes (dans la vallée de la rivière Chaudière et en bordure du fleuve Saint-Laurent) sont généralement approvisionnés par de l'eau de surface ou une combinaison d'eau de surface et d'eau souterraine. Les 10 municipalités les plus importantes (excluant Lévis) sur le plan démographique sont Saint-Georges, Thetford Mines, Sainte-Marie, Montmagny, Beauceville, Saint-Lambert-de-Lauzon, Saint-Apollinaire, Saint-Henri, Saint-Joseph-de-Beauce et Lac-Échemin. À elles seules, ces municipalités comptent pour près de 40 % de la population de Chaudière-Appalaches (excluant Lévis). Ces municipalités jouent un rôle économique régional majeur et desservent de vastes superficies agricoles qui occupent près de 22 % du territoire.

Tableau 5.3 : Utilisation d'eau par MRC en Chaudière-Appalaches

MRC	Population totale	Population desservie	Superficie (km ²)	Usage Total (Mm ³ /an)	Usage eau souterraine (%)	Disrtibution réseau (%)	Usage agricole (%)	Usage industriel (%)	Usage résidentiel (%)
Beauce-Sartigan	51 820	38 405	1 876	9.45	44.6	59.4	23.1	19.8	57.0
Bellechasse	36 133	22 326	1 781	25.28	29.3	18.9	45.5	18.0	36.5
La Nouvelle-Beauce	35 936	19 969	912	28.87	31.0	12.4	34.8	39.0	26.2
Les Appalaches	43 182	32 954	1 986	10.07	47.8	52.9	24.3	31.3	44.4
Les Etchemins	18 665	10 011	1 818	2.97	69.7	46.3	13.0	17.9	69.1
L'Islet	19 411	10 470	2 448	3.39	72.1	39.0	29.4	21.9	48.7
Lotbinière	30 439	15 706	1 687	12.11	67.1	19.5	34.6	31.7	33.7
Montmagny	23 173	16 498	1 722	4.78	39.1	55.4	41.9	4.7	53.4
Robert-Cliche	19 421	13 427	845	12.42	44.1	16.9	23.5	52.7	23.8
TOTAL	278 180	179 767	15 075	109.32	41.5	26.6	32.0	30.0	38.0

La **carte 26B** (figure 5.7) montre l'utilisation totale d'eau par MRC et les sources d'approvisionnement de cette utilisation, à partir d'eau de surface ou souterraine (voir aussi le tableau 5.3). La consommation totale d'eau est généralement corrélée à la population des MRC (tableau 5.3) ; ainsi les MRC des Etchemins, de L'Islet et Montmagny ont les plus faibles consommations totales, tandis que les MRC de Bellechasse et Nouvelle-Beauce ont les plus fortes consommations totales, pour un peu plus de 50% de la consommation totale régionale. Toutefois, les MRC des Appalaches et surtout Beauce-Sartigan ont des consommations totales modérées par rapport à leurs populations. Au contraire, considérant sa population, la MRC Robert-Cliche a une relativement forte consommation totale ; c'est aussi la MRC avec la plus grande proportion d'usage industriel-commercial-institutionnel (53%) (tableau 5.3), bien au-dessus de la moyenne régionale de 30%. C'est la MRC de Montmagny qui a la plus faible proportion d'utilisation ICI. La proportion moyenne d'usage agricole est de 32% et va de 13% pour la MRC des Etchemins à 45% pour la MRC de Bellechasse. Globalement, c'est l'usage résidentiel qui est le plus important, à 38% en moyenne, allant de 24% pour la MRC Robert-Cliche à 69% pour la MRC des Etchemins.

La **carte 26C** (figure 5.8) montre l'utilisation d'eau souterraine par MRC et la proportion servant à un usage résidentiel, agricole ou industriel-commercial-institutionnel (ICI). L'approvisionnement par l'eau souterraine est en moyenne de 42%, et varie entre 29% pour la MRC de Bellechasse et 72% pour la MRC de L'Islet (tableau 5.3). Les MRC de la Nouvelle-Beauce et de Montmagny ont aussi de faibles proportions d'utilisation d'eau souterraine, sous 40%, alors que les MRC de Lotbinière, des Etchemins et de L'Islet ont des proportions d'utilisation d'eau souterraine dépassant 65%. En termes absolus, ce sont toutefois les MRC de la Nouvelle-Beauce (8.9 Mm³), de Lotbinière (8.1 Mm³) et de Bellechasse (7.4 Mm³) qui font la plus grande consommation annuelle d'eau souterraine (**carte 26C**, figure 5.8). Les trois usages de l'eau souterraine consommée ont souvent des proportions équivalentes. Toutefois, on peut remarquer la faible proportion d'usage ICI pour la MRC de Montmagny (4.7%), tandis que dans la MRC Robert-Cliche cette proportion d'usage ICI est de 53%. C'est la MRC de Bellechasse qui a la plus grande proportion d'usage agricole (46%) de l'eau souterraine, alors que cette proportion n'est que de 13% pour la MRC des Etchemins. La proportion de l'usage résidentiel d'eau souterraine est plus important dans les MRC des Etchemins (69%) et de Beauce-Sartigan (57%).

La **carte 26D** (figure 5.9) donne un aperçu plus détaillé de la proportion de l'utilisation résidentielle de l'eau souterraine au niveau des municipalités. On constate que ces sont les municipalités situées au sud-est des MRC de l'Islet, Montmagny et des Etchemins qui ont généralement les plus grandes proportions d'utilisation résidentielle de l'eau souterraine. Au contraire, les municipalités situées dans un axe allant de Lévis à Saint-Georges (mais excluant Saint-Georges) ont plus souvent de faibles proportions d'usage résidentiel de l'eau souterraine. La **carte 26E** (figure 5.10) montre la densité des puits par municipalité, ce qui donne une indication de l'importance de l'utilisation d'eau souterraine en termes absolus. Sans surprise, la densité des puits tend à refléter aussi la densité de population. On voit ainsi des axes avec de fortes densités de puits entre Sainte-Croix et Montmagny, en bordure du fleuve Saint-Laurent, entre Lévis et Saint-Georges, en bordure de la vallée de la rivière Chaudière, et aussi entre Saint-Georges et Thetford Mines. La prochaine section présente l'indice de densité des activités anthropiques (**carte 23**, figure 5.12) qui donne une indication du potentiel de dégradation de la qualité d'eau souterraine.

La **carte 26F** (figure 5.11) a pour but de donner une indication par rapport aux conditions durables de l'exploitation de l'eau souterraine dans les municipalités de Chaudière-Appalaches. À cette fin, la **carte 26F** (figure 5.11) fait le rapport entre l'utilisation de l'eau souterraine dans chaque municipalité et la recharge à l'intérieur même de la municipalité qui représente le renouvellement de l'eau souterraine. Il faut toutefois considérer que l'eau souterraine exploitée dans une municipalité peut en fait provenir d'une recharge qui s'est produite en dehors de la municipalité.

La **carte 26F** (figure 5.11) montre que la proportion de la recharge correspondant à l'exploitation de l'eau souterraine est généralement à 43% (58 municipalités) sous 1% de la recharge, à 45% (61 municipalités) entre 2 et 7% de la recharge et à 8% (11 municipalités) entre 8 et 15% de la recharge. Ces proportions d'utilisation de la recharge apparaissent a priori permettre une exploitation soutenable de la ressource en eau souterraine. Il y a toutefois 6 municipalités dont la proportion de l'exploitation dépasse 15%, dont deux municipalités dépassent 25%. Ces seuils d'exploitation n'impliquent pas nécessairement une situation problématique mais ils indiquent qu'une évaluation plus détaillée de l'approvisionnement en eau souterraine pourrait être prudente. Sans aller dans les détails dans le cadre de nos travaux qui sont à l'échelle régionale, il est toutefois possible de mettre ces résultats en perspective par rapport aux conditions hydrogéologiques qui prévalent dans les secteurs des municipalités exploitant une plus forte proportion de la recharge. Dans le cas de Vallée-Jonction (avec 69% de la recharge exploitée), le territoire de la municipalité est d'étendue relativement limitée, il est situé en bordure de la rivière Chaudière où l'aquifère rocheux régional est en conditions semi-captives (**carte 17**), ce qui limite la recharge directement à l'intérieur de la municipalité (**carte 28B**). Toutefois, la **carte 28B** montre que la recharge est assez importante en bordure de la vallée et au-delà des limites de la municipalité, et l'écoulement de l'eau souterraine converge vers le territoire de la municipalité (**carte 20**). Ces conditions font en sorte que l'apport d'eau souterraine provenant de l'extérieur de Vallée-Jonction est important, de sorte que l'eau souterraine qui y est exploitée ne provient pas uniquement de l'intérieur des limites municipales. L'indice montré à la **carte 26F** est donc trompeur dans le cas de Vallée-Jonction. Les cinq (5) autres municipalités exploitant plus de 15% de la recharge en eau souterraine dans leur territoire sont situées dans un contexte similaire. Ces municipalités sont Saint-Flavien (30%), Saint-Agapit (17%) et Saint-Apollinaire (21%), dans la MRC de Lotbinière, ainsi que Saint-Lambert-de-Lauzon (20%) et Saint-Isidore (21%) dans la MRC de la Nouvelle-Beauce. Ces municipalités sont situées dans le contexte hydrogéologique des basses-terres du St-Laurent à des endroits où les conditions de l'aquifère rocheux régional sont captives ou semi-captives (**carte 17**) à cause d'accumulations épaisses de sédiments fins (**carte 15B**). Ces conditions font en sorte que la recharge est généralement faible dans ce secteur (**carte 28B**). De plus, l'apport d'eau souterraine provenant de l'extérieur des municipalités, notamment des Appalaches, est relativement limité comme l'indiquent les gradients hydrauliques horizontaux faibles de la carte piézométrique (**carte 20**).

Livrable PACES no. 26A : UTILISATION DE L'EAU - APPROVISIONNEMENT

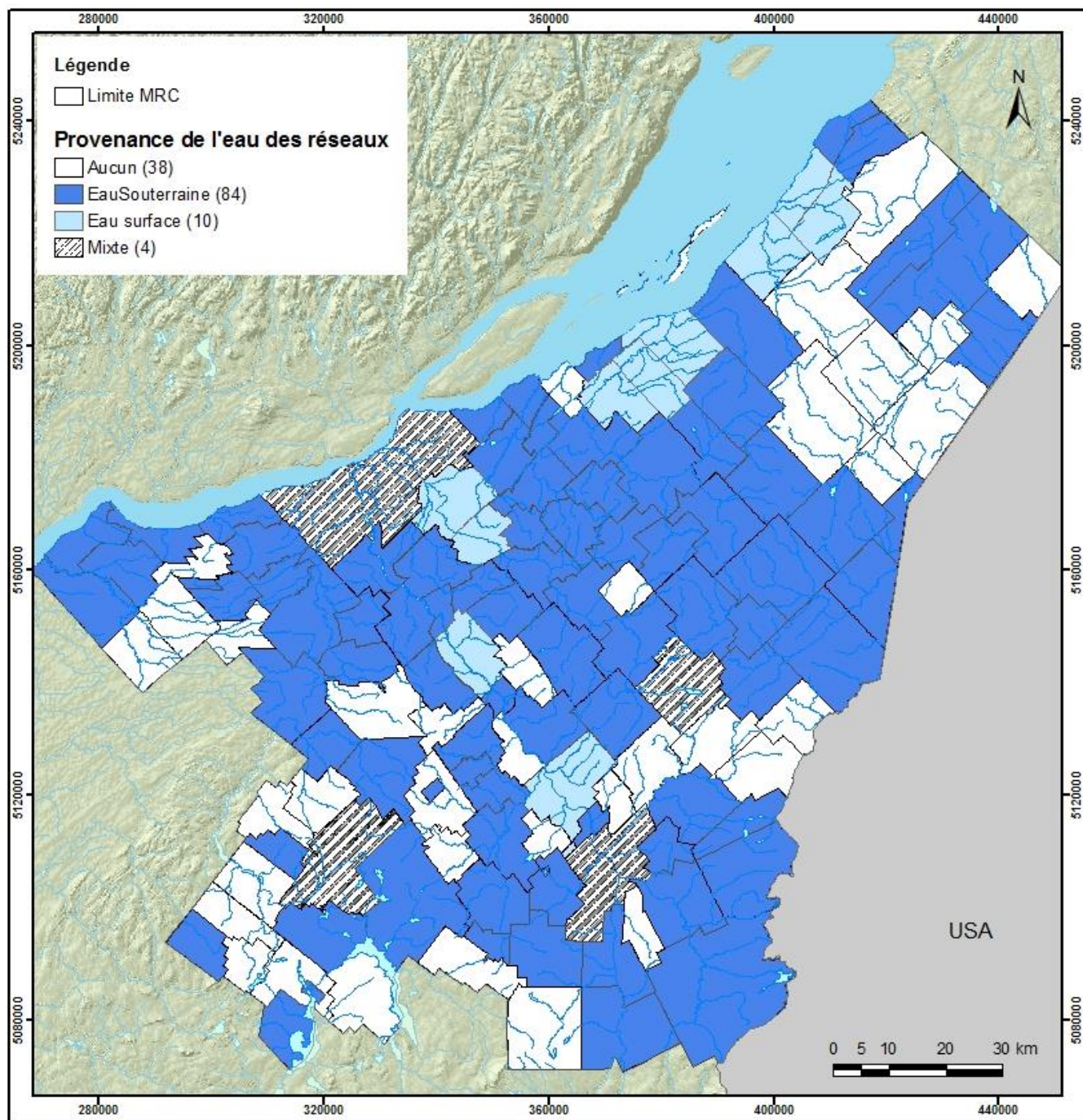


Figure 5.6 : Provenance de l'eau des réseaux par municipalité et localisation des captages (carte 26A)

Livrable PACES no. 26B : UTILISATION TOTALE D'EAU PAR MRC

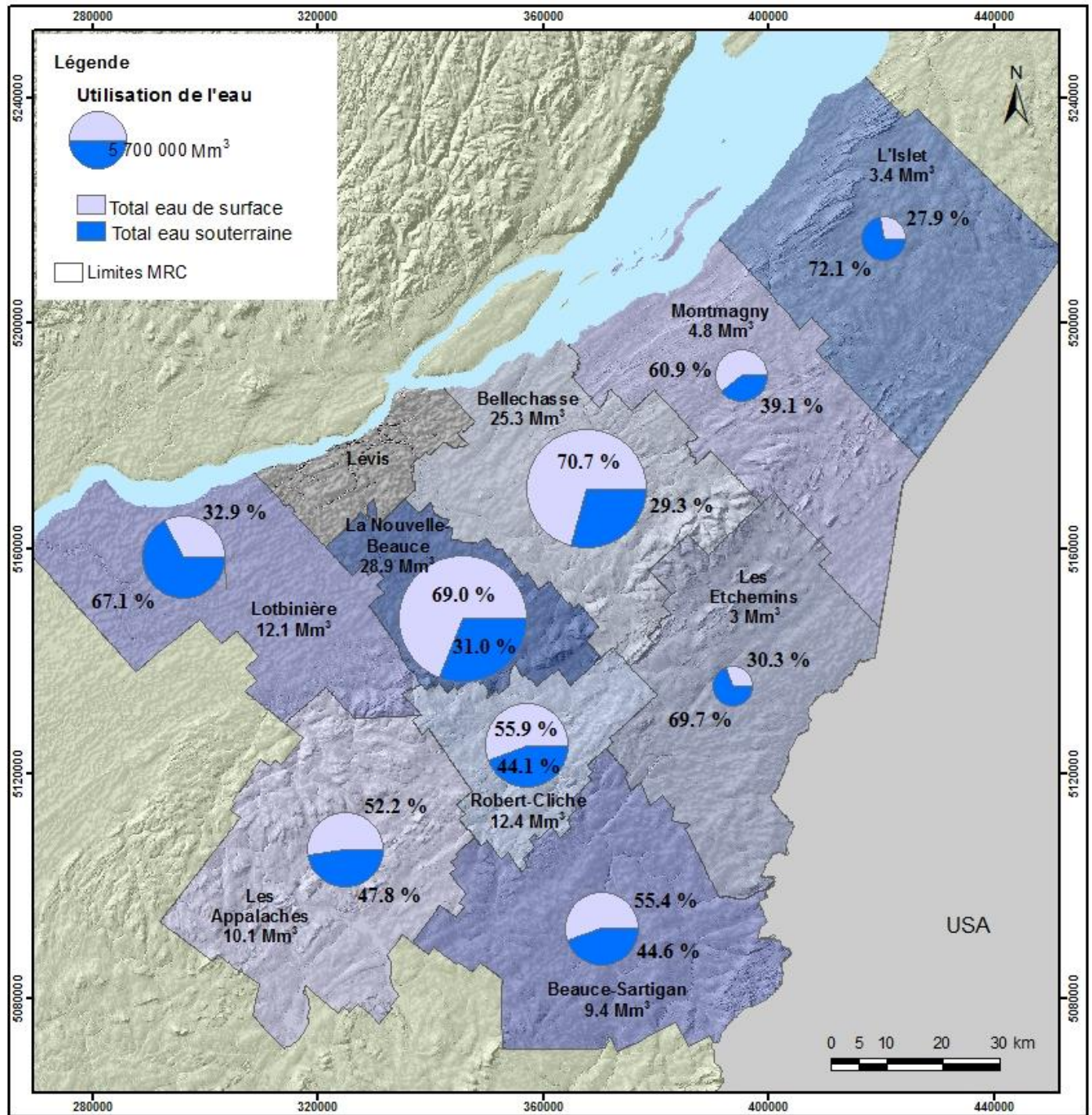


Figure 5.7 : Utilisation annuelle totale d'eau des MRC de Chaudière-Appalaches (carte 26B)

Livrable PACES no. 26C : UTILISATION DE L'EAU SOUTERRAINE PAR MRC

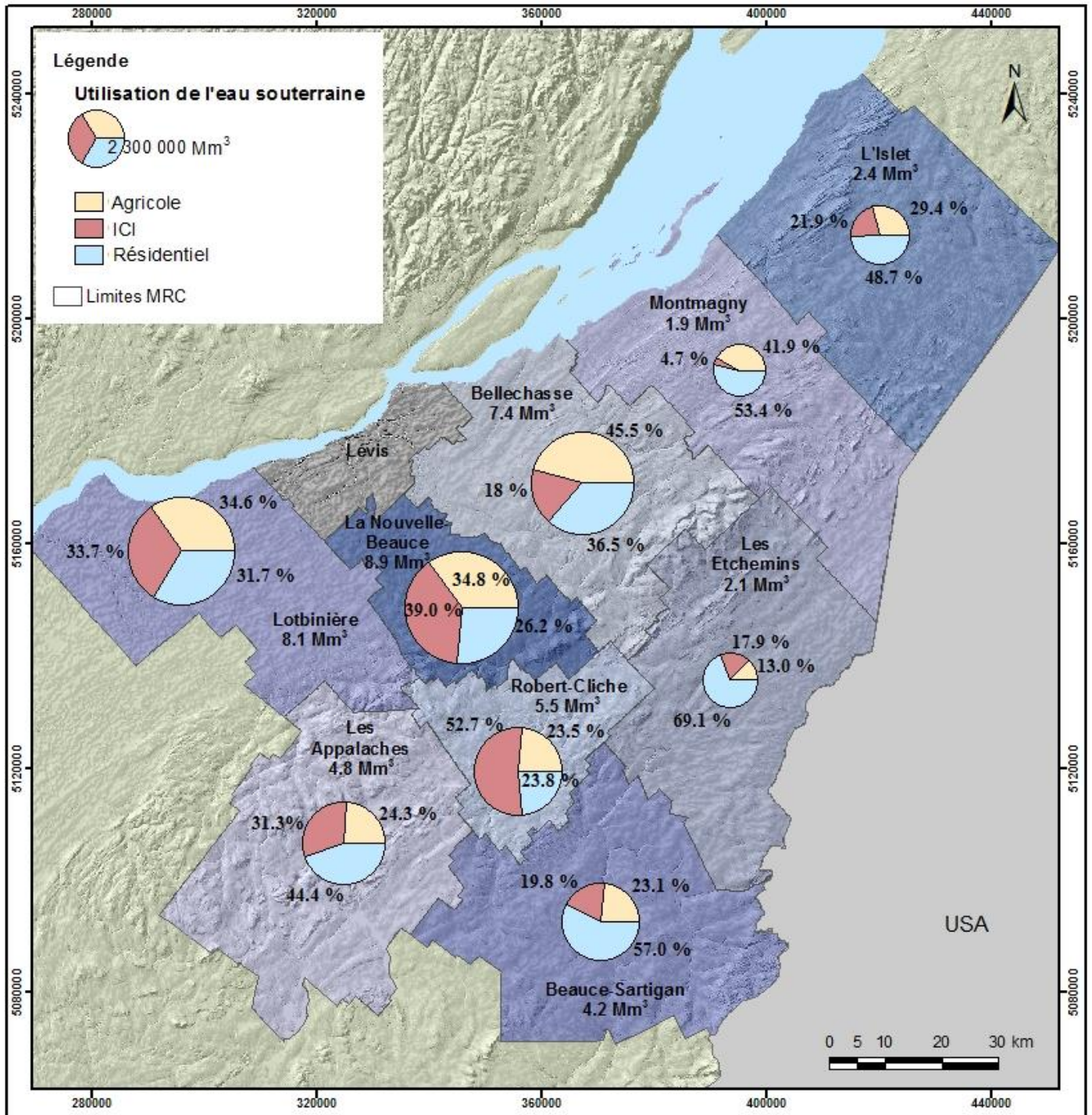


Figure 5.8 : Utilisation annuelle de l'eau souterraine des MRC de Chaudière-Appalaches (carte 26C)

Livrable PACES no. 26D : % DE L'UTILISATION RÉSIDENIELLE DE L'EAU SOUTERRAINE

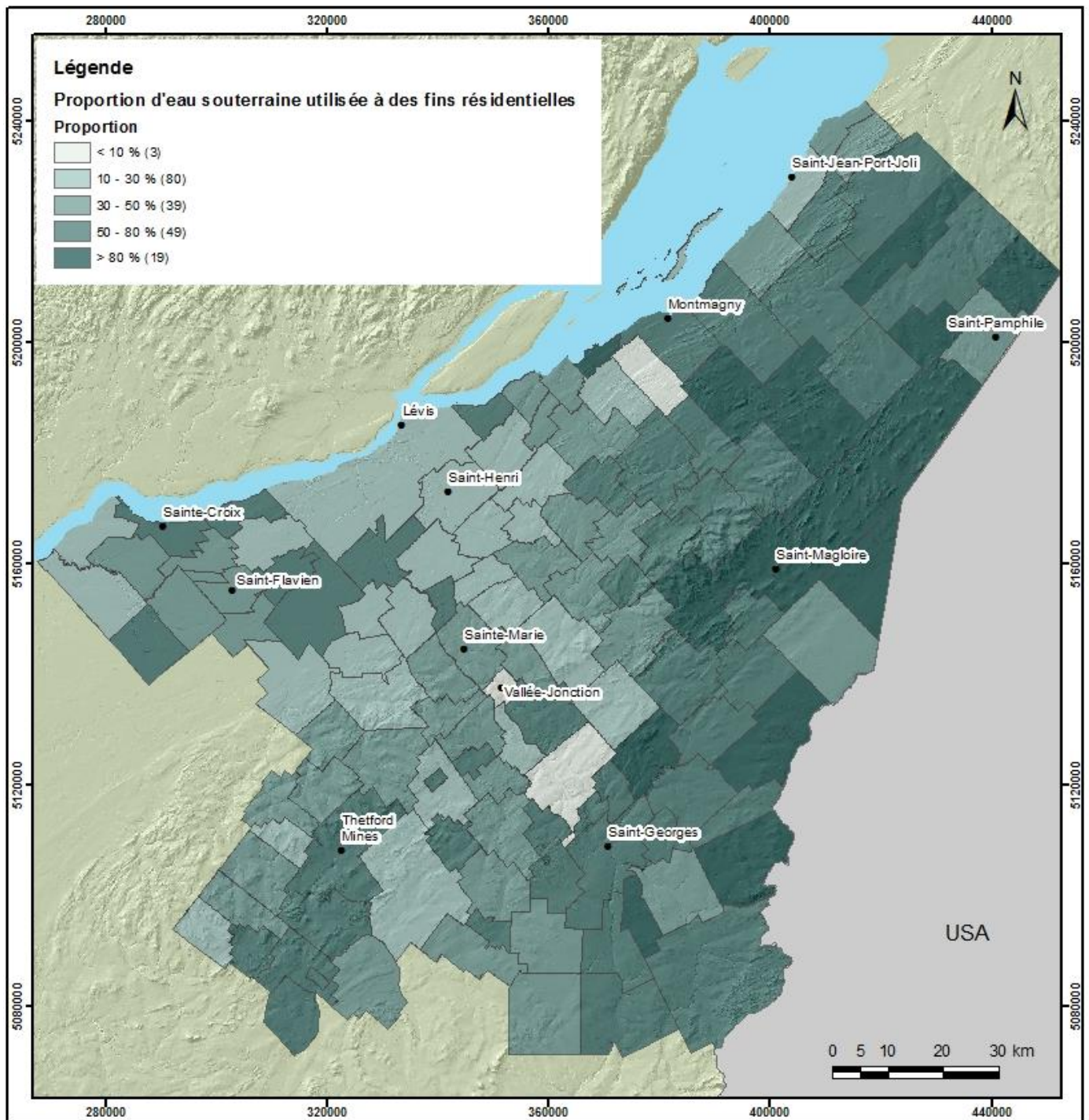


Figure 5.9 : Proportion de l'utilisation résidentielle de l'eau souterraine par municipalité (carte 26D)

Livrable PACES no. 26E : DENSITÉ DES PUIXS PAR MUNICIPALITÉ

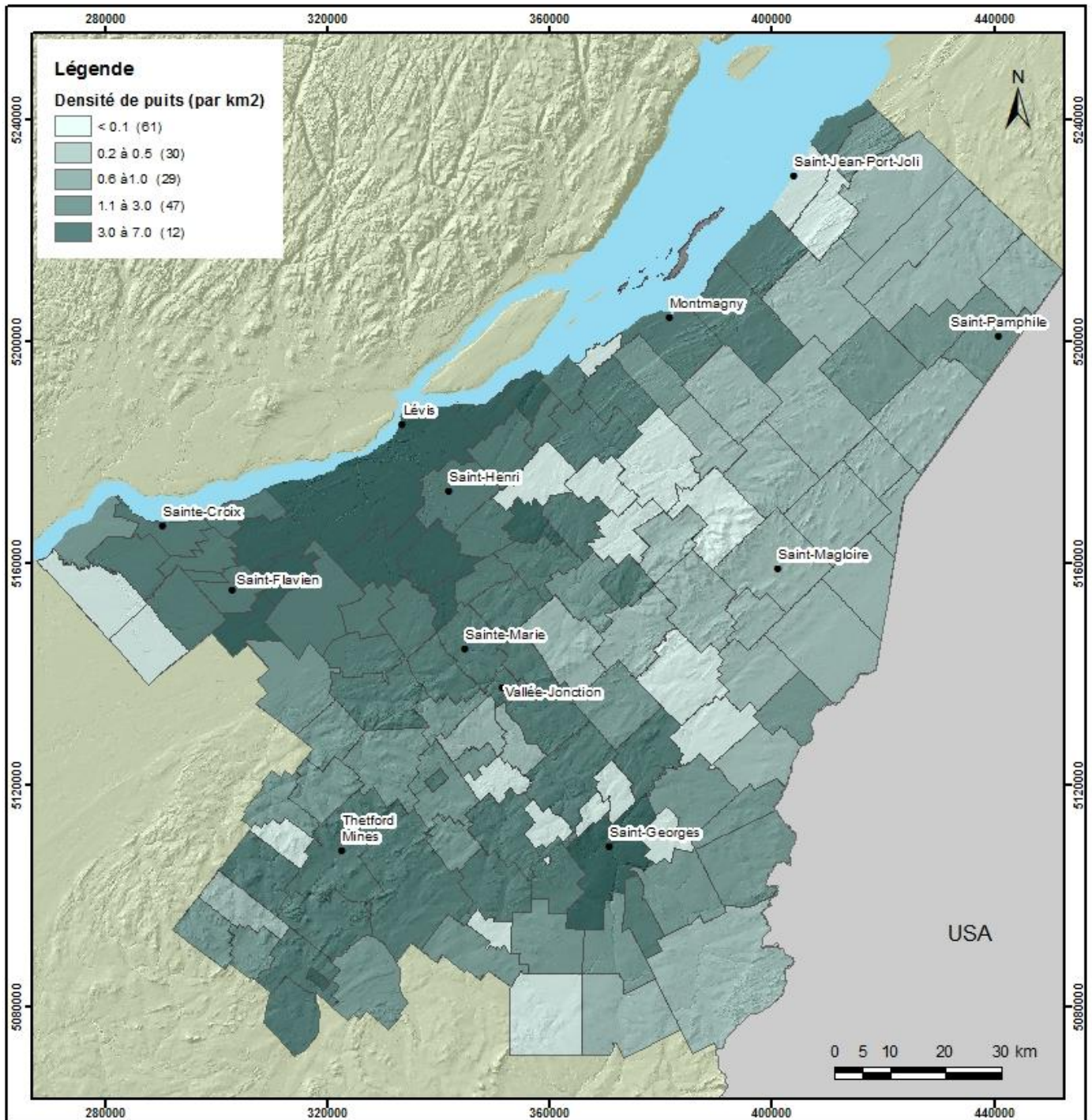


Figure 5.10 : Densité des puits par municipalité (carte 26E)

Livrable PACES no. 26F : UTILISATION DE L'EAU SOUTERRAINE PAR RAPPORT À LA RECHARGE

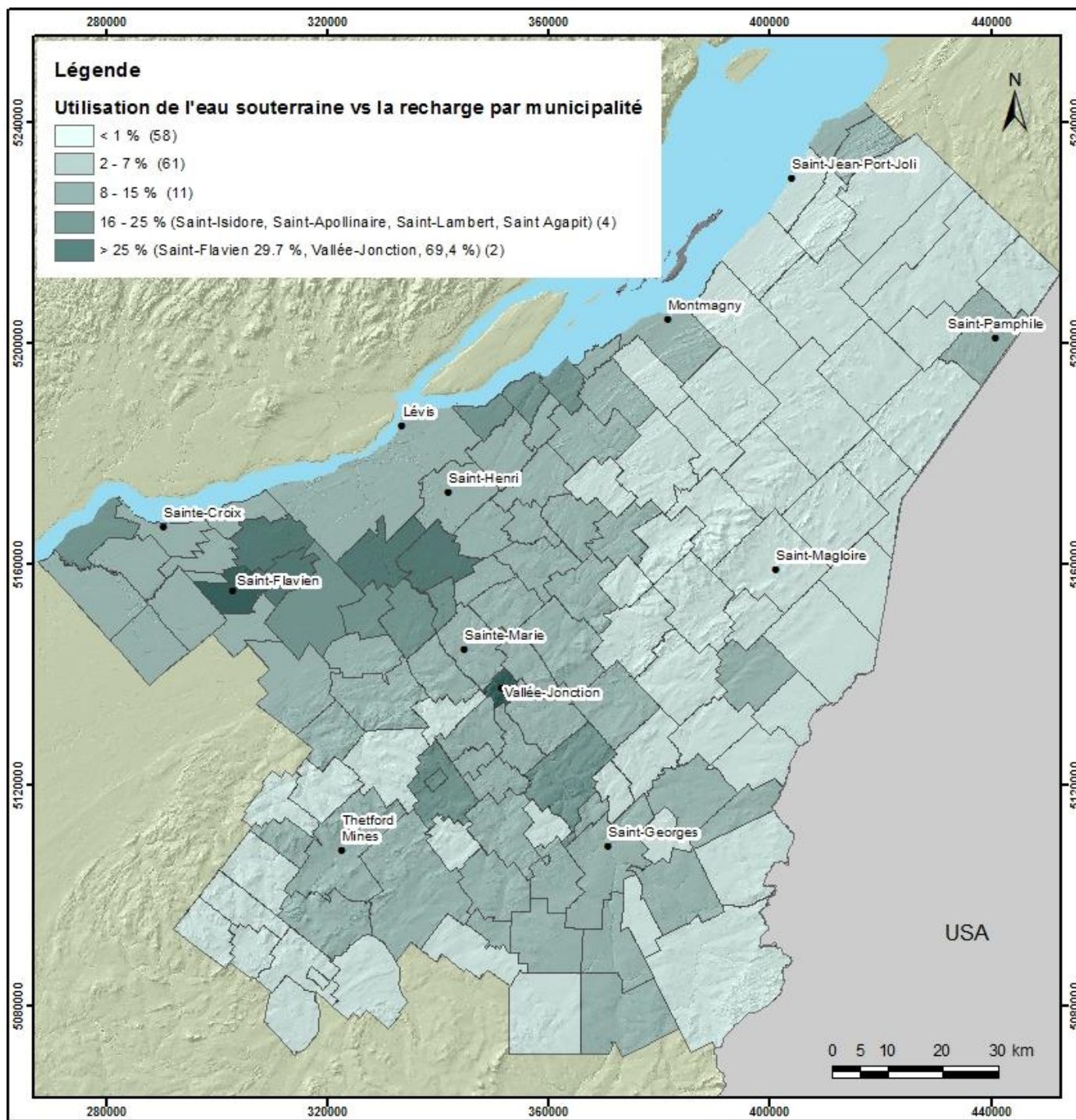


Figure 5.11 : Utilisation de l'eau souterraine par rapport à la recharge des municipalités de Chaudière-Appalaches (**carte 26F**)

Le faible renouvellement et l'écoulement lent de l'eau souterraine dans ce secteur sont d'ailleurs démontrés par la présence d'eau souterraine évoluée géochimiquement (section 4.6; figure 4.15). Ces eaux présentent une proportion significative de dépassements des critères de potabilité (section 5.4.1; **carte 24A**; figure 5.13), bien que les détections des dépassements n'aient pas nécessairement été faites à l'intérieur de ces municipalités. Ce groupe de 5 municipalités possède donc des ressources en eau souterraine qui ne sont pas rapidement renouvelées, ce qui fait que la disponibilité des ressources en eau souterraine doit être considérée dans la perspective de leur développement à moyen terme. Bien qu'aillant des proportions moindres d'exploitation de la recharge (entre 8 et 15%), les municipalités adjacentes de Scott, Saint-Bernard, Saint-Narcisse-de-Beaurivage et Saint-Gilles se trouvent dans des conditions hydrogéologiques similaires.

Dans notre rapport du projet PACES Montérégie Est ([Carrier et al., 2013a](#)), nous avons fait des recommandations pour que l'estimation de l'utilisation d'eau, particulièrement l'eau souterraine, puisse être réalisée plus facilement. Nous ne reprendrons pas ces recommandations en détail, même si elles s'appliquent encore aussi bien. Nous tenons toutefois à réitérer qu'il serait important que les informations sur l'utilisation d'eau à l'échelle municipale soient regroupées ou centralisées dans un même service (ministère) et maintenues à jour annuellement. Au niveau de l'usage agricole, il serait nécessaire de profiter dans toutes les régions de l'accès aux informations du MAPAQ qui sont essentielles pour estimer l'usage agricole de l'eau. De plus, une information manquante importante au niveau de la consommation agricole est la provenance de l'eau utilisée (de surface ou souterraine).

5.3 Activités potentiellement polluantes

La **carte 23** (figure 5.12) présente l'indice de densité des activités anthropiques qui a pour but d'indiquer 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 5.5, il est aussi nécessaire de considérer la vulnérabilité de l'aquifère pour juger du potentiel de dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Le protocole détaillé de production du livrable 23 est présenté en annexe.

Les données utilisées pour calculer l'indice de densité des activités anthropiques proviennent du système de classification des codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF) ([MAMROT, 2010c](#)). Le CUBF se prête facilement au traitement et au tri des données permettant ainsi de leur attribuer un niveau de risque potentiel. Les informations tirées des CUBF utilisées dans le cadre des projets PACES sont des données nominales confidentielles qui ne peuvent être divulguées publiquement. Dans le but de faciliter l'utilisation des données, les activités ont aussi été définies selon le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN). D'autres données ont aussi été utilisées pour compléter l'information fournie par le CUBF, notamment les répertoires de sites de gestion des matières résiduelles, la base de données sur les sites d'exploitation minière et de substances minérales, les répertoires des sites contaminés et des dépôts de sols et de résidus industriels ainsi que les données provenant d'organismes régionaux.

Livrable PACES no. 23 : INDICE DE DENSITÉ DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

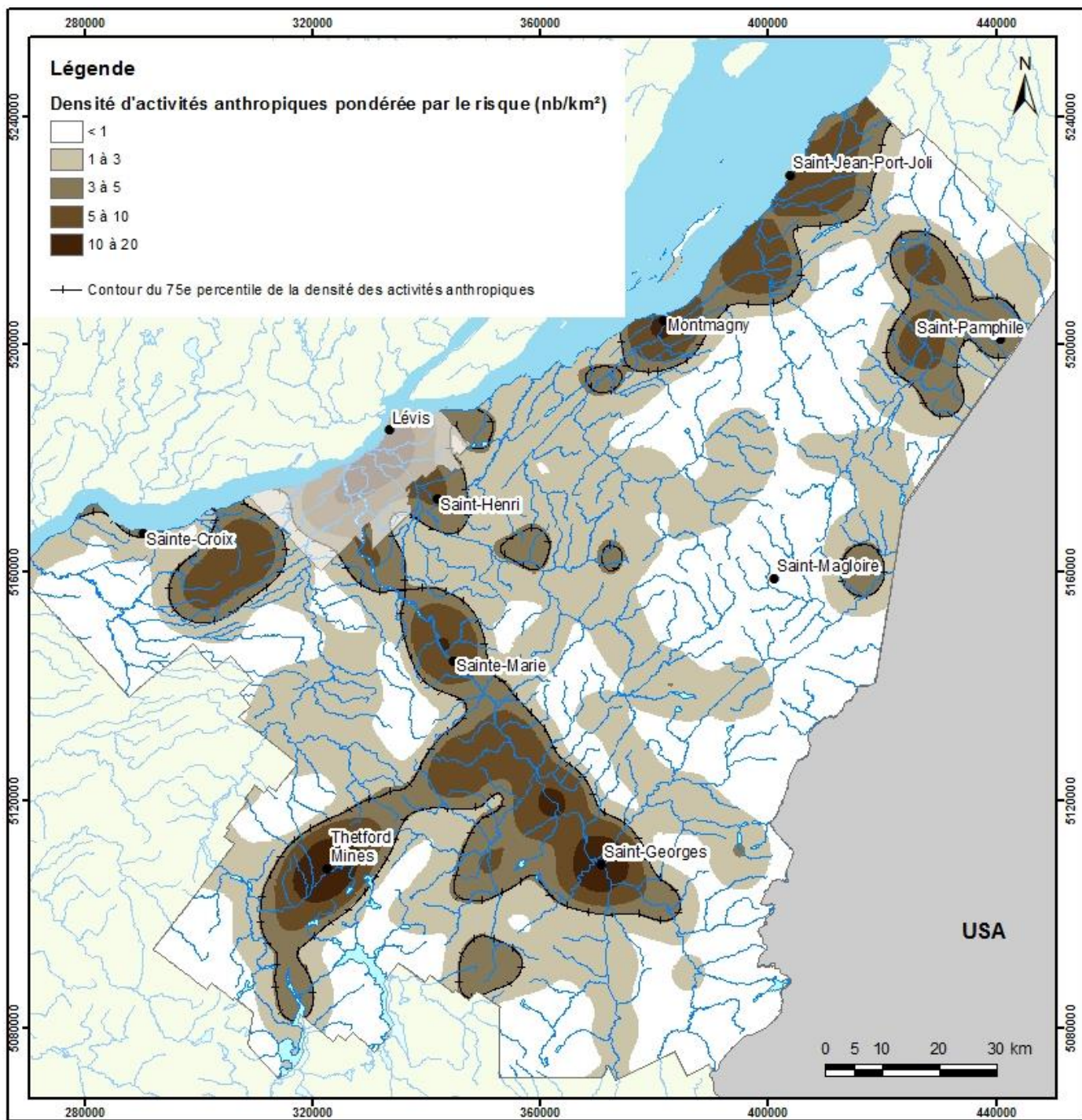


Figure 5.12 : Indice de densité des activités anthropiques (carte 23)

La méthode d'évaluation de l'impact potentiel des activités anthropiques 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](#); [US EPA, 1991](#); [Unesco, 2002](#); [SESAT, 2010](#)). Pour chacune des activités, quatre paramètres sont évalués de manière qualitative : la toxicité du ou des produits présents, la quantité de produits manipulés, la superficie 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 d'engrais ou 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 permettre la préparation d'un portrait régional de la pression des activités anthropiques, en termes de risque appréhendé, sur la qualité des ressources en eau souterraine.

La **carte 23** (figure 5.12) montre qu'il y a trois grands axes avec des indices plus élevés d'activités anthropiques : 1) la bordure du fleuve Saint-Laurent, de Sainte-Croix à Saint-Jean-Port-Joli, 2) la vallée de la rivière Chaudière, entre Lévis et Saint-Georges, et 3) entre Thetford Mines et la vallée de la Chaudière. Il y a aussi de forts indices au nord-ouest de Saint-Pamphile. Ces activités anthropiques potentiellement polluantes doivent être mises en relation avec l'usage de l'eau souterraine et la vulnérabilité de l'aquifère dans les secteurs à fort indice d'activité anthropique. La **carte 26E** (figure 5.10) montre la densité des puits par municipalité, ce qui donne une indication de l'importance de l'utilisation d'eau souterraine en termes absolus. Sans surprise, la densité des puits tend à refléter aussi la densité de population. On voit ainsi des axes avec de fortes densités de puits qui sont similaires à ceux avec fort indice d'activité anthropique. La **carte 22B** (figure 4.13) de la vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional montre que la vulnérabilité est généralement faible dans l'axe Sainte-Croix-Montmagny, mais qu'elle est souvent élevée à très élevée dans les axes entre Lévis et Saint-Georges ainsi qu'entre Saint-Georges et Thetford Mines. Toutefois, les indications de dégradation anthropique potentielle de la qualité de l'eau souterraine (section 4.6, figure 4.15) ne concordent que pour le secteur entre Sainte-Marie et Saint-Georges et elles débordent latéralement à des endroits où l'indice d'activité anthropique est faible. Cet indice ne tient pas compte des activités agricoles qui peuvent être reliées à la dégradation de la qualité (section 4.6, figure 4.19).

5.4 Qualité de l'eau

5.4.1 Qualité de l'eau souterraine

5.4.1.1 Qualité par rapport aux critères

Au Québec, les critères de qualité de l'eau potable sont définis par le Règlement sur la qualité de l'eau potable ([Gouvernement du Québec, 2012](#); chapitre Q-2, r.40). Ce règlement fixe des concentrations maximales acceptables (CMA) pour différents paramètres chimiques présents dans l'eau naturelle, afin d'assurer la santé humaine. Une eau dont la composition chimique excède la CMA, pour au moins un paramètre, est qualifiée de « non potable ».

[Santé Canada \(2012\)](#) émet également des recommandations pour la qualité de l'eau potable, mais plus spécifiquement pour des paramètres présentant une préoccupation uniquement d'ordre esthétique (OE). Un dépassement pour l'un ou l'autre de ces paramètres peut influencer, par exemple, la couleur ou le goût de l'eau, mais sans affecter sa potabilité.

Lors de la campagne d'échantillonnage réalisée à l'été 2013, les résultats analytiques étaient comparés aux critères provinciaux et fédéraux dès leur émission par le laboratoire d'analyse. Un suivi rapide a donc pu être réalisé avec les propriétaires de puits qui ont été avisés si l'eau de leur puits excédait les critères applicables à un ou plusieurs paramètres.

Le tableau 5.4 présente la qualité des eaux souterraines pour tous les puits étudiés dans le cadre du présent projet pour la subdivision suivante des échantillons : tous les puits analysés; les puits associés à des aquifères granulaires; ainsi que les puits associés à l'aquifère rocheux. Le nombre de puits pour lesquels les paramètres ont été analysés, le nombre de dépassements obtenus et le pourcentage des puits présentant un dépassement sont présentés pour chacun des critères applicables. Il est à noter que quatre (4) puits ne sont associés à aucun aquifère par manque d'information sur le puits. La somme des puits des aquifères granulaires et de l'aquifère fracturé est donc inférieure au nombre total de puits. Il n'y a eu aucun dépassement des normes de qualité pour les quatre (4) puits dont le type d'aquifère était inconnu.

Tableau 5.4 : Statistiques sur les dépassements des normes de qualité d'eau

Para- mètre	Unité	CMA'	OE ²	Tous les puits (387)			Puits dans les aquifères fracturés (297)			Puits dans les aquifères granulaires (86)		
				Nb. puits	Nb. excès	% excès	Nb. puits	Nb. excès	% excès	Nb. puits	Nb. excès	% excès
1: Concentration maximale acceptable pour la santé (eau potable) Règlement sur la qualité de l'eau potable c. Q-2, r. 40 (Gouvernement du Québec, 2012)												
Sb	mg/L	0.006	-	316	2	0.6%	256	1	0.4%	60	1	1.7%
As	mg/L	0.01	-	354	12	3.4%	280	9	3.2%	74	3	4.1%
Ba	mg/L	1	-	359	5	1.4%	279	4	1.4%	80	1	1.3%
F	mg/L	1.5	-	338	12	3.6%	263	12	4.6%	75	-	0.0%
NO₂-NO₃	mg N/L	10	-	348	1	0.3%	270	1	0.4%	78	-	0.0%
Pb	mg/L	0.01	-	350	2	0.6%	278	0	0.0%	72	2	2.8%
2: Recommandations d'ordre esthétique (OE) pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2012)												
Al	mg/L	-	≤0.1	316	4	1.3%	256	2	0.8%	60	2	3.3%
Cl	mg/L	-	≤250	355	14	3.9%	277	9	3.2%	78	5	6.4%
Dureté	mg/L	-	>200 ³	334	74	22.2%	267	54	20.2%	67	20	29.9%
			>500 ⁴		4	1.2%			1		0.4%	
Fe	mg/L	-	≤0.3	368	48	13.0%	285	34	11.9%	83	14	16.9%
Mn	mg/L	-	≤0.05	372	187	50.3%	289	148	51.2%	83	39	47.0%
MDT	mg/L	-	≤500	345	74	21.4%	268	59	22.0%	77	15	19.5%
Na	mg/L	-	≤200	360	21	5.8%	280	17	6.1%	80	4	5.0%
S²⁻	mg/L	-	≤0.05	327	39	11.9%	256	25	9.8%	71	14	19.7%
pH	-	-	<6.5	337	31	9.2%	263	15	5.7%	74	16	21.6%
			>8.5			22		6.5%			22	8.4%

Notes : 3: qualité médiocre entre 200 et 500 mg/L; 4: qualité intolérable à plus de 500 mg/L.

Les figures 5.13, 5.14 et 5.15 montrent la distribution spatiale des données présentées au tableau 5.4. Chacune des cartes de la mosaïque présente la localisation des puits analysés pour un paramètre normé donné, la nature de l'aquifère intercepté (fracturé ou granulaire) et distingue par une taille et une couleur distinctes les puits présentant un dépassement des critères de qualité pour ce paramètre. Les figures 5.13 et 5.15 regroupent les paramètres visés par la Règlement sur la qualité de l'eau potable, tandis que la figure 5.14 fait référence aux recommandations de Santé Canada sur les critères esthétiques. Seuls les paramètres pour lesquels il y a un dépassement ou plus sont représentés dans le tableau 5.4 et sur les cartes des figures 5.13, 5.14 et 5.15.

Livrable PACES no. 24A : QUALITÉ DE L'EAU (CRITÈRES POUR L'EAU POTABLE)

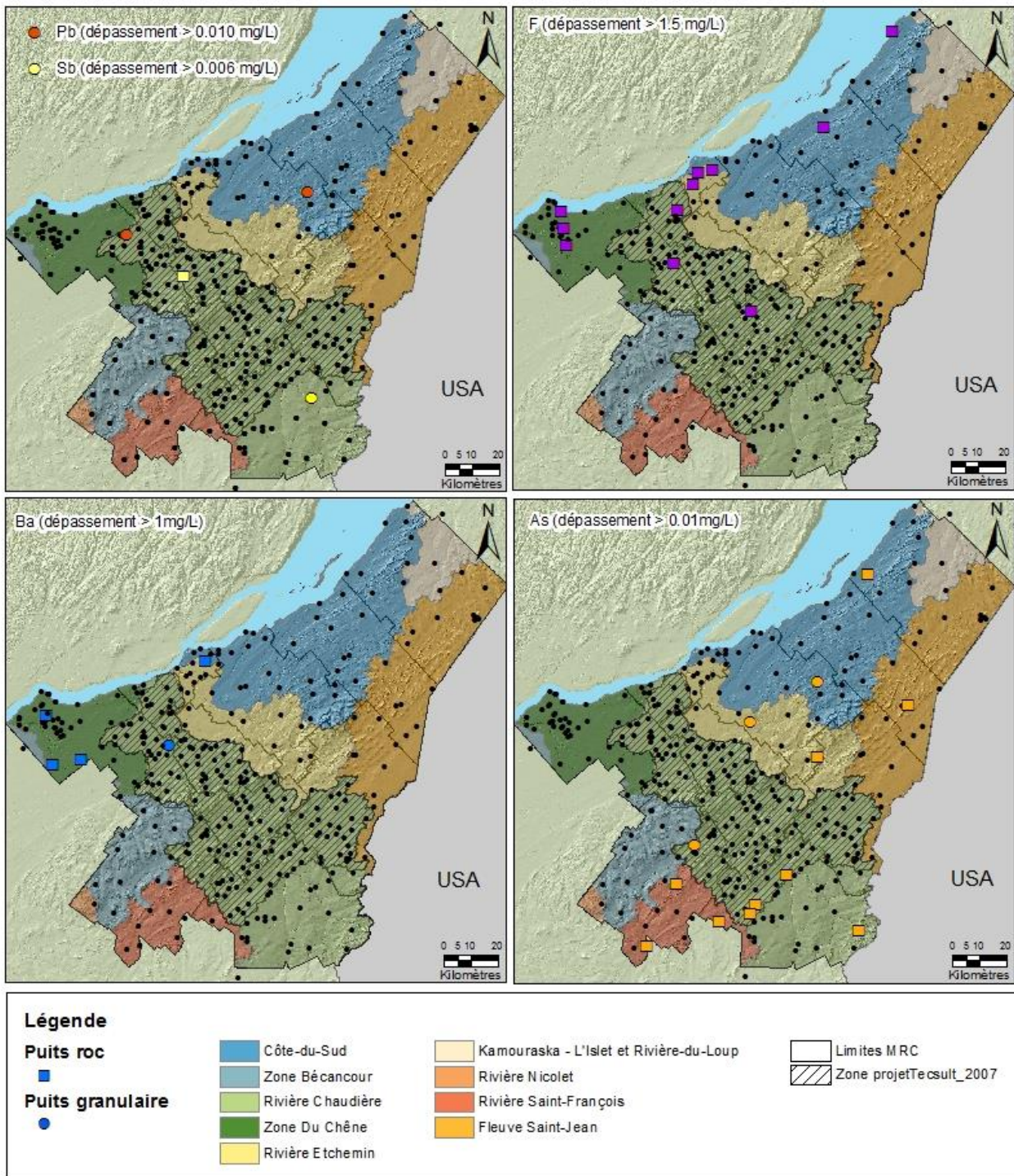


Figure 5.13 : **Cartes 24A** de la répartition des dépassements pour l'un des paramètres de potabilité : Cd, Pb et Sb; F; Ba; As. Les concentrations maximales acceptables de chaque paramètre sont indiquées sur les cartes et les grands symboles colorés représentent les localisations avec des dépassements. Les puits conformes sont illustrés par un symbole noir. Les types de puits sont distingués par la forme des symboles

Livrable PACES no. 25A : QUALITÉ DE L'EAU (CRITÈRES ESTHÉTIQUES)

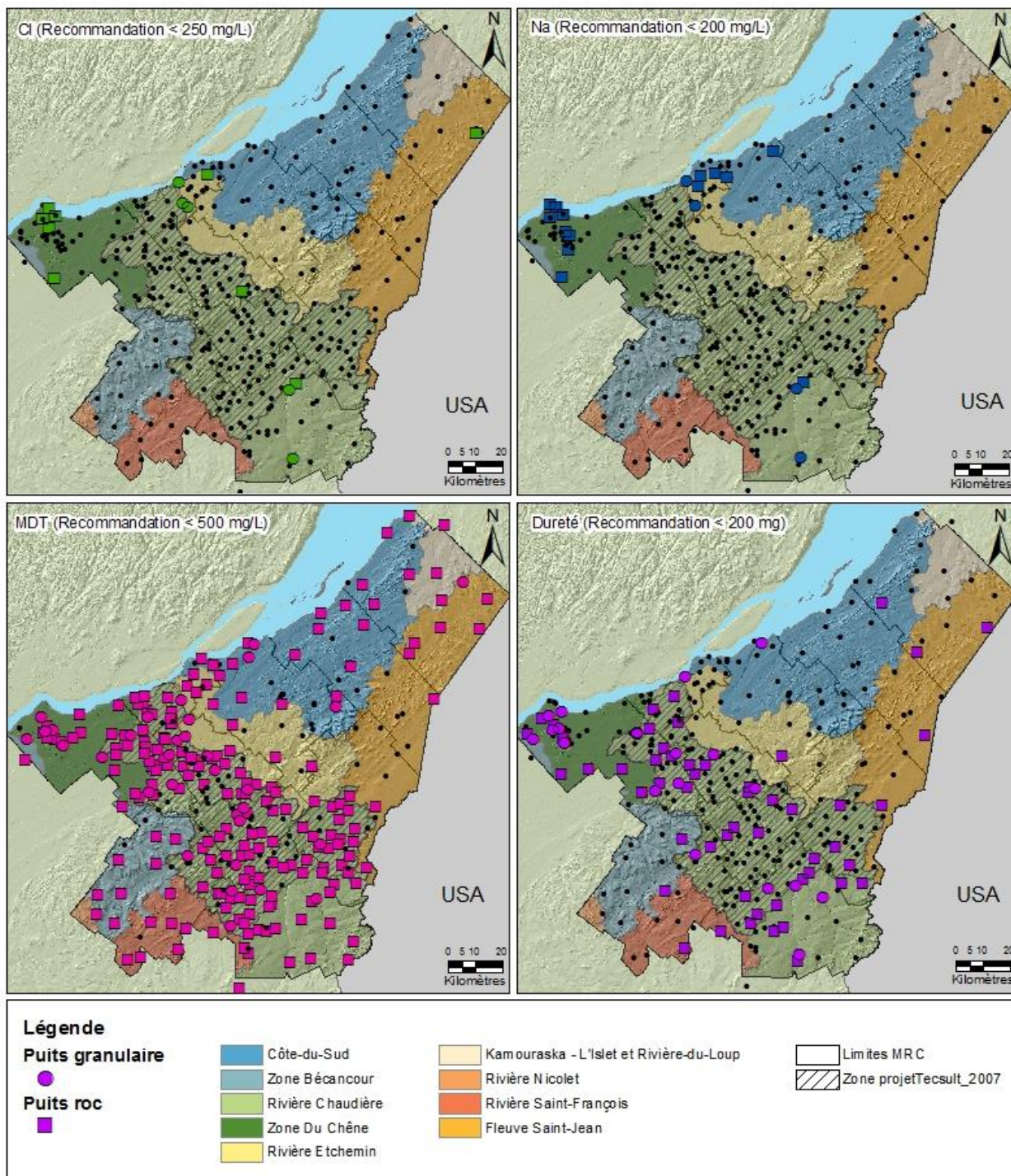
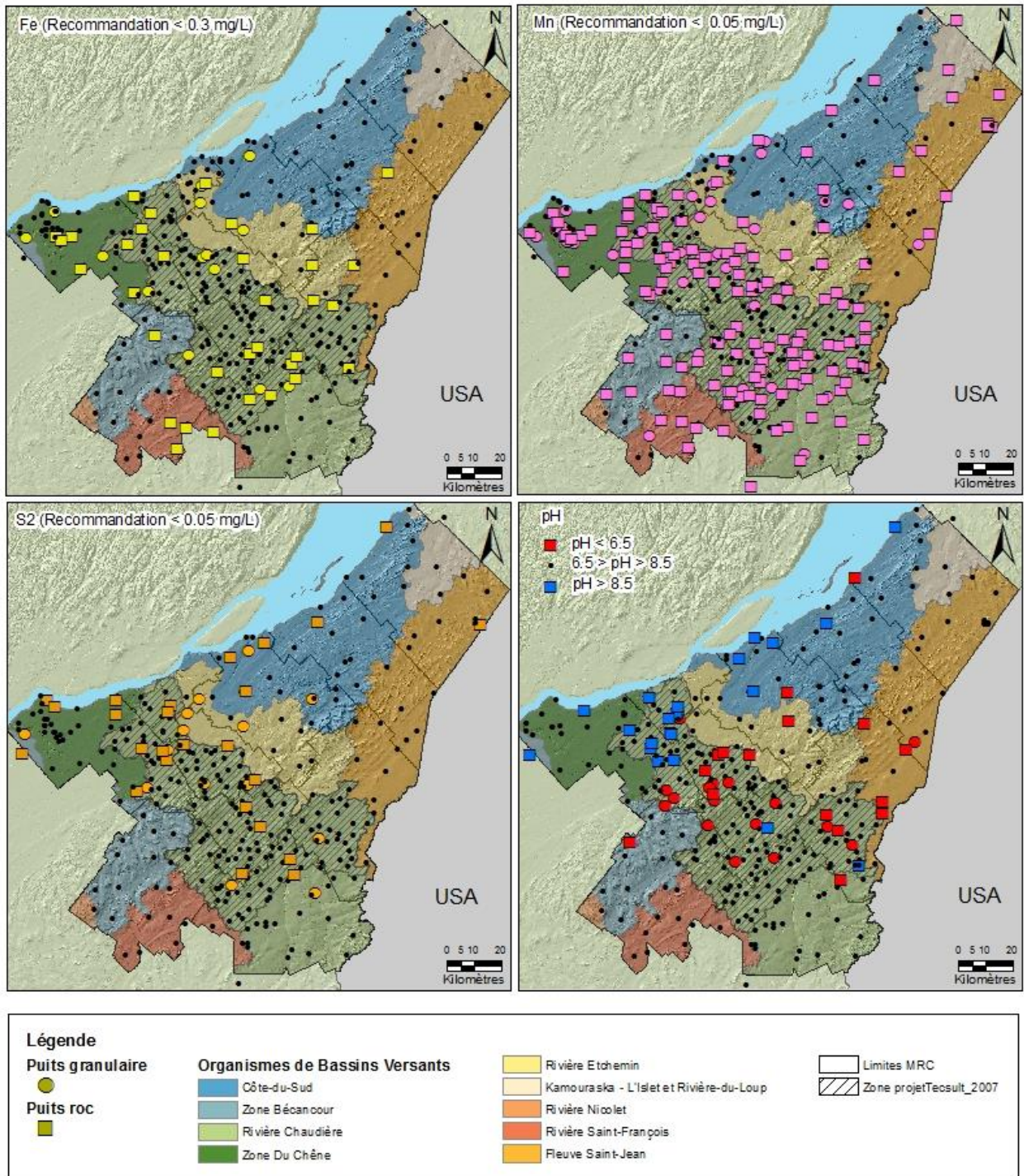


Figure 5.14 : **Cartes 25A** de la répartition des dépassements pour l'un des paramètres esthétiques : Cl, Na, matières dissoutes totales (MDT) et dureté. Les critères de chaque paramètre sont indiqués sur les cartes et les grands symboles colorés représentent les localisations des dépassements. Les puits conformes sont illustrés par un symbole noir. Les types de puits sont distingués par la forme des symboles

Livrable PACES no. 25B : QUALITÉ DE L'EAU (CRITÈRES ESTHÉTIQUES)



Le tableau 5.4 et la figure 5.13 montre qu'il n'y a pas de problème de qualité relié aux métaux puisque seulement deux dépassements en Sb et en Pb ont été répertoriés. Par contre, il y a des problématiques de potabilité de l'eau par rapport à la présence naturelle d'arsenic (As), de fluorures (F) et de baryum (Ba). Les dépassements de la CMA pour l'arsenic affectent 4,0% de l'ensemble des puits. Ces dépassements sont en majorité associés aux aquifères rocheux (11 dépassements sur 14) et sont localisés dans les Appalaches (zones de Humber interne et de Dunnage et limite de la ceinture de Gaspé). Les dépassements en fluorures et baryum affectent respectivement 3,6% et 1,4% des puits avec des valeurs disponibles. Les dépassements de CMA pour F et Ba sont associés majoritairement aux aquifères au roc et sont situés sous la limite marine de la mer de Champlain, particulièrement près du fleuve Saint-Laurent.

Les deux mosaïques de cartes de la figure 5.14 montrent que les problématiques reliées aux objectifs d'ordre esthétique sont plus nombreuses, bien qu'elles n'affectent pas la potabilité de l'eau. La moitié des puits analysés présente une trop grande concentration en manganèse (Mn). Notons aussi que le pH est soit trop acide ou trop alcalin pour plus de 15% des puits. Les pH trop acides (< 6.5) sont présents à la fois dans les puits dans les aquifères granulaire et dans le roc. Toutefois, on ne retrouve des pH trop alcalins (> 8.5) que dans l'aquifère rocheux, surtout dans les eaux évoluées retrouvées en bordure du fleuve Saint-Laurent. D'autres critères esthétiques présentent des dépassements : les chlorures et le sodium ont quelques dépassements, surtout en bordure du fleuve; l'eau est souvent dure, contient trop de solides dissous totaux ou trop de sulfures particulièrement en bordure du fleuve et dans le bassin de la rivière Chaudière; et il y a des dépassements en aluminium par endroits (non représentés sur les cartes de la figure 5.14).

La figure 5.15 montre une carte de la répartition des concentrations en nitrites et nitrates. Ce paramètre est d'intérêt dans la région parce qu'il peut donner des indications de l'impact des activités anthropiques sur la qualité de l'eau souterraine, particulièrement les activités agricoles qui sont importantes dans plusieurs secteurs de la région. Au niveau des dépassements de la CMA pour les nitrites et nitrates, il n'y a qu'un seul échantillon provenant d'un puits au roc. Toutefois, pour les nitrites et nitrates, il faut aussi regarder s'il y a des concentrations sous la CMA mais qui indiqueraient un apport anthropique. Une concentration de 3 mg/L est généralement considérée comme une concentration montrant un effet anthropique significatif et nécessitant l'amorce d'actions pour réduire l'apport de nitrates à l'eau souterraine. Encore une fois, il y a très peu d'endroits où les concentrations dépassent le seuil de 3 mg/L, indiquant qu'il n'y a pas d'impact important sur la majeure partie de la région d'étude. De plus, très peu d'endroits ont des concentrations excédant 1 mg/L qui est un seuil indiquant qu'il y a un effet anthropique. Toutefois, tel que discuté à la section 4.6, il y a des évidences de dégradation de la qualité d'eau dans la région, surtout dans la vallée de la rivière Chaudière et les vallées de ses principaux affluents. Cette dégradation ne mène généralement pas à des dépassements de CMA, mais indique que les activités anthropiques ont eu des effets sur la qualité de l'eau souterraine.

Livrable PACES no. 24B : QUALITÉ DE L'EAU (CRITÈRES POUR L'EAU POTABLE)

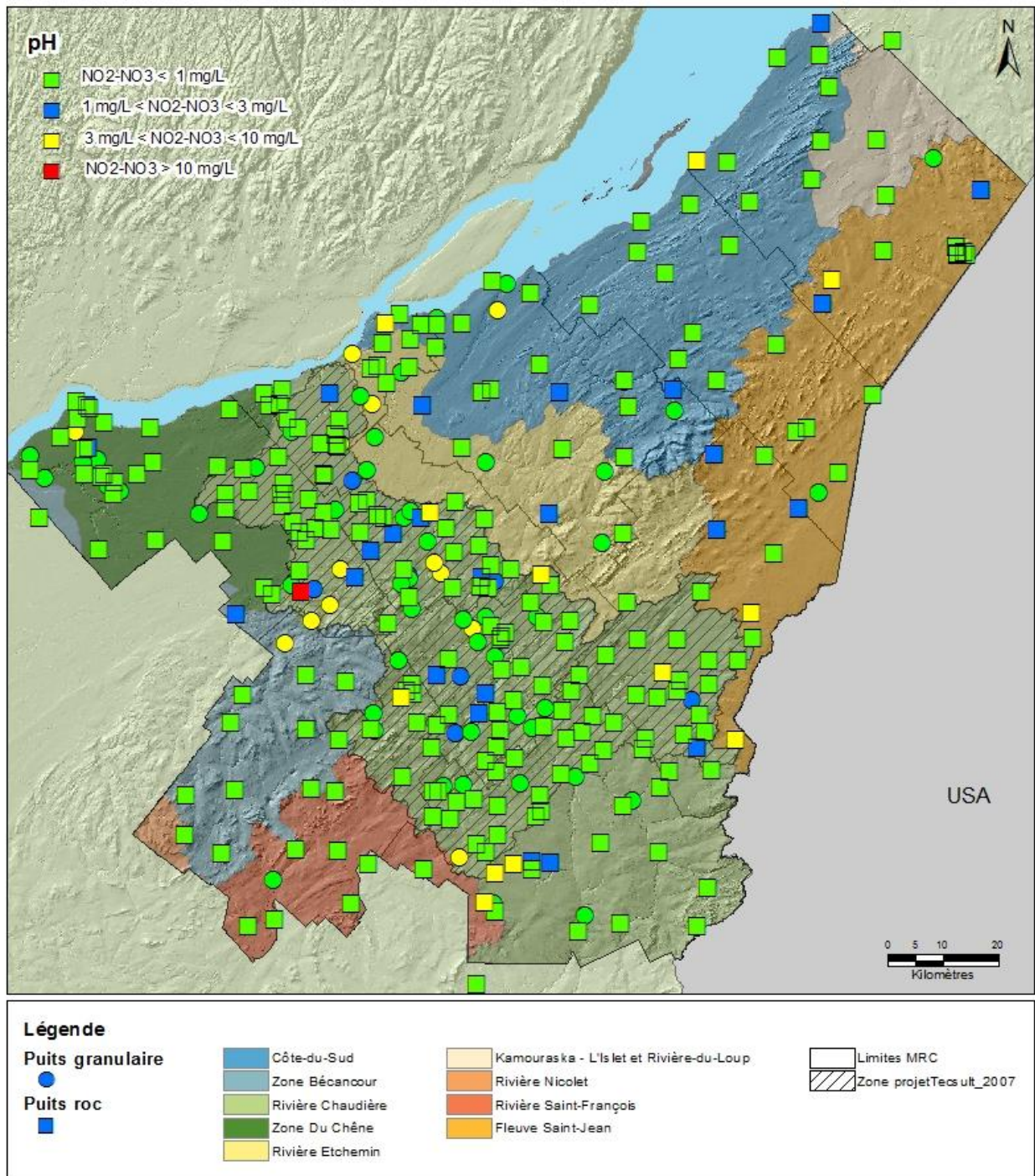


Figure 5.15 : **Carte 24B** de la répartition des concentrations en nitrite et nitrate pour les types de puits qui sont distingués par la forme des symboles. La CMA des nitrite et nitrate est de 10 mg/L

5.4.1.2 Qualité par rapport aux types d'eau

La mise en relation de la qualité des eaux souterraines régionales avec l'étude hydrogéochimique, présentée à la section 4.6, permet de mieux comprendre les contrôles sur la qualité des eaux. Le tableau 5.5 présente la synthèse de la qualité de l'eau et des caractéristiques hydrogéochimiques de chacun des 7 groupes d'eau définis à la section 4.6.

Tableau 5.5 : Caractéristiques géochimiques des groupes d'eau et qualité d'eau

Groupe	Distribution spatiale	Confinement*	Caractéristiques chimiques et physiques distinctives	Éléments mineurs	Qualité relative
1 orange	Restreinte à la région de Thetford Mines.	SC - C	Eau à évolution cationique avec enrichissement en Mg, de type Mg-HCO ₃ . Enrichie en HCO ₃ , SiO ₂ et appauvrie en Na, K, Cl, Sr, NH ₄ et Ba. Effet minéralogique: présence de lithologies mafiques / magnésiennes.	Si, Fe, Mn	Passable
2 vert	Sur l'ensemble du territoire, surtout dans les Appalaches.	L - SC	Eau de recharge de type Ca-HCO ₃ . Plus faible MDT: appauvrie en Na, Cl, SO ₄ , K, F, B, Br et Li. Enrichie en tritium. Eau jeune.		Acceptable
3 jaune	Au niveau des vallées de la haute et moyenne Chaudière.	L - SC	Eau de recharge type Ca-HCO ₃ enrichie en SO ₄ et NO ₂ -NO ₃ par rapport au groupe 2 et pH le plus acide. Eau plus jeune et plus oxydée. Appauvrie en F, Fe, NH ₄ , COD, B, Br et Li.	NO ₂ -NO ₃ , SO ₄	Acceptable
4 bleu	Sous la limite marine surtout, quelques exceptions en Haute-Chaudière.	SC - C	Eau en évolution. Âge intermédiaire. Aussi acide que le groupe 3. Eau type Ca-Na-K-HCO ₃ -Cl. Enrichie en COD, Cl, NO ₃ -NO ₂ , NH ₄ , CH ₄ et Ba. Appauvrie en Mg, Fe et Mn. Effets anthropique probables.	NO ₃ -NO ₂ , COD, NH ₄ , Ba	Acceptable à passable
5 violet	Sous la limite marine surtout, quelques exceptions en Haute-Chaudière.	SC - C	Eau avec évolution de la salinité. Échange cationique Ca \leftrightarrow Na, eau type Na-HCO ₃ . Enrichie en Na, Cl, Sr, F, B, Ba et Li. Milieu peu oxydé.	Sr, F, B, Ba, Li	Acceptable
6 rouge	Sous la limite marine.	SC - C	Eau évoluée de type Na-K-Anions. pH le plus alcalin, Eh élevé. Milieu réducteur. Eau vieille. Plus riche en méthane (zone Lotbinière). Enrichie en Na, Cl. Appauvrie en Ca, Mg, Sr, Fe, NO ₃ -NO ₂ , Mn.	F, NH ₄ , COD, B, Br, Li	Passable
7 bleu clair	3 points sous limite marine, 3 points dans la Haute-Chaudière.	SC - C	Possible l'eau la plus affectée par les effets anthropiques. Type Cation-HCO ₃ -Cl. Eau dominée par Cl, Na et SO ₄ . Plus grande concentration de MDT. Enrichie en Ca, Mg, Na, HCO ₃ , Cl, K. Appauvrie en CH ₄ .	SO ₄ , Si, Sr, Fe, NO ₂ - NO ₃ , COD, Mn, Ba, Br, Li	Passable à non potable

* : Niveau de confinement des aquifères : Libre (L), semi-captif (SC), captif (C).

La connaissance des groupes d'eau permet d'identifier 3 grandes familles d'eaux de qualités différentes :

1. Les eaux jeunes, de recharge, de qualité acceptable (groupes 2 et 3) à passable (groupe 1), selon le contexte géologique et le niveau de confinement. Plus de 50% des puits de ces groupes dépassent cependant les recommandations esthétiques pour le manganèse.
2. Les eaux évoluées, caractérisées par le mécanisme d'échange ionique Na-Ca, de qualité passable (groupes 5 et 6). Le pH est souvent très alcalin et les MDT sont élevées.

3. Les eaux affectées par les activités anthropiques (groupes 3, 4 et 7) dont la qualité varie selon le niveau de contamination, allant jusqu'à non potable (groupe 7). Ces eaux représentent près de 40% de l'ensemble des eaux étudiées, ce qui démontre que les activités anthropiques semblent avoir un impact important sur la qualité des eaux souterraines à l'échelle de la région. Il faut toutefois noter qu'il y a une plus grande densité d'échantillons dans le bassin de la rivière Chaudière où se trouvent en majorité les eaux affectées par les activités anthropiques.

Globalement, dans toute la région, la qualité de l'eau est généralement bonne avec moins de 5% de dépassements des critères reliés à la santé. Cependant, les évidences de dégradation de la qualité de l'eau à cause d'activités anthropiques affecte une partie significative du territoire (groupes 3, 4 et 7). Notre étude n'avait pas pour but de faire une évaluation détaillée des causes d'une dégradation de la qualité de l'eau souterraine et il reste une incertitude par rapport aux causes de cette dégradation et donc aux moyens qui pourraient être mis en œuvre pour réduire progressivement cette dégradation ou empêcher son expansion. Au niveau esthétique, le Mn est un problème généralisé dans la région d'étude à près de 50% des échantillons. La dureté, le MDT et le pH sont aussi des problèmes esthétiques courants (>20%).

5.4.2 Qualité de l'eau de surface

5.4.2.1 Problématique et méthodologie

Afin de dresser un portrait global de la qualité des eaux de surface de la Chaudière-Appalaches, particulièrement en relation avec la présence de contaminants agricoles, les résultats analytiques existants sur les nitrites et nitrates (N-NO₂ et N-NO₃) ainsi que le phosphore total dissous (P_{tot} dissous) ont été compilés à partir de la *Banque de données sur la qualité du milieu aquatique* (BQMA) (MDDEFP, 2011). Seules les données provenant des stations d'échantillonnage des rivières Boyer, Etchemin et Chaudière ont été compilées; les données disponibles pour les stations de suivi sur les autres cours d'eau n'étant pas suffisamment complètes pour faire une analyse significative. Les 3 stations de la rivière Boyer, les 5 stations de la rivière Etchemin ainsi que les 4 stations de la rivière Chaudière ont été localisées à la figure 5.16 et décrites au tableau 5.6. L'indice de qualité de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQBP) (Hébert, 1997) a aussi été calculé pour ces mêmes stations afin de fournir une appréciation plus globale de la qualité des eaux de surface.

5.4.2.2 Nitrites, nitrates et phosphore

La figure 5.17 illustre l'évolution des concentrations moyennes annuelles en nitrites et nitrates (exprimés en mg/L d'azote, N) pour les stations des rivières Boyer, Etchemin et Chaudière. La figure 5.18 montre l'évolution des concentrations moyennes annuelles en phosphore total dissous pour ces mêmes cours d'eau. Les jeux de données disponibles les plus complets couvrent la période de 1979 à 2011.

Les données des différentes stations sont identifiées par un code de couleur variant du froid (bleu pâle, bleu foncé) pour les stations en amont hydraulique, au chaud (rouge à orangé) pour les stations les plus en aval du cours d'eau, soit près du fleuve St-Laurent. L'analyse de la tendance des concentrations annuelles moyennes pour les stations d'un même cours d'eau, autant pour les nitrites et nitrates que pour le phosphore total dissous, permet de faire deux constats :

- 1) Les concentrations présentent une faible diminution des concentrations annuelles moyennes de l'amont vers l'aval pour les rivières Boyer et Chaudière. Effectivement, les activités agricoles de ces bassins versants sont généralement plus concentrées dans les secteurs amont.
- 2) À l'inverse, les concentrations annuelles moyennes pour la rivière Etchemin augmentent de l'amont vers l'aval. La station de Lévis (St-Romuald), la plus près de l'embouchure, présente les concentrations moyennes les plus élevées.

L'analyse de l'évolution générale dans le temps du phosphore total dissous, sans distinction du cours d'eau, montre une claire tendance à la baisse pour les concentrations annuelles moyennes (figure 5.18). Cette baisse reflète possiblement l'effet de la réglementation et l'amélioration des pratiques agricoles et domestiques durant cette période. Cette baisse ne s'applique toutefois pas aux concentrations annuelles moyennes en nitrates qui semblent relativement stables dans le temps pour la rivière Chaudière et montrent même une tendance à la hausse pour les rivières Etchemin et Boyer.

Finalement, la comparaison des données disponibles pour chacune des rivières montre que la qualité des eaux de la rivière Boyer est beaucoup plus affectée par les contaminants agricoles que les rivières Etchemin et Chaudière. Des concentrations annuelles moyennes supérieures à 5 mg/L de nitrites et nitrates ont été mesurées pour l'année 2009, tandis que celles pour les rivières Etchemin et Chaudière ne dépassent pas 2 mg/L. Il en va de même pour le phosphore total dissous pour lequel les concentrations mesurées pour la rivière Boyer excèdent souvent de deux fois celles des deux autres cours d'eau.

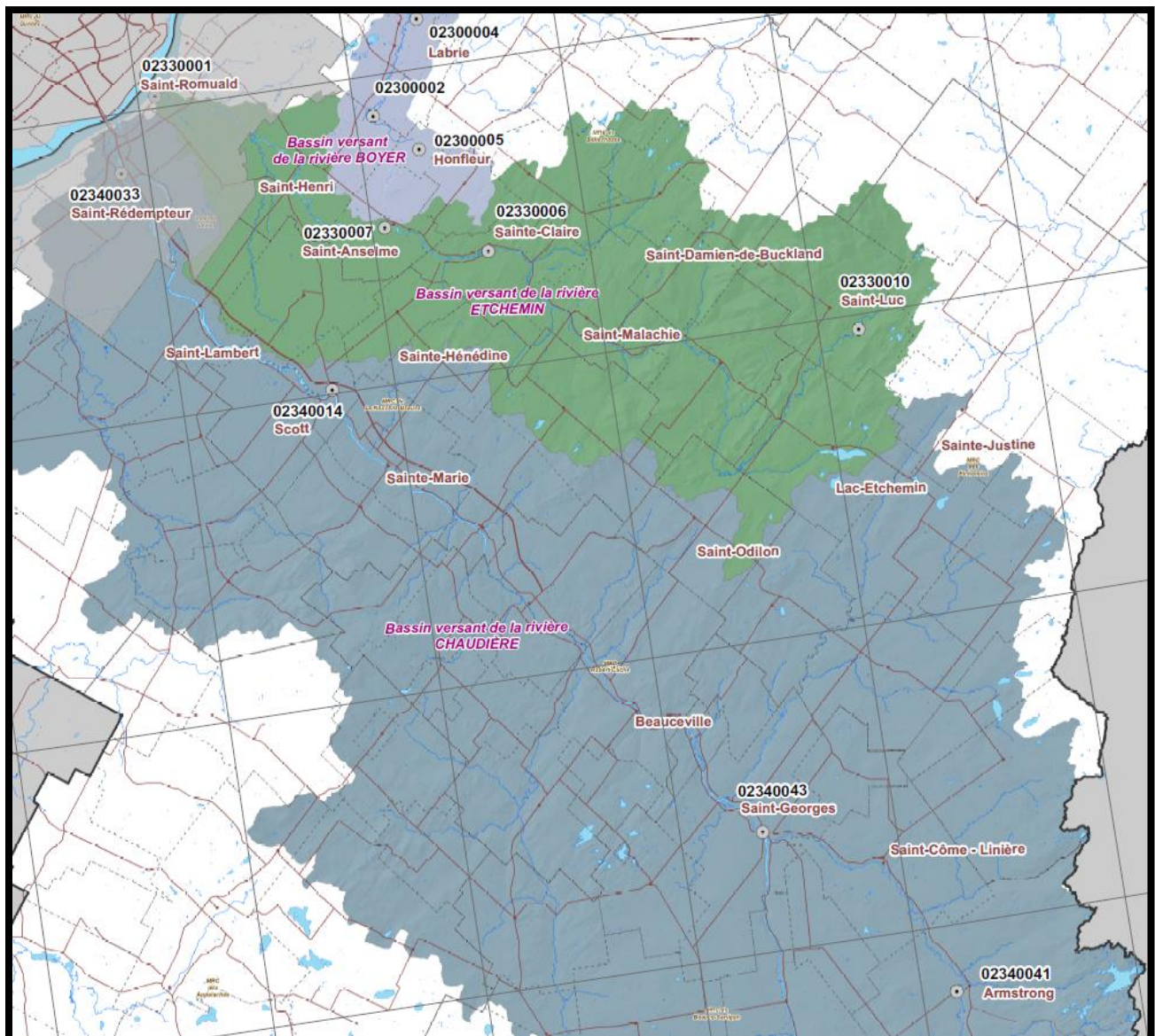


Figure 5.16 : Localisation des stations de suivi et d'échantillonnage des eaux de surface pour les rivières Boyer, Etchemin et Chaudière (MDDELCC, 2011b)

Tableau 5.6 : Localisation et description des suivis associés aux stations d'échantillonnage des rivières Boyer, Etchemin et Chaudière (d'après [MDDEFP, 2011](#))

Localisation des stations d'échantillonnage des eaux de surface						Description du suivi		
Rivière	No. station	Municipalité	Description de la localisation	Latitude	Longitude	Nombre échantill.	Période	
							Du	Au
BOYER	02300001	St-Michel	Pont de la route 281, au sud-est du village.	46.8540	-70.8780	527	1990-05-27	2011-12-06
	02300002	St-Charles	Pont, à 7 km en amont du village.	46.7180	-70.9778	461	1990-07-11	2011-12-06
	02300003	St-Charles	Pont, à 9 km en amont du village.	46.7063	-70.0020	426	1990-07-11	2011-12-06
ETCHEMIN	02330001	St-Romuald (Lévis)	Pont de la route 132.	46.7598	-70.2283	445	1979-01-11	2011-12-05
	02330006	Ste-Claire	Pont.	46.5961	-70.8677	155	1989-09-10	1997-10-16
	02330007	St-Anselme	Pont en aval du village.	46.6274	-70.9837	19	1990-07-11	1997-10-16
	02330008	Lac-Etchemin	Pont de la route 277, au nord-ouest du village.	46.4261	-70.5586	88	1989-09-04	1995-10-01
	02330010	St-Luc	Au pont de la route au sud-est du village.	46.4878	-70.4522	198	1994-11-06	2011-12-07
CHAUDIÈRE	02340004	Notre-Dame-des-Pins	Pont couvert Perreault.	46.1825	-70.7166	661	1979-01-07	2011-11-06
	02340014	Scott	Pont de la route 171	46.5039	-71.0730	619	1979-01-07	2011-11-07
	02340033	Charny (Lévis)	À 5,6 km de l'embouchure.	46.7020	-71.2808	392	1982-12-21	2011-12-05
	02340050	St-Romuald (Lévis)	Pont de la route 132, à 1,3 km de l'embouchure.	46.7357	-71.2822	83	1988-07-12	2011-11-08

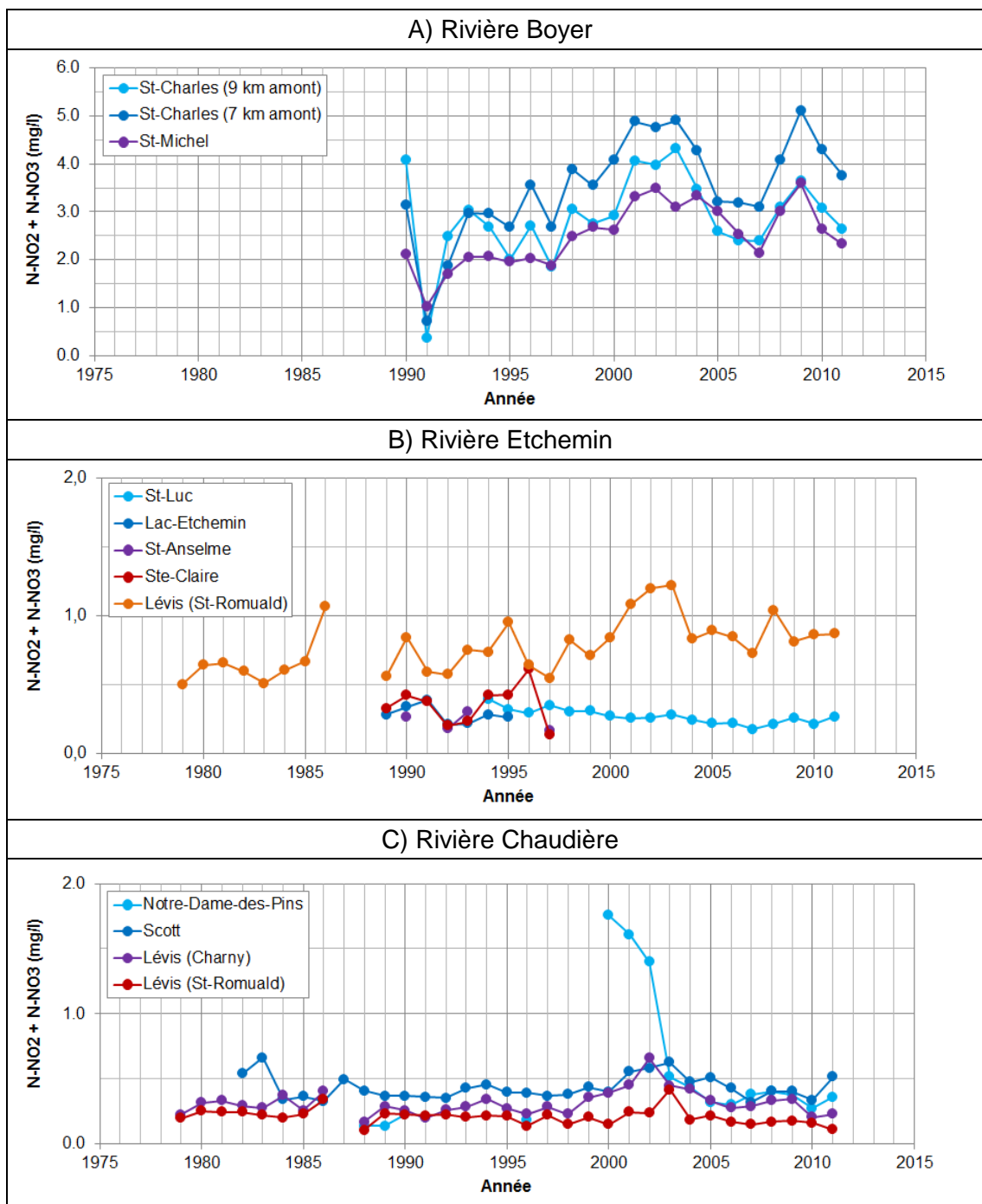


Figure 5.17 : Évolution des concentrations en nitrites et nitrates (N-NO₂ et N-NO₃), entre les années 1979 et 2011, pour les rivières Boyer (A), Etchemin (B) et Chaudière (C). La station d'échantillonnage et de suivi associée à chacune des courbes apparaît dans les légendes selon la direction d'écoulement, soit de l'amont (près de la source) vers l'aval (près du fleuve St-Laurent). L'échelle verticale du graph A est trois fois plus grande que celle des graph B et C

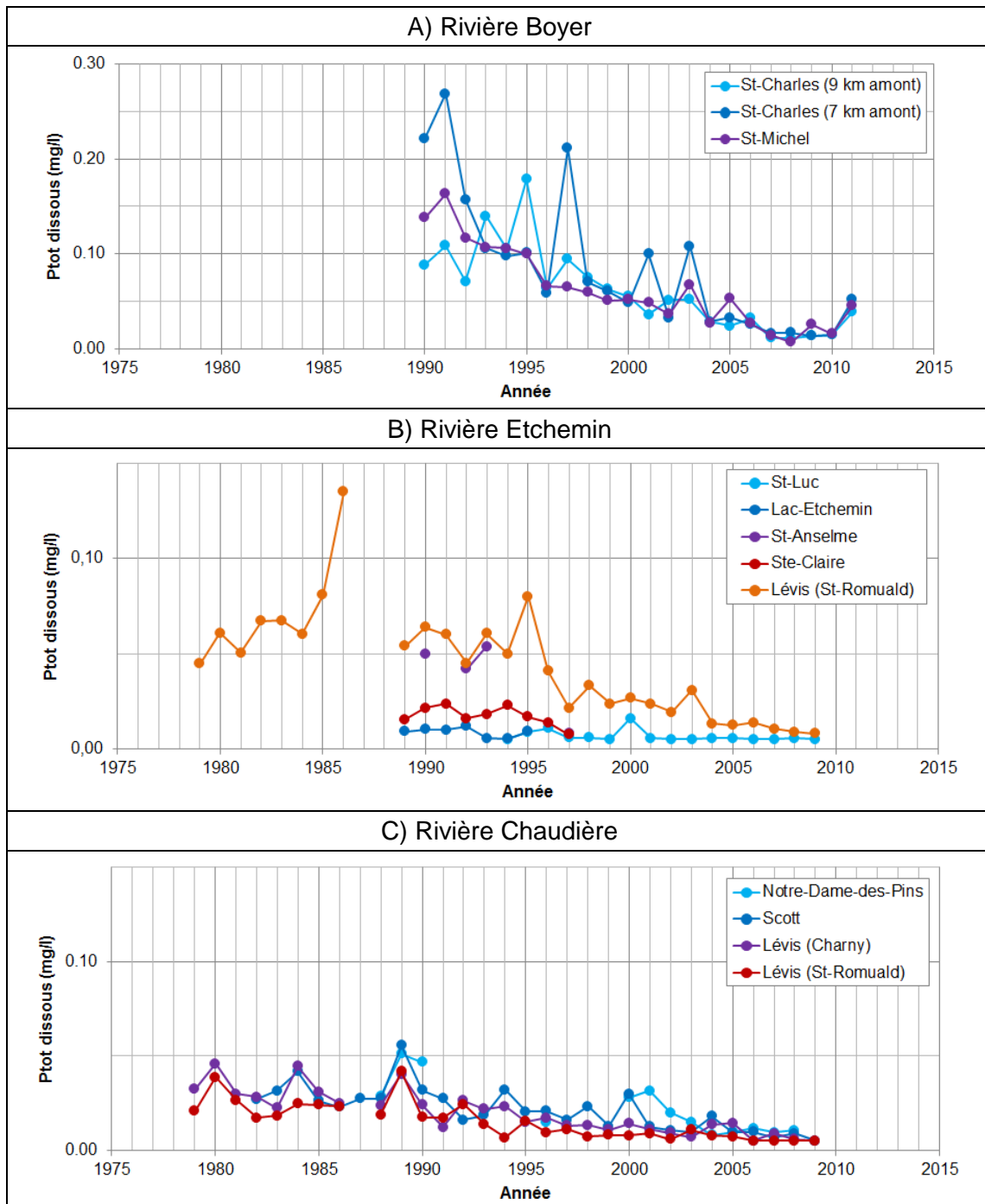


Figure 5.18 : Évolution des concentrations en phosphore total dissous (P_{tot} dissous), entre les années 1979 et 2011, pour les rivières Boyer (A), Etchemin (B) et Chaudière (C). La station d'échantillonnage et de suivi associée à chacune des courbes apparaît dans les légendes selon la direction d'écoulement, soit de l'amont (près de la source) vers l'aval (près du fleuve St-Laurent). L'échelle verticale du graph A est deux fois plus grande que celle des graphs B et C

5.4.2.3 Indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau

L'indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQBP) est une cote adimensionnelle, variant entre 0 et 100, permettant de quantifier la qualité des eaux de surface en 5 classes (Hébert, 1997) :

- **A (80 – 100)** : eau de bonne qualité permettant généralement tous les usages;
- **B (60 – 79)** : eau de qualité satisfaisante permettant généralement la plupart des usages;
- **C (40 – 59)** : eau de qualité douteuse, certains usages risquent d'être compromis;
- **D (20 – 39)** : eau de mauvaise qualité, la plupart des usages risquent d'être compromis;
- **E (0 – 19)** : eau de très mauvaise qualité, tous les usages risquent d'être compromis.

Ce système de quantification, considérant les critères de qualité sur lesquels il est basé (MDDEP, 2009; mis en jour avril 2012), 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. Généralement, dix (10) descripteurs sont utilisés dans le calcul de l'IQBP, soit le phosphore total, les coliformes fécaux, la DBO₅, la saturation en O₂, l'azote ammoniacal, les nitrites et nitrates, la chlorophylle-a totale, le pH, la turbidité ainsi que les matières en suspension. Dans le cas présent, uniquement sept (7) descripteurs ont été utilisés pour le calcul compte tenu du moins grand nombre de résultats disponibles dans la base de données du MDDEFP pour la DBO₅, la saturation en O₂ et le pH. Peu importe le nombre de descripteurs utilisés, le principe du calcul demeure le même, soit que 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 5.19 (A, B et C) illustre l'évolution des IQBP pour les stations des rivières Boyer, Etchemin et Chaudière, entre les années 1990 et 2011 environ. Les stations d'échantillonnages situées en amont des cours d'eau sont illustrées à l'aide de couleurs froides (bleu), allant vers des couleurs plus chaudes en aval (mauve, rouge, orangé), soit près du fleuve St-Laurent. Un IQBP de 100 correspond à une eau de très bonne qualité. Il est attendu que la qualité de l'eau se dégrade de l'amont vers l'aval d'une rivière, ou encore à l'endroit de zones d'exploitations agricoles plus intenses ou de zones urbaines.

En termes d'IQBP annuels moyens pour les 20 dernières années, la rivière Boyer présente la plus mauvaise qualité d'eau des 3 cours d'eau considérés. Les indices IQBP annuels moyens varient entre 39 (maximum calculé pour l'année 1995 à St-Michel) et 1 (minimum atteint en 1990, 2004 et 2010, également à St-Michel). De façon globale, les résultats pour chacune des 3 stations d'échantillonnage démontrent une tendance à la stabilité avec une qualité d'eau variant de « mauvaise » à « très mauvaise » entre 1990 et 2011. Les principaux « descripteurs limitants » caractérisant la qualité des eaux de la Boyer sont la turbidité dans 38% des cas ainsi que les nitrites et nitrates dans 37% des cas, approximativement.

La rivière Chaudière présente des indices IQBP annuels moyens variant entre 68 (maximum atteint en 2000 à Notre-Dame-des-Pins) et 1 (minimum atteint en 2009 à Lévis pour la station de Charny). On dénote une nette diminution de la qualité moyenne de l'eau pour la période étudiée, avec des résultats parfois inférieurs à un IQBP annuel moyen de 20 depuis 2004 pour les stations de Notre-Dame-des-Pins, Scott et Lévis (Charny), désignant une eau de très mauvaise qualité dont tous les usages risquent d'être compromis. Les principaux « descripteurs limitants » caractérisant la qualité des eaux de la Chaudière sont la turbidité dans 61% des cas, les matières en suspension dans 20% des cas et les coliformes fécaux dans approximativement 15% des cas.

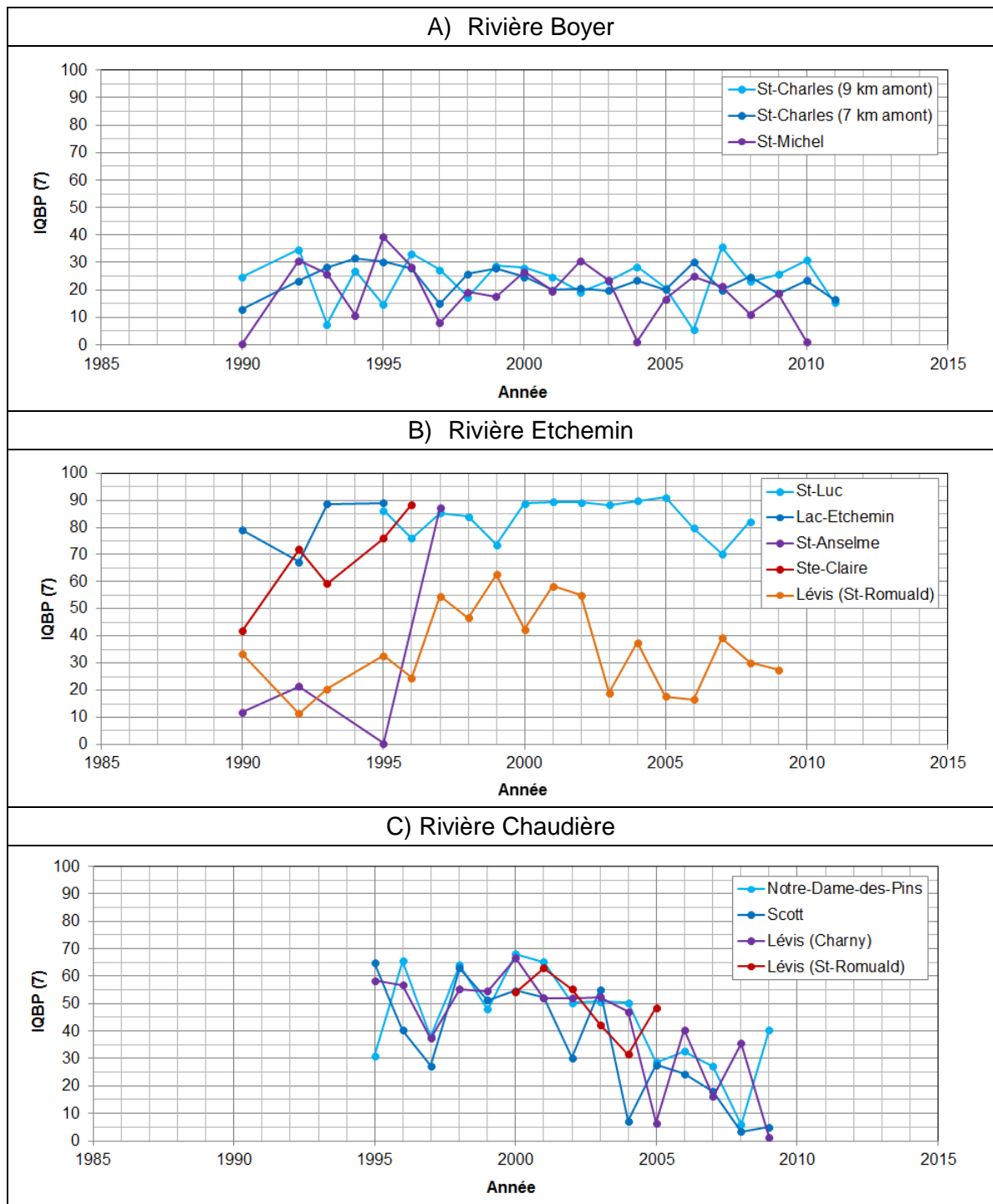


Figure 5.19 : Évolution des IQBP moyens annuels, entre les années 1990 et 2011, pour les rivières Boyer (A), Etchemin (B) et Chaudière (C). La station d'échantillonnage et de suivi associée à chacune des courbes apparaît dans les légendes selon la direction d'écoulement, soit de l'amont (près de la source) vers l'aval (près du fleuve St-Laurent)

Finalement, bien que son profil soit moins détaillé, la qualité de l'eau de la rivière Etchemin présente les meilleurs résultats en termes d'IQBP annuels moyens, principalement pour les stations situées en amont. Les indices IQBP annuels moyens varient entre 91 (maximum atteint en 2005 à St-Luc) et 1 (minimum atteint en 1995 à St-Anselme). Plus précisément, la station de St-Luc, en amont, présente une eau de qualité généralement « satisfaisante » à « bonne », avec des IQBP annuels moyens se situant toujours au-dessus de la barre du 70. On note clairement une dégradation de la qualité de l'eau vers l'aval. Le profil de la station de Lévis (St-Romuald) varie entre des IQBP annuels moyens 63 et 11, soit une qualité « douteuse » à « très mauvaise ». Les principaux « descripteurs limitants » caractérisant la qualité des eaux de la rivière Etchemin sont la turbidité dans 29% des cas, les matières en suspension dans 24% des cas et les coliformes fécaux dans 16% des cas, approximativement.

5.4.2.4 Sommaire de la qualité des eaux de surface

Sur la base des concentrations annuelles moyennes (nitrites et nitrates ainsi que phosphore total dissous) calculées pour quelques stations de surveillance localisées sur les rivières Boyer, Etchemin et Chaudière pour une période variant de 20 à 30 ans, ainsi que sur la base des IQBP moyens calculés pour ces mêmes stations pour une période d'un peu plus de 20 ans, il est possible de faire les constats suivants :

- Les concentrations moyennes en nitrites et nitrates ont été stables au cours des 20 à 30 dernières années, tandis que les concentrations en phosphore total dissous sont à la baisse;
- Les concentrations moyennes en nitrites et nitrates ainsi qu'en phosphore total dissous mesurées dans les stations de la rivière Boyer sont généralement 2 à 3 fois plus élevées comparativement à celles mesurées dans les stations des rivières Etchemin et Chaudière;
- Selon les IQBP annuels moyens, la qualité des eaux de la rivière Chaudière est à la baisse depuis le début des années 2000, passant de « douteuse » à « très mauvaise » pour l'ensemble des stations. La qualité des eaux de la rivière Boyer est constante et varie entre une qualité « mauvaise » et « très mauvaise » depuis 1990. La qualité des eaux de la rivière Etchemin est constante dans le temps, mais se dégrade de l'amont vers l'aval, passant d'une qualité « satisfaisante » à « bonne » à la station de St-Luc, à une qualité « douteuse » à « très mauvaise » à l'approche du fleuve St-Laurent.

5.5 Gestion durable des ressources en eau souterraine

5.5.1 Principes de gestion durable

Un projet pilote a été supporté par le MDDELCC pour produire et évaluer des indicateurs de gestion durable des ressources en eau souterraine à partir des données issues du projet PACES réalisé en Montérégie Est (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 d'un rapport issu des travaux d'un comité conjoint UNESCO-IAEA-IAH (Vrba & Lipponen, 2007).

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 d'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.

Une ensemble d'indicateurs d'intérêt pour les partenaires régionaux (Martin et al., 2012) peuvent être dérivés des données PACES en relation avec les objectifs de gestion durable. Comme le montre la figure 5.20, l'ensemble de ces indicateurs permettrait aux gestionnaires régionaux 1) de mieux définir l'état de la ressource, 2) d'identifier les problématiques pertinentes à leur région, et 3) de cibler les secteurs prioritaires d'intervention en relation avec ces problématiques. Ces indicateurs n'ont pas été produits pour Chaudière-Appalaches, faute de temps et de ressources, puisque ces indicateurs ne sont pas des livrables PACES. Cette section décrit tout de même le principe de ces indicateurs qu'il serait possible de produire à partir des données et cartes du projet PACES Chaudière-Appalaches.

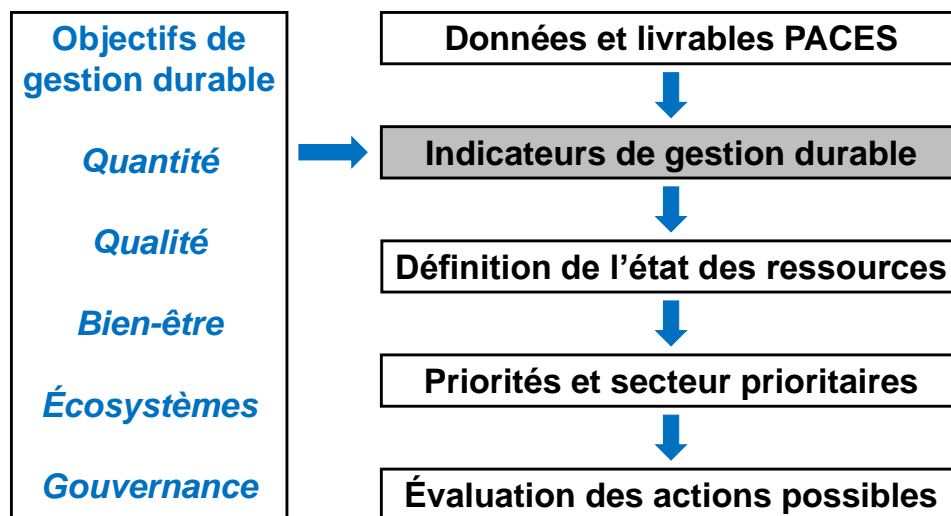


Figure 5.20 : Indicateurs de gestion durable suggérés par le CCME (Martin et al., 2012)

Le tableau 5.7 présente un cadre pour faciliter l'exploitation de l'information PACES concernant l'état des ressources en eau souterraine afin de guider les actions régionales sur les problématiques et 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 de la ressource en eau souterraine par rapport à des problématiques soulevées par les indicateurs sont aussi présentées.

Certaines cartes PACES peuvent être directement utilisées en tant qu'indicateurs, tandis que d'autres cartes présentées dans ce rapport représentent déjà des indicateurs. Au niveau des indicateurs de quantité (ou disponibilité) de la ressources, le rapport entre l'utilisation d'eau souterraine et la recharge à l'échelle municipale (**carte 26F**, figure 5.11) permet d'établir si l'exploitation de l'eau souterraine se fait à un niveau soutenable. La **carte 26F** montre que la proportion de la recharge correspondant à l'exploitation de l'eau souterraine est généralement sous 1% de la recharge ou entre 2 et 7%, et plus rarement entre 8 et 15% de la recharge. Ces proportions d'utilisation de la recharge apparaissent a priori permettre une exploitation durable de la ressource en eau souterraine. Il y a toutefois 6 municipalités dont la proportion de l'exploitation dépasse 15%, dont deux municipalités dépassent 25%. Nous avons expliqués à la section 5.2.3 les implications de ces proportions sur la durabilité de l'exploitation de l'eau souterraine. Le tableau 5.7 résume les actions envisageables en cas de problème de quantité disponible ou de surexploitation :

rechercher de nouvelles sources locales d'approvisionnement; 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.

La **carte 23** (figure 5.12) montre l'indice de densité des activités anthropiques qui vise à indiquer l'impact potentiel des activités anthropiques sur la qualité des ressources en eau souterraine. La **carte 23** (figure 5.12) montre qu'il y a trois grands axes avec des indices plus élevés d'activités anthropiques : 1) la bordure du fleuve Saint-Laurent, de Sainte-Croix à Saint-Jean-Port-Joli, 2) la vallée de la rivière Chaudière, entre Lévis et Saint-Georges, et 3) entre Thetford Mines et la vallée de la Chaudière. Ces activités anthropiques potentiellement polluantes doivent être mises en relation avec l'usage de l'eau souterraine et la vulnérabilité de l'aquifère dans les secteurs à fort indice d'activité anthropique. La **carte 26E** (figure 5.10) montre la densité des puits par municipalité, ce qui donne une indication de l'importance de l'utilisation d'eau souterraine en termes absolus. Sans surprise, la densité des puits tend à refléter aussi la densité de population et suivre aussi les axes avec fort indice d'activité anthropique. La **carte 22B** (figure 4.13) de la vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional montre que la vulnérabilité est généralement faible dans l'axe Sainte-Croix-Montmagny, mais qu'elle est élevée à très élevée dans les axes entre Lévis et Saint-Georges ainsi qu'entre Saint-Georges et Thetford Mines. Toutefois, les indications de dégradation anthropique potentielle de la qualité de l'eau souterraine (section 4.6, figure 4.15) ne concordent que pour le secteur entre Sainte-Marie et Saint-Georges et elles débordent latéralement à des endroits où l'indice d'activité anthropique est faible. Cet indice ne tient pas compte des activités agricoles qui peuvent être reliées à la dégradation de la qualité (section 4.6, figure 4.19).

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 à la qualité dégradée; 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. En cas de situations potentielles de dégradation de la qualité, le tableau 5.7 souligne les actions suivantes peuvent être envisagées : vérification des sources potentielles de contamination car le risque réel relié aux activités pourraient être en fait 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 potentiellement polluantes; élimination des sources présentant un risque élevé; recherche de nouvelles sources d'approvisionnement moins à risque.

À la section 5.4.1, le tableau 5.4 et les **cartes 24A et 24B** ont montré que la qualité naturelle de l'eau souterraine en Chaudière-Appalaches pouvait présenter des problèmes de potabilité. Le tableau 5.5 montre que la qualité de l'eau souterraine est en fait fortement liée aux types d'eau rencontrés dans la région, alors que ces types d'eau se retrouvent généralement à l'intérieur de zones géochimiques (section 4.6, figure 4.15). Ces zones géochimiques donnent ainsi une bonne indication du dépassement potentiel des critères de qualité d'eau. Le recoupement des zones géochimiques présentant des proportions importantes de dépassements de critères de qualité avec la carte de densité de puits (**carte 26E**, figure 5.10) 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 les plus 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 sur la base des groupes d'eau (ex. : dépassements d'origine naturelle); utilisation de systèmes appropriés de traitement de l'eau; 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.

La **carte 26C** (figure 5.8) montre l'utilisation d'eau souterraine au niveau des MRC par rapport aux usages résidentiel, agricole et industriel-commercial-institutionnel (ICI) (voir aussi données du tableau 5.2). Ces informations sont aussi disponibles en annexe pour chaque municipalité; la **carte 26D** (figure 5.9) montre d'ailleurs la proportion de l'utilisation résidentielle à l'échelle municipale. Ces informations donnent des indications sur l'importance de l'approvisionnement en eau souterraine à différentes fins. On constate à la **carte 26C** que l'usage total d'eau souterraine et les proportions des trois types d'usages peuvent varier beaucoup à l'échelle régionale entre les MRC. Ces informations sont importantes pour la planification du développement régional, surtout si ce développement implique une plus grande utilisation des ressources en eau souterraine. Le tableau 5.7 résume les actions envisageables pour assurer l'apport socioéconomique de l'eau souterraine pour les usages résidentiels, agricoles ou ICI 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 l'atteinte de l'objectif de 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 les pratiques de bonne gouvernance. 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. 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 projets PACES

Objectif de gestion durable et lien avec le projet régional	Enjeu(x)	Données PACES reliées à l'objectif	Forces motrices – Pression	État – Impact	Réponses potentielles
<p>Quantité d'eau souterraine</p> <p>Les taux de recharge et de pompage variant 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.</p>	Utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - 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) 	<ul style="list-style-type: none"> - Population (Mu) - Densité de population (nb/km²) - Population utilisant l'eau souterraine (Mu) - % consommation en eau souterraine (Mu & MRC) - Usage résident./ total (Mu) - Densité de puits résidentiels (nb/km²) * 	<ul style="list-style-type: none"> - Eau souterraine consommée / Recharge (Mu) * - Problèmes municipaux d'approvisionnement (MRC) * 	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - Recharge - Suivi des niveaux d'eau (L27) - Occupation du sol (L7) - Contextes des puits municipaux - Épaisseur des dépôts granulaires grossiers (≈ L15) - Paramètres hydrogéologiques (L21) 	<ul style="list-style-type: none"> - % de milieux urbanisés - Superficie drainée (ou densité de drainage agricole) - Densité de puits résidentiels (/km²) dans les zones vulnérables (ou de recharge) (Mu) 	<ul style="list-style-type: none"> - 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) 	<ul style="list-style-type: none"> - Définition de zones de conservation ou zones à protéger - Recherche en eau / travaux locaux
<p>Qualité d'eau souterraine</p> <p>Plusieurs secteurs où l'utilisation de l'eau souterraine est importante ou dont la qualité naturelle est bonne sont vulnérables à la contamination. Le gouvernement provincial veut mettre en œuvre une stratégie de protection des</p>	Dégradation actuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Sites contaminés - Dépassements de normes de composés d'origine anthropique (L24 L25) 	-	<ul style="list-style-type: none"> - Problèmes municipaux de qualité (MRC) * - Nombre de sites contaminés (Mu) * 	<ul style="list-style-type: none"> - 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

sources d'approvisionnement en eau et les indicateurs pourraient faciliter la mise en œuvre de la stratégie aux niveaux local et régional.	Dégradation potentielle	<ul style="list-style-type: none"> - Vulnérabilité (L22) - Activités anthropiques (L23) - Zones de recharge (L28) - Puits résidentiels - Puits municipaux - Aires d'alimentation des puits municipaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Activités anthropiques pondérées par niveau de risque relatif de l'activité (/km²) - % 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) * 	<ul style="list-style-type: none"> - Proportion de zones de vulnérabilité élevée (Mu) * 	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - Zones de qualité avec % de dépassements de normes - Dépassements de normes de composés d'origine naturelle (L24 L25) 	<ul style="list-style-type: none"> - Puits municipaux dans les zones de faible qualité (Mu) - Densité de puits résidentiels (/km²) dans les zones de faible qualité (Mu) - Carte de zones de qualité 	<ul style="list-style-type: none"> - Problèmes municipaux de qualité (MRC) 	<ul style="list-style-type: none"> - 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

<p>Écosystèmes</p> <p>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 les écosystèmes et que l'évaluation des changements dans les débits de base est difficile.</p>	<p>Évaluer les débits requis pour atteindre cet objectif pour toute la région</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Débit total (L27) - Débit de base (L27) 	-	<ul style="list-style-type: none"> - Débit de base / débit total (par sous bassin jaugé) * 	<ul style="list-style-type: none"> - Définition des zones de conservation
	<p>Considérer l'eau souterraine dans les modèles hydrologiques, intégrant l'eau de surface, la consommation d'eau et le ruissellement</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Zones d'émergence (L28) - Lien entre aquifères et cours d'eau - Milieux humides (L9) 	-	<ul style="list-style-type: none"> - Relations entre zones de recharge et d'émergence et milieux humides 	<ul style="list-style-type: none"> - Définition des zones de conservation
<p>Socioéconomique</p> <p>Une grande proportion de la région est dédiée à l'agriculture, et presque tous les agriculteurs dépendent de l'eau souterraine. L'eau souterraine est aussi à plusieurs autres usages et elle est aussi la principale source d'eau potable des municipalités.</p>	<p>Assurer l'usage agricole</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Usage agricole de l'eau souterraine- Territoire agricole (L7, L10) - Valeur de la production agricole^d 	<ul style="list-style-type: none"> - Usage agricole / usage total (Mu) % * - % de territoire agricole (Mu) * 	<ul style="list-style-type: none"> - Conflits d'usage agricole (MRC) * 	<ul style="list-style-type: none"> - Changement des pratiques - Nouvelles sources d'approvisionnement
	<p>Assurer l'usage industriel</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Usage industriel de l'eau souterraine - Valeur de la production industrielle^d 	<ul style="list-style-type: none"> - Usage industriel / usage total (Mu) % * - Nombre d'industries avec réseau privé 	<ul style="list-style-type: none"> - Conflits d'usage industriel (MRC) * 	<ul style="list-style-type: none"> - Changement des pratiques - Nouvelles sources d'approvisionnement
	<p>Assurer l'usage résidentiel</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Population - Usage ES résidentiel - Puits municipaux - Puits résidentiels (SIH) 	<ul style="list-style-type: none"> - Usage résidentiel / usage total (Mu) % * - Approvisionnement municipal souterrain 	<ul style="list-style-type: none"> - Conflits d'usage résidentiel (MRC) * 	<ul style="list-style-type: none"> - Changement des pratiques - Nouvelles sources d'approvisionnement

<p>Bonne gouvernance</p> <p>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 va créer des opportunités pour des campagnes de sensibilisation et d'éducation, le transfert d'outils d'aide à la décision, et une collaboration entre chercheurs, gestionnaires et usagers.</p>	<p>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.</p>			<p>- Organisme régional coordonnant la gouvernance de l'eau souterraine *</p>	<p>- Transfert- Formation- Développement d'outils - Accompagnement - Synthèse/Mise à jour des informations</p>
---	---	--	--	---	--

Notes :

* : Indicateur produit dans le tableau A1 (indicateurs suggérés par le CCME).

Le numéro (L*) est celui du livrable PACES.

L'échelle municipale (Mu) ou de la MRC (MRC) pour la production des indicateurs est indiquée.

5.5.2 *Préoccupations régionales et état des ressources en eau souterraine*

Cette section a pour but de mettre en relation les préoccupations exprimées par les acteurs du milieu de la Chaudière-Appalaches avec les caractéristiques des ressources en eau souterraine observées dans le cadre du présent projet. Les sujets abordés sont organisés en fonction des objectifs de gestion durable énoncés à la section précédente. Cette section pourrait aider les organismes régionaux à établir leurs priorités d'action pour assurer la gestion durable de la ressource en eau souterraine en Chaudière-Appalaches. Les préoccupations régionales citées dans la présente section sont celles exprimées dans le cadre d'un sondage mené auprès des acteurs du milieu, incluant l'ensemble des partenaires du projet PACES en Chaudière-Appalaches. Les principaux enjeux, tels que perçus par les usagers de la ressource, sont ainsi mis en relation avec l'état des ressources en eau souterraine établi par le présent projet.

Préservation de la quantité d'eau souterraine

Le niveau des nappes phréatiques préoccupe différents groupes d'acteurs. Plusieurs municipalités ont mentionné des niveaux de nappe bas en période estivale (Beaumont), ces niveaux ayant parfois nécessité l'émission d'avis de restriction de consommation (Laurier-Station). Certaines municipalités sont à la recherche de nouveaux puits d'approvisionnement (Theftord Mines). On note le même problème pour les puits résidentiels dans certaines municipalités (Lotbinière, Cap-Saint-Ignace). De plus, les producteurs agricoles sont également aux prises avec des puits improductifs. Certains ont opté pour l'installation de réservoir afin de pallier aux périodes sèches.

Le portrait des ressources en eau de Chaudière-Appalaches nous montre qu'il n'y a pas un problème de disponibilité de la ressource puisque la recharge des nappes est généralement importante (**carte 28B**). Par contre, il y a un certain problème au niveau de l'exploitabilité de ces ressources, c'est-à-dire la capacité de tirer des débits importants des puits d'approvisionnement. En effet, l'aquifère rocheux régional est la principale source d'approvisionnement en eau souterraine, mais cet aquifère est assez peu perméable (**livrable 21**, tableau 4.1 et figures 4.2 à 4.4), ce qui fait qu'il est difficile d'en tirer des débits importants. Il y a aussi dans la région des aquifères granulaires dont la perméabilité est meilleure, mais ils sont d'étendue très restreinte et représentent un défi à localiser. Afin de combler des besoins accrus, l'augmentation des débits des puits dans des aquifères à faible perméabilité va faire en sorte de réduire progressivement les niveaux d'eau dans ces puits et leur environ, et d'en réduire encore plus la capacité de production. La section 5.1 a tout de même montré que les puits municipaux ont des transmissivités significativement plus grandes que la moyenne des puits résidentiels de la région, ce qui montre que les professionnels qui ont reçu les mandats de recherche en eau ont généralement été en mesure de trouver des puits plus productifs que ce que l'aquifère rocheux régional permet en moyenne.

À l'échelle des municipalités, on ne remarque généralement pas un niveau d'exploitation représentant une forte proportion de la recharge des nappes (**carte 26F**). On peut donc conclure que le niveau d'exploitation est durable dans la grande majorité de la région. Il est malheureusement très difficile d'utiliser les données sur les niveaux d'eau dans le temps (hydrogrammes) des puits d'observation présents dans la région pour vérifier si les niveaux sont stables ou s'ils sont plutôt en déclin. En effet, même s'il y a un très bon réseau de puits d'observation dans la région (figure 5.21), une grande proportion de ces puits n'a que 4 à 6 ans de suivi du niveau d'eau, ce qui n'est pas assez long pour détecter des tendances à long terme des niveaux d'eau. En fait, la revue systématique des hydrogrammes des puits d'observation indique que la majorité des puits ne montre aucune indication d'un déclin significatif des niveaux d'eau. Dans quelques cas, on note une baisse de niveau de l'ordre de 1-2 m sur une période de 20 ans, ce qui n'est pas significatif par rapport à la variabilité naturelle des niveaux d'eau. Il sera donc nécessaire de revisiter les données de niveaux d'eau des puits d'observation de la région à des intervalles de 5 à 10 ans pour déterminer s'il y a des tendances à la baisse ou si les niveaux sont plutôt stables.

Il y a tout de même un secteur, à l'ouest des basses-terres du St-Laurent, où la question de la limite des ressources en eau souterraine se pose (MRC de Lotbinière et MRC de la Nouvelle-Beauce). Nous avons souligné dans la section 5.2 sur l'usage des eaux souterraines qu'un groupe de municipalités exploitait une proportion plus importante de la recharge qu'ailleurs en Chaudière-Appalaches (**carte 26F**). Dans ce secteur, le renouvellement de l'eau souterraine est moins important et il y a en plus des occurrences de dépassements de critères de potabilité. Pour ces municipalités, il sera important de considérer la disponibilité à long terme des ressources en eau lors de leur planification de développements.

Préservation de la qualité de l'eau souterraine

La protection de la qualité de la ressource en eau souterraine a fait l'objet du plus grand nombre d'inquiétudes formulées par les acteurs du milieu de la Chaudière-Appalaches. Considérant que les puits sont des voies d'accès direct aux aquifères, la protection des puits et des sites de captage de l'eau souterraine a été une préoccupation formulée par l'ensemble des acteurs. L'absence de couvercle protecteur et de système de verrouillage des piézomètres a été relevée à quelques endroits (Armagh). De plus, des puits hors d'usage, mais non obturés, ont également été notés. Il a aussi été mentionné que les zones de protection immédiates au pourtour des puits municipaux ne sont pas toujours clôturées et que les activités présentes dans l'aire d'alimentation des puits présentent un risque de contamination, surtout lorsque la zone a une vulnérabilité élevée.

Le projet PACES en Chaudière-Appalaches a permis de dresser un portrait de la ressource en eau souterraine qui définit le contexte régional dans lequel se trouvent les puits d'approvisionnement en eau, notamment les puits municipaux. Ainsi, les livrables PACES donnent des indications sur la recharge (**carte 28B**), le confinement ou isolement (**carte 17**) et la vulnérabilité (**carte 22B**) de l'aquifère dans le secteur où peuvent se trouver les puits d'approvisionnement. Les livrables PACES définissent aussi la qualité de l'eau souterraine, à la fois par rapport aux conditions naturelles et par rapport à des indications de dégradation de la qualité naturelle qui serait reliée à des activités anthropiques (**cartes 24A, 24B, 25A et 25B**; tableaux 5.4 et 5.5). Au niveau de la qualité naturelle, les travaux ont permis de définir des groupes d'eau (figure 4.14) et des zones géochimiques (figure 4.15) à l'intérieur desquelles il est plus susceptible d'y avoir des dépassements naturels des critères de potabilité (**carte 24A**). Dans les secteurs où ces dépassements sont plus fréquents, ces informations permettent de vérifier l'occurrence de composés chimiques qui ne sont pas nécessairement analysés systématiquement dans l'eau des captages municipaux, mais qui pourraient compromettre la qualité de l'approvisionnement. Au niveau des effets des activités anthropiques sur la dégradation de la qualité, nos travaux ont aussi donné des indications des secteurs où il y avait des évidences de dégradation anthropique de la qualité d'eau (figures 4.15 et 4.19), même si cette dégradation ne mène généralement pas à des dépassements de critères de potabilité.

Ceci dit, le portrait de la ressource en eau souterraine fournie par le projet est à l'échelle régionale et il ne peut pas remplacer les travaux visant à définir les conditions locales, notamment près des puits municipaux d'approvisionnement en eau. Dans le cadre de notre projet, nous avons compilé les aires d'alimentation qui ont déjà été définies pour la majorité des puits municipaux de la région. La définition de ces aires est maintenant obligatoire, de même que l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère capté dans l'aire d'alimentation. Toutefois, en plus de ces informations sur les aires d'alimentation et la vulnérabilité, la protection des approvisionnements en eau municipaux exige la mise en place de programmes de gestion impliquant notamment une clôture protégeant l'aire immédiate des puits, l'inventaire des activités potentiellement polluantes dans l'aire d'alimentation et des actions visant à minimiser l'impact potentiel de ces activités, notamment en les encadrant ou même en les déplaçant. Les approvisionnements municipaux situés dans les secteurs identifiés comme montrant l'effet des activités anthropiques sur la qualité de l'eau souterraine devraient particulièrement faire l'objet d'un programme de gestion puisque l'eau souterraine de ces secteurs montre des évidences de vulnérabilité aux activités anthropiques qui y sont présentes.

Lors de la consultation, les acteurs du milieu ont nommé le plus souvent la contamination de l'eau souterraine en tant que préoccupation. Trois origines de contamination ont été mentionnées : industrielle, agricole et autre. Au niveau de la contamination industrielle, plusieurs acteurs sont préoccupés par la contamination qui pourrait être induite par l'exploration et l'exploitation des gaz de shale (Laurier-Station, Lotbinière, entreprises agricoles, OBV). Le transport du pétrole par oléoduc est également une source de préoccupation. La contamination potentielle des aquifères dans la région de l'ancienne mine de Thetford Mines est aussi une préoccupation. Au niveau de la contamination d'origine agricole, les acteurs ont mentionné que les activités agricoles sont nombreuses sur le territoire et que les activités à la ferme sont parfois source de préoccupations. On mentionne ainsi des préoccupations reliées à la présence de bétail et d'activités agricoles intensives ainsi que de l'épandage de fertilisants en périphérie de certains puits (Armagh, Saint-Damien-de-Buckland, Sainte-Claire, Saint-Camille-de-Lellis, Sainte-Aurélie, Saint-Flavien, Laurier-Station, Saint-Bernard). Les acteurs ont aussi soulevé des préoccupations importantes par rapport à la présence d'autres contaminants. Le manganèse a été retrouvé à des concentrations dépassant plus de six fois le critère esthétique (Armagh). Les concentrations de trichlorométhane, d'arsenic, de baryum et de chlore préoccupent les usagers (Disraëli, Saint-Benjamin, Laurier-Station, Lotbinière, Saint-Bernard). Une contamination par les coliformes fécaux est également notée.

Comme mentionné précédemment, le projet PACES en Chaudière-Appalaches donne un portrait régional, alors que les problématiques de qualité d'eau, particulièrement de contamination, sont généralement de nature locale. Toutefois, les résultats du projet permettent de clarifier les questions reliées à la qualité de l'eau souterraine à deux niveaux : 1) en distinguant les paramètres chimiques qui sont reliés à la qualité naturelle de l'eau souterraine par rapport à ceux qui indiquent plutôt l'effet d'une dégradation de qualité reliée aux activités anthropiques, et 2) en distinguant les paramètres chimiques qui ne font l'objet que de critères esthétiques, affectant l'usage de l'eau, mais pas la santé, par rapport aux paramètres faisant l'objet de critères de potabilité et dont la présence d'une concentration plus élevée que le critère de potabilité peut avoir des effets sur la santé.

Au niveau de la contamination industrielle reliée à l'exploration et à l'exploitation éventuelle des gaz de shale, la caractérisation géochimique de l'eau souterraine en Chaudière-Appalaches est allée au-delà de ce qui est requis des projets PACES en analysant la présence de gaz hydrocarbures dissous (méthane, éthane et propane) dans l'eau souterraine. Ces analyses ont été faites pour les puits localisés à l'intérieur de la province géologique de la Plate-forme du St-Laurent qui couvre surtout la partie nord de la MRC de Lotbinière. Il faut d'abord mentionner que la présence de méthane dans l'eau souterraine n'a pas d'effet néfaste pour la santé, mais l'accumulation de méthane dans la tuyauterie d'une résidence peut comporter des risques (voir section 4.6.2.5, sous-section « Les gaz dissous », figure 4.24). Une étude couvrant une grande partie des basses-terres sur la rive sud du Saint-Laurent, entre les régions de Bécancour et de la Montérégie Est, a montré que le méthane est régulièrement présent dans les eaux souterraines et qu'il a une origine biogénique dominante, c'est-à-dire qu'il a été formé en place dans la roche et qu'il ne provient pas de niveaux profonds, notamment du Shale d'Utica (Pinti et al., 2013; Moritz et al., 2015). Des résultats similaires ont été trouvés en Chaudière-Appalaches. Le projet de la Commission géologique du Canada dans Lotbinière va faire une évaluation plus détaillée de l'origine du méthane dans l'eau souterraine de ce secteur et il va préciser s'il y a des indications de présence de voies préférentielles pouvant faciliter la migration de méthane, ou d'autres fluides, à partir du Shale d'Utica vers les aquifères dans l'éventualité d'une exploitation du gaz de shale dans ce secteur (Rivard et al., 2013; Lavoie et al., 2013). En ce qui concerne la présence d'un oléoduc, il faut les mettre les préoccupations en perspective par rapport à la fréquence, mais surtout à l'incidence que peuvent représenter d'éventuelles fuites. Ainsi, la **carte 22B** de vulnérabilité de l'aquifère permet de juger si les secteurs où il y a des préoccupations se trouvent dans des zones vulnérables ou non. De façon générale, la **carte 22B** montre que la vulnérabilité est généralement faible à très faible dans le contexte des basses-terres du St-Laurent, mais qu'il y a des parties où la vulnérabilité peut être élevée, ou même très élevée en termes relatifs. La **carte 22A** montre toutefois qu'en termes absolus la vulnérabilité est au plus à un niveau faiblement élevé dans la région.

Au niveau des préoccupations par rapport à une contamination d'origine agricole, certaines remarques peuvent être faites sur la base du portrait établi dans le cadre du présent projet. En termes d'impact sur la qualité de l'eau souterraine, la présence de nitrate dans l'eau souterraine peut donner une bonne indication de l'effet des activités agricoles. Malgré l'intensité de ces activités en Chaudière-Appalaches, la **carte 24B** montre les concentrations en nitrite et nitrate qui ont été observées dans les puits échantillonnés. On constate que dans la très grande majorité des cas les concentrations sont sous le seuil de 1 mg/L au-dessus duquel on peut suspecter un effet anthropique. Tout de même, il y a certains puits qui présentent des concentrations supérieures à 1 mg/L ou même à 3 mg/L, un seuil qui indique qu'il faut envisager des mesures pour réduire l'apport de nitrite et nitrate aux aquifères. Il n'y a toutefois eu qu'un seul échantillon dans toute la région dont la concentration a dépassé le critère de potabilité de 10 mg/L. Même si cela n'implique que très rarement des dépassements de critères de potabilité, nous avons tout de même identifié dans la région des types d'eau qui donnent des indications d'effet anthropiques sur la qualité d'eau, incluant d'origine possible agricole, mais aussi d'autres origines comme le sel déglaçant et les effluents de fosses septiques (figure 4.19). Ces types d'eau couvrent une étendue considérable des vallées de la rivière Chaudière et de ses affluents (figure 4.15). Ces observations indiquent que l'aquifère est vulnérable, mais que le niveau d'apport de contaminants à la nappe est généralement sous les seuils qui mèneraient à une perte de potabilité. Considérant que les types d'eau montrant des impacts anthropiques ont les caractéristiques d'eaux jeunes qui ont été rechargées récemment, on peut penser que la circulation rapide et le renouvellement important de l'eau par la recharge pourraient contribuer à réduire l'impact des émissions anthropiques. Une étude plus détaillée serait requise pour comprendre toutes les implications de cette situation et donner des recommandations pour éviter une dégradation à plus long terme de la qualité de l'eau souterraine dans les secteurs impactés.

Au niveau des préoccupations concernant les autres contaminants, mentionnons d'abord que la présence dans l'eau souterraine d'arsenic (As), de baryum (Ba) et de manganèse (Mn) est généralement d'origine naturelle. Au niveau du Mn, le tableau 5.4 montre que près de 50 % des puits échantillonnés dépassent le critère esthétique; c'est donc un problème très fréquent dans la région (voir aussi la **carte 25A**, figure 5.14). Mentionnons que bien que le Mn ait été considéré jusqu'à maintenant uniquement comme un problème esthétique, des recherches récentes s'interrogent sur la possibilité que le Mn ait aussi une incidence sur la santé. Il n'y a toutefois eu jusqu'à maintenant aucune modification des critères de concentrations pour le Mn et son impact sur la santé n'est pas encore reconnu par les organismes faisant des recommandations sur les critères de potabilité, tel que Santé Canada. Au niveau régional, un peu plus que 4 % des puits ont montré des concentrations en arsenic (As) supérieures au critère de potabilité (tableau 5.4). La présence d'arsenic (As) semble reliée à la géologie (**carte 13**) et on retrouve des dépassements surtout dans la zone de Dunnage et la Ceinture de Gaspé (MRC Beauce-Sartigan, MRC les Appalaches MRC des Etchemins) (**carte 24A**). Enfin, aux préoccupations formulées concernant le baryum (Ba) on devrait aussi associer la présence de fluor (F). En effet, ces deux composés se retrouvent dans les mêmes conditions, soit dans les eaux souterraines évoluées des basses-terres, particulièrement dans la partie nord-ouest entre Lévis et Sainte-Croix (MRC de Lotbinière et MRC de la Nouvelle-Beauce) (**carte 24A**). Quant aux chlorures (Cl), c'est un composé dont la présence a des incidences esthétiques et qui peut soit être présent naturellement, particulièrement dans les eaux évoluées chimiquement, ou être émis par une vaste gamme d'activités anthropiques. Lorsque le Cl est d'origine naturelle, il est fréquemment associé au brome (Br), particulièrement lorsque le Cl a une origine marine comme c'est le cas dans les basses-terres du St-Laurent qui ont été recouvertes par la Mer de Champlain. La figure 4.18 montre la relation entre les concentrations en Br et en Cl en Chaudière-Appalaches. Plusieurs types d'eau, considérés d'origine naturelle, suivent la droite de dilution de l'eau de mer. Par contre, des types d'eau jugés affectés par des effets anthropiques ont des excès de Cl par rapport au Br. Puisqu'il n'y a pas de processus naturels pouvant expliquer ces excès en Cl, on en déduit qu'ils reflètent l'effet d'apports anthropiques, ce qui est encore mieux précisé à la figure 4.19. Enfin, au niveau des préoccupations par rapport à la présence de coliformes fécaux, il faut dire que c'est malheureusement fréquent que des coliformes soient présents dans l'eau des puits, particulièrement les puits résidentiels. Cette présence

provient généralement de lacunes dans l'entretien du puits ou son aménagement en surface qui peut favoriser l'infiltration directe des eaux de ruissellement qui peuvent contenir des coliformes. Des exemples de travaux réalisés à l'échelle régionale, dans Portneuf (Fagnan et al., 1999), et à l'échelle municipale, à Lac Beauport (Ballard et al., 2004), illustrent la nature de cette problématique. Le site internet du MDDELCC (2015b) donne des informations destinées aux propriétaires de puits résidentiels au niveau de leur aménagement et entretien afin de prévenir ou éliminer la présence de coliformes.

Au niveau de la préservation de la qualité de l'eau souterraine utilisée pour l'approvisionnement résidentiel par des puits privés, les priorités de protection pourraient tenir compte des secteurs avec forte densité de puits résidentiels (**carte 26E**), où la vulnérabilité est élevée (**carte 22B**) et où la densité d'activités anthropiques est importante (**carte 23**). On pourrait aussi considérer l'étendue de la zone géochimique comprenant des types d'eau montrant des effets anthropiques (figure 4.15). 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 répondre les exigences de la stratégie de protection des sources en élaboration par le MDDELCC. Dans les zones où on retrouve des types d'eau avec des proportions importantes de dépassements de critères de potabilité, particulièrement où 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.

Préservation des écosystèmes

Les acteurs du milieu n'ont pas formulé de préoccupations spécifiques par rapport à la préservation des écosystèmes. Des travaux spécifiques ont toutefois été dédiés à l'étude des milieux humides de la zone du Chêne dans le cadre du projet PACES en Chaudière-Appalaches (section 6.2). Ces travaux ont mis en évidence des fonctions hydrogéologiques diverses et complexes des milieux humides. Les résultats présentés dans le présent rapport sont toutefois préliminaires et ces travaux vont se poursuivre dans le cadre d'une recherche doctorale à l'UQAM.

Assurer le bien-être socioéconomique

Il y a un recoupement entre la préservation de la quantité des ressources en eau souterraine, dont nous avons discuté précédemment, et le maintien du bien-être socioéconomique relié à l'usage de ces ressources. L'impact socioéconomique de la disponibilité d'eau souterraine, en termes de quantité et de qualité, est lié à son rôle dans le maintien des communautés (usage résidentiel), les activités agricoles et l'usage industriel-commercial-institutionnel de l'eau souterraine. La section 5.2 a d'ailleurs dressé le portrait de l'usage des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches. Comme que mentionné précédemment, différents groupes d'acteurs ont souligné être préoccupés par le niveau des nappes phréatiques, notamment les municipalités, les usagers avec des puits résidentiels et les producteurs agricoles. Nous avons aussi souligné précédemment que la région ne fait généralement pas face à un problème de disponibilité, mais à un problème d'exploitabilité des ressources en eau souterraine. En effet, le niveau d'exploitation estimé de l'eau souterraine ne représente généralement qu'une faible proportion de la recharge de la nappe. Il y a toutefois un secteur dans la partie ouest les basses-terres, dans les MRC de Lotbinière et de la Nouvelle-Beauce, où le renouvellement de la ressource est plus limité et où la proportion de la recharge qui est exploitée est plus importante. Ce secteur fait aussi face à une qualité moindre de l'eau souterraine. En partie sur la base des connaissances développées dans le cadre du présent projet, les décideurs régionaux devront considérer la disponibilité des ressources en eau souterraine pour soutenir le développement urbain, agricole et industriel de la région. Cette disponibilité passe en partie par la préservation de la qualité des ressources existantes, notamment en considération d'évidences de dégradation de la qualité par les activités anthropiques.

Bonne gouvernance

La bonne gouvernance implique l'établissement d'un consensus au niveau des parties concernées par les ressources en eau souterraine par rapport aux problématiques prioritaires, aux secteurs où ces problématiques sont importantes et à la définition et la mise en œuvre d'un plan d'action relié à ces priorités et secteurs prioritaires. Les organismes de bassin versant de la Chaudière-Appalaches jouent déjà un rôle central dans la concertation et la gouvernance. C'est toutefois en grande partie à l'aide des leviers de l'aménagement du territoire que la gestion et protection des ressources en eau souterraine peut se faire à l'échelle régionale.

Lors de la consultation, les parties concernées ont identifié deux types de problématiques qui touchent à l'aménagement du territoire. Une première préoccupation concerne la présence de certains puits en zone inondable (Armagh, Saint-Étienne-de-Lauzon). Des zones sensibles subissent une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des inondations qui affecte les puits présents et force les résidents à prendre des mesures préventives avant de consommer l'eau. Le développement des municipalités et l'augmentation rapide du nombre de constructions viennent ajouter une pression supplémentaire sur les ressources disponibles dans plusieurs municipalités (Saint-Charles-de-Bellechase, Saint-Benjamin, Laurier-Station, Saint-Apollinaire, Saint-Bernard, Saint-Alfred, Villeroy).

Enfin, la bonne gouvernance de l'eau souterraine est une responsabilité partagée entre les paliers 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 en Chaudière-Appalaches va 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. La concertation régionale au niveau des organismes intéressés à la gouvernance ou à la gestion de la ressource pourrait assurer une cohérence dans les approches et les critères d'actions visant à assurer une bonne gouvernance de la ressource. Il faudra toutefois un accompagnement gouvernemental pour assurer le développement de ces nouvelles activités chez des organisations qui font face à des responsabilités de plus en plus diversifiées et complexes.

5.6 Réseau de surveillance

Le **livrable 27** (annexe 2) présente la répartition spatiale en Chaudière-Appalaches des stations météorologiques, des stations hydrométriques ainsi que des puits d'observation de l'eau souterraine. La présente section décrit brièvement les infrastructures de suivi présente dans la région d'étude.

5.6.1 Réseau de puits d'observation

Avant la réalisation du présent projet, le MDDELCC avait dans son réseau 21 stations de suivi (puits de surveillance) du niveau d'eau dans, ou tout juste en bordure de la région à l'étude. Une de ces localisations avait des mesures à deux niveaux. Des forages conventionnels ont permis la mise en place de 8 autres puits d'observation au roc dans le cadre du présent projet (section 2.2.3, figure 2.4). Sur les 9 forages réalisés, le puits PO-08 n'a pas été instrumenté parce qu'il était coulant. Le suivi de niveau d'eau a débuté en octobre 2013 dans les nouveaux puits. Les hydrogrammes de puits présentés en annexe montrent le suivi pour la période allant d'octobre 2013 à la fin mai 2014. La figure 5.21 montre la localisation de tous les puits d'observation présents en Chaudière-Appalaches. Le MDDELCC a intégré les nouveaux puits d'observation à son réseau de suivi après la fin du projet PACES en avril 2015.

Suite aux levés de sismique réflexion réalisés au sud de Lévis, un certain potentiel aquifère a été défini dans ce secteur. [Ballard et al. \(2014b\)](#) ont proposé au MDDELCC la mise en place de puits d'observation dans ce secteur, mais il n'y a pas eu de suites, faute de fonds. Ce rapport se trouve en annexe.

Livrable PACES no. 27 : EMBACEMENTS DES PUIITS DE SUIVI DE LA NAPPE

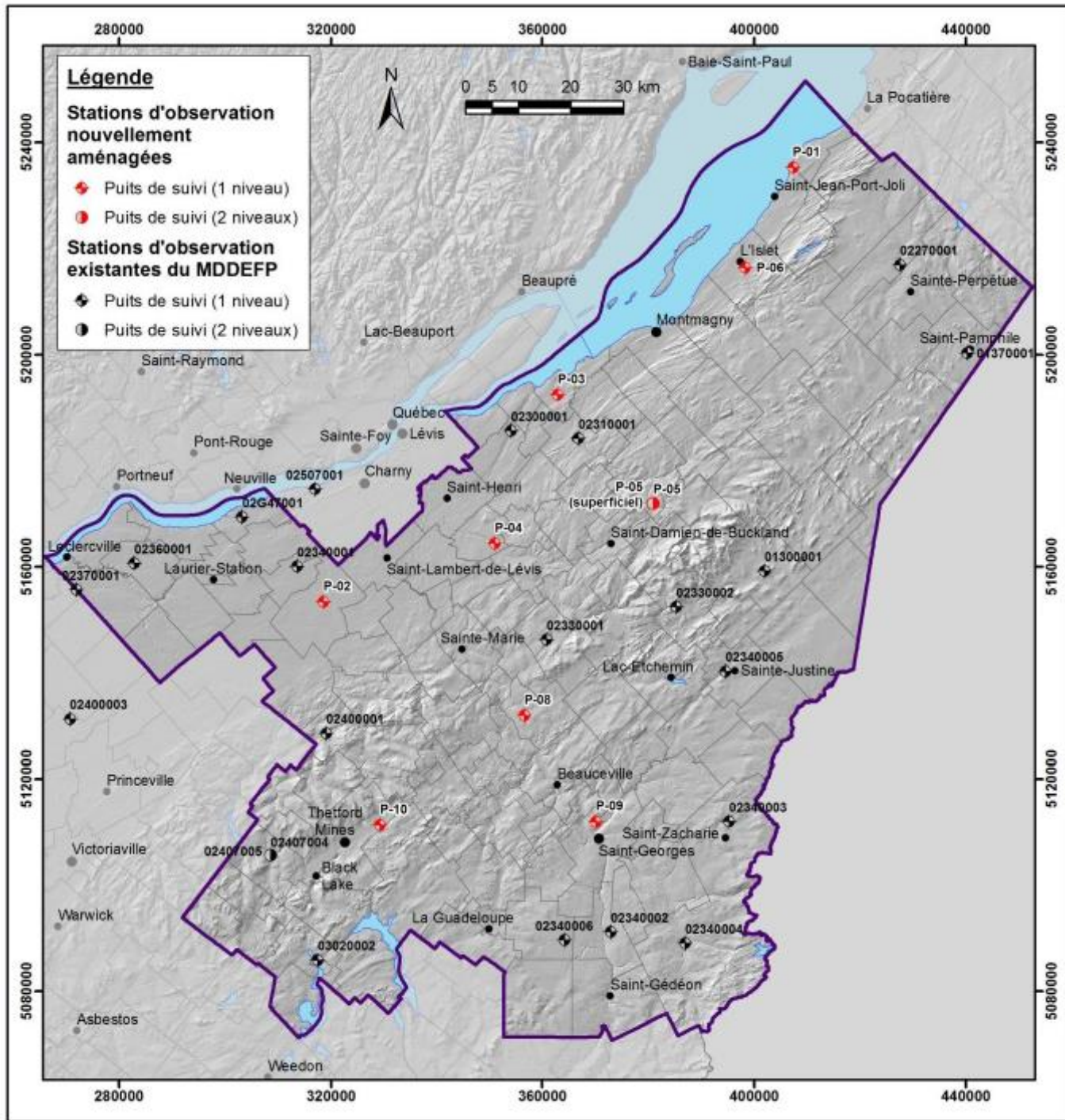


Figure 5.21 : Emplacement des stations de suivi de nappe (partie du livrable 27)

5.6.2 Stations hydrométriques

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. La section 1.5.2.4 a décrit les stations localisées dans la région d'étude. Sur le territoire à l'étude, le CEHQ a opéré ou opère 32 stations de jaugeage des débits (figure 1.6). Le tableau 1.10 présente des informations sur les stations hydrométriques mesurant le débit des cours d'eau. Parmi les 32 stations disponibles, 21 stations sont inactives, incluant 6 qui possèdent un historique de données de 3.5 à 9 ans se terminant après l'année 2000. Des 11 stations encore ouvertes, 7 stations possèdent un historique de plus de 30 ans. Pour certaines de ces stations, des débits de base estimés par le CEHQ nous ont été transmis.

5.6.3 Stations météorologiques

Les données météorologiques ont été fournies par le [MDDELCC \(2012b\)](#). La section 1.5.2.2 a décrit les stations actives présentes dans la région (tableau 1.5) ou à sa périphérie (tableau 1.6) avec plus de 30 ans de données qui ont été utilisées dans le cadre du présent projet. La région compte ainsi 38 stations météorologiques actives qui sont illustrées au **livrable 27** (annexe 2).

6 TRAVAUX SPÉCIFIQUES

Des études spécifiques ont été réalisées dans le cadre de ce projet : 1) cartographie des dépôts meubles à l'aide de levés LiDAR aéroportés (section 6.1) ; étude des milieux humides de la zone du Chêne pour déterminer leurs relations avec les aquifères (section 6.2) ; modélisation hydrogéologique pour comprendre l'écoulement régional et l'évolution géochimique de l'eau souterraine (section 6.3) ; et 4) modélisation hydrologique pour estimer la recharge à l'aide du logiciel SWAT (section 6.4). Les sections 6.1 à 6.3 correspondent à des travaux de 3^e cycle de Guillaume Légaré-Couture (INRS) et Marc-André Bourgault (UQAM) et de 2^e cycle de Debora Janos (Université Laval), tandis que les travaux décrits à la section 6.4 ont été réalisés par l'IRDA.

6.1 Cartographie des dépôts meubles à l'aide du LiDAR

En complément aux travaux réalisés par l'UQAM, un important travail de cartographie de la géologie du Quaternaire a été réalisé par un étudiant au doctorat en sciences de la terre de l'INRS, Guillaume Légaré-Couture, sous la supervision d'un chercheur de la Commission géologique du Canada, Michel Parent. Ce travail, qui couvre toute la bordure sud du fleuve Saint-Laurent du territoire à l'étude jusqu'à une altitude d'environ 200 m (contour rouge, figure 6.1), a été réalisé à partir de levés LiDAR aéroportés. Cette zone correspond approximativement à celle où l'on trouve divers sédiments littoraux et bassinaux déposés au cours de la submersion marine qui a eu lieu au cours de la dernière déglaciation régionale.

Pour tout ce secteur, les données d'élévation en format nuage de point (*point cloud*) ont été traitées dans un premier temps afin de discerner les véritables réflexions (ou retours) au sol de celles associées au couvert végétal, aux bâtiments, habitations ou autres infrastructures, ou à encore à divers autres éléments du paysage, les gravières ou carrières par exemple. Une fois les données épurées, des modèles numériques d'élévation (MNE) de haute résolution et de grande précision altimétrique peuvent être construits. Pour les besoins de la cartographie des formations superficielles à l'échelle régionale, une grille MNE d'un maillage de 1 m par 1 m en surface (XY) et d'une précision de 0,15 m en élévation (Z) a été préparée à partir des données LiDAR.

Afin de générer les images finales utilisées pour l'interprétation cartographique, des matrices d'ombrage (*hillshade*) à haute résolution spatiale doivent être créées. Des analyses de composante principale (PCA) ont été réalisées sur le MNE afin de déterminer les axes principaux (orientations cardinales) responsables des variations topographiques. Les matrices d'ombrage sont ensuite générées en utilisant une illumination artificielle orientée perpendiculairement aux directions identifiées par les analyses PCA. Ces images, visualisées dans un environnement SIG, et en combinaison avec diverses autres données spatiales (photos aériennes, données vectorielles diverses, etc.) rendent possible l'interprétation des formations superficielles en présence grâce à leurs caractéristiques morphologiques. Ces analyses ont été effectuées dans l'environnement *ArcGIS* d'ESRI. Des sorties terrains ont ensuite été effectuées afin de valider l'interprétation de certaines formations; environ 40 points de contrôle ont ainsi été récoltés.

Les possibilités offertes par le LiDAR pour la cartographie quaternaire sont illustrées par les images 1 à 4 de la figure 6.1 :

- (1) Relief ombragé dérivé d'un MNE 10 m (quelques crêtes visibles, apparence lisse et uniforme);
- (2) Relief ombragé dérivé du LiDAR 1 m (textures contrastées, structures et morphologie complexes bien évidentes);
- (3) Cartographie des formations superficielles (Gaucher et al., 1984 - DV8410, MRNF);
- (4) Cartographie des formations superficielles réalisée à partir du LiDAR 1 m.

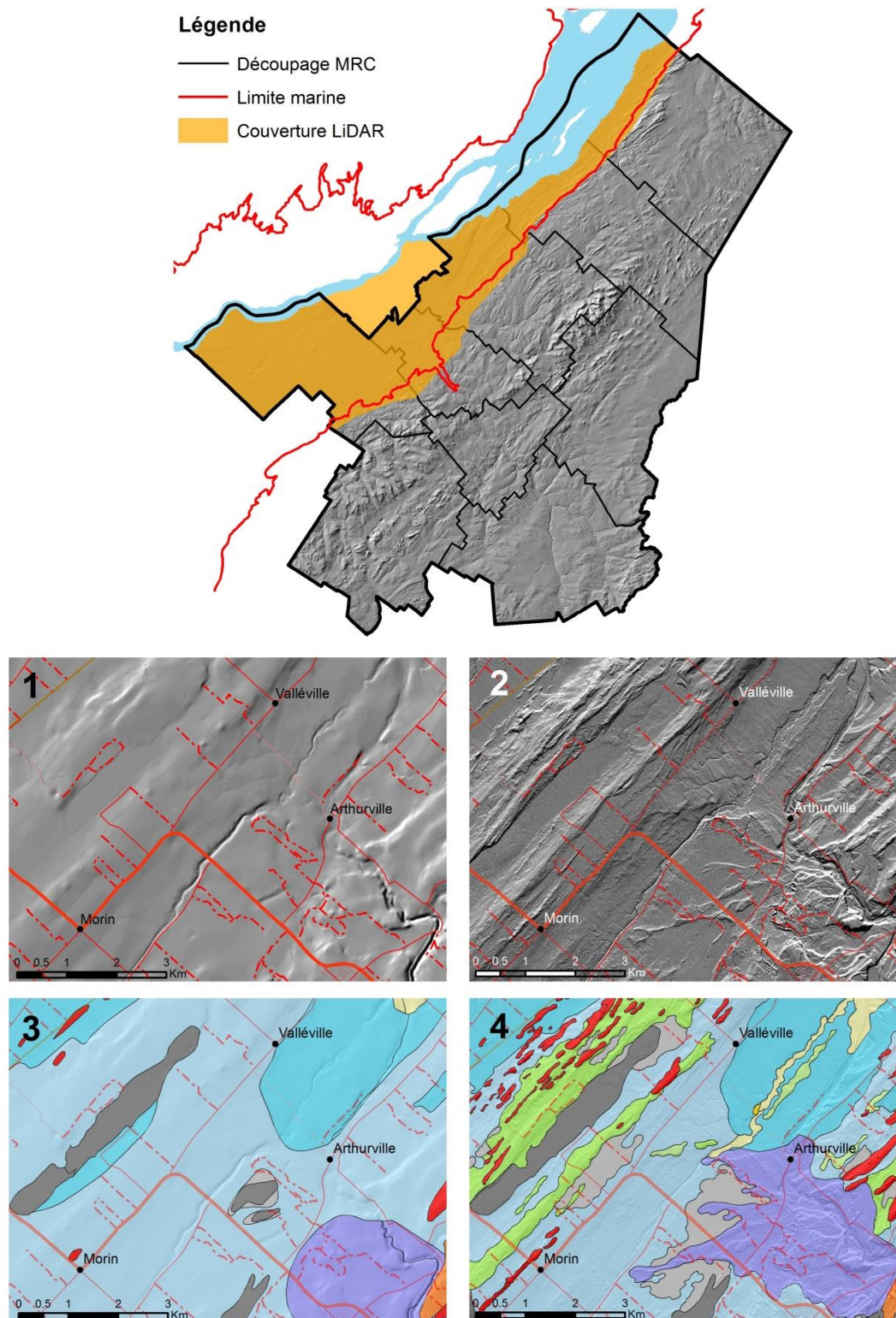


Figure 6.1 : Exemple de révision de la cartographie de la géologie du Quaternaire à l'aide du LiDAR. La carte (en haut) montre la couverture LiDAR et les autres cartes montrent une comparaison du MNE (1) (MDDELCC) avec le LiDAR (2) et l'interprétation régionale (Gaucher et al., 1984) (3) comparée à la nouvelle interprétation basée sur le LiDAR (4)

Une superficie d'environ 3 600 km² a été cartographiée à l'aide de cette méthode. Les données LiDAR nous ont permis de cartographier les formations superficielles du secteur sous la limite marine avec une grande précision. Les données LiDAR sont d'autant plus intéressantes qu'elles permettent une cartographie quaternaire beaucoup plus précise en terrain boisé. Dans les zones de couvert forestier dense, la proportion de retours au sol par rapport au nombre total de retours est évidemment moins grande que pour une plaine déboisée mais, en général, quelques faisceaux réussissent à pénétrer jusqu'au sol sous la canopée. Ces réflexions permettent généralement de reconstruire et d'investiguer une microtopographie complètement invisible sur des photographies aériennes conventionnelles. Ainsi, dans le secteur à l'étude, plusieurs signes de remaniement des sédiments glaciaires par les vagues et les courants marins ont pu être identifiés même sous couvert forestier. Les zones de till sous la limite marine, par exemple, ont pu être ainsi différenciées (till, till mince, till remanié, ou till remanié mince) avec un niveau de confiance jusque-là inégalé. Considérant que de tels remaniements peuvent augmenter sensiblement la perméabilité d'un matériel, cette nuance peut s'avérer importante à l'échelle régionale.

6.2 Étude des milieux humides dans la zone du Chêne

L'UQAM a étudié les effets des milieux humides sur l'écoulement de l'eau souterraine sur le territoire couvert par la zone de gestion intégrée de l'eau du bassin versant de la rivière du Chêne. Ce travail est réalisé dans le cadre du projet de doctorat en sciences de la Terre et de l'atmosphère de Marc-André Bourgault. Cette section présente 1) l'état des connaissances sur les milieux humides de la zone du Chêne, 2) la méthodologie des travaux de terrain mis en œuvre pendant les étés 2013 et 2014, et 3) les résultats des travaux de caractérisation des fonctions hydrologiques et biologiques des milieux humides de la zone du Chêne. Les résultats présentés dans ce rapport sont préliminaires et partiels, et seront mis à jour dans le doctorat réalisé par Marc-André Bourgault. Ces résultats doivent donc être considérés à titre indicatif seulement de la capacité des approches testées à caractériser les milieux humides et des fonctions hydrologiques de ceux-ci. Ils ne doivent pas être utilisés à des fins de prise de décision. Cette section est un extrait du rapport transmis par l'UQAM qui se trouve en annexe ([Bourgault et al., 2015](#)).

6.2.1 Milieux humides de la zone du Chêne

La zone de gestion intégrée de la rivière du Chêne couvre une superficie de 1178,5 km² (Figure 6.2) et intègre plusieurs bassins versants dont les principaux sont ceux des rivières du Chêne, Beaudet et Aulneuse. Cette surface se trouve à 90,8 % dans la région de Chaudière-Appalaches et à 9,2 % dans la région du Centre-du-Québec. La zone est caractérisée par une forte présence de milieux humides. En effet, ceux-ci couvrent une superficie de 244,7 km², soit environ 20 % du territoire. Par conséquent, il est important de comprendre leur rôle pour assurer une gestion intégrée de la zone de gestion intégrée de l'eau de la rivière du Chêne.

Conformément au *Système de classification des terres humides du Canada* ([GTNTH, 1997](#)), aussi utilisé par [CIC \(2006\)](#) et par la MRC de Lotbinière dans sa cartographie des milieux humides ([Falardeau et al., 2009](#)), sept grandes classes de milieux humides peuvent être identifiées sur la zone du Chêne à partir des données cartographiques provenant de la MRC de Lotbinière : les tourbières boisées, les tourbières ombrotrophes (bogs), les tourbières minérotrophes (fens), les marécages, les marais, les eaux peu profondes et les prairies humides. Les milieux humides se trouvent principalement dans trois secteurs bien distincts, le secteur aval localisé dans les basses-terres du Saint-Laurent, le secteur intermédiaire localisé près de l'autoroute 20 et le secteur amont situé principalement dans les Appalaches. Le secteur aval est caractérisée par un assemblage de tourbières ombrotrophes, boisées et de marécages (Figure 6.2; complexe tourbeux-7-9-10-11-14), le secteur intermédiaire par un assemblage de marécages et de tourbières boisées (Figure 6.2; complexe tourbeux-13). La zone amont est quant à elle caractérisée par un assemblage de tourbières ombrotrophes, de tourbières boisées, de tourbières minérotrophes et de marécages (Figure 6.2; voir complexe-1-2-3-4-5-6-8-12-15-16-17).

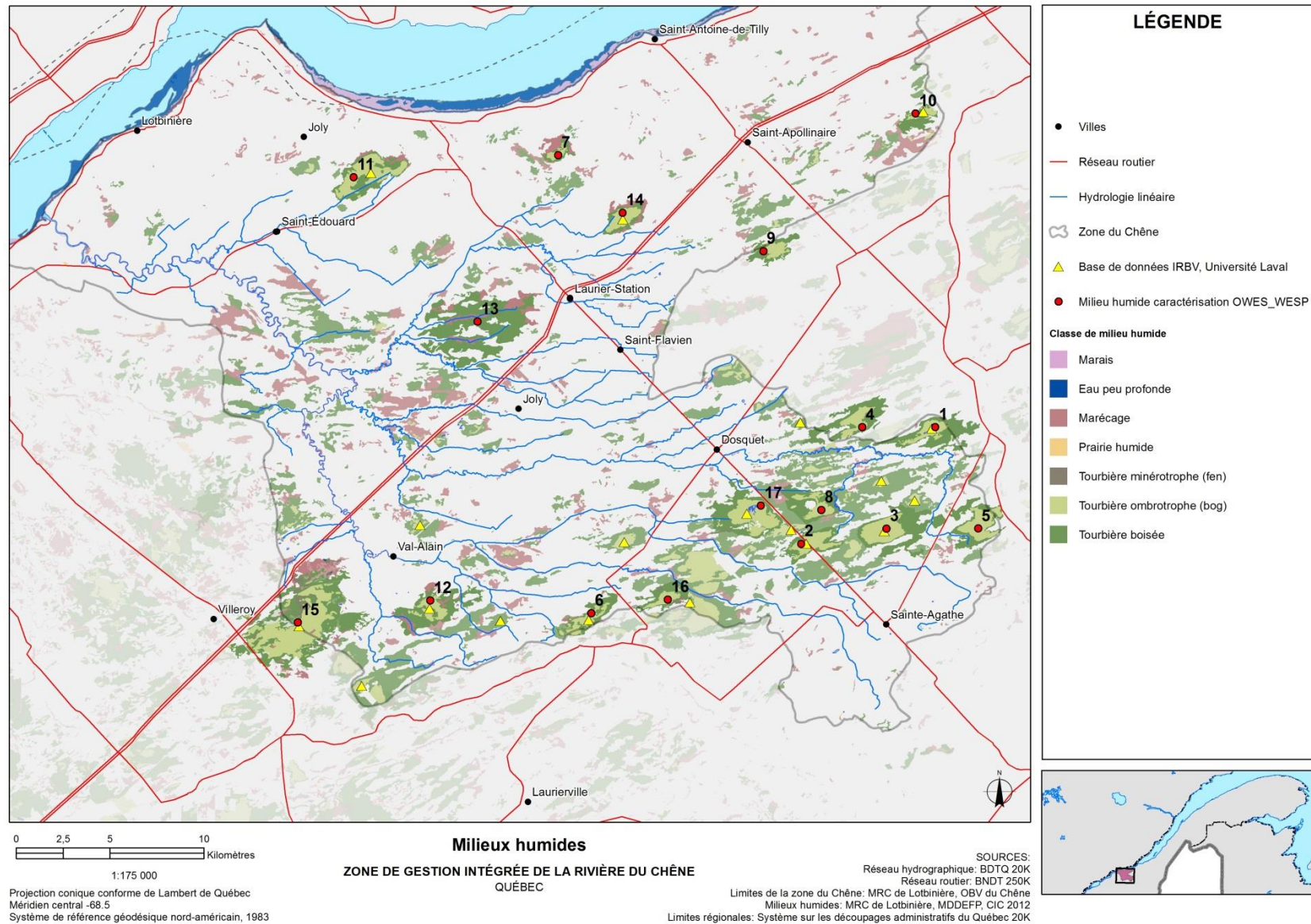


Figure 6.2 : Milieux humides de la zone du Chêne (cartographie des milieux humides de CIC, 2012)

Sur le territoire, les tourbières boisées couvrent 11,3 % de la zone du Chêne, suivi des marécages (4,3 %) et des tourbières ombrotrophes (3,1 %) (Tableau 6.1). Dans des proportions moindres, les eaux peu profondes couvrent seulement 1,3 % de la zone, les marais 0,6 % et les tourbières minérotrophes et les prairies humides moins de 0,1 % (Figure 6.3).

Tableau 6.1 : Statistiques sur les milieux humides de la zone du Chêne

Classes de milieux humides	Superficie	Proportion de la zone du Chêne
	km ²	%
Marais	7,1	0,6
Eau peu profonde	15,2	1,3
Marécage	51,0	4,3
Prairie humide	0,1	< 0,1
Tourbière minérotrophe (fen)	0,9	< 0,1
Tourbière ombrotrophe (bog)	37,1	3,1
Tourbière boisée	133,3	11,3
TOTAL	244,7	20,8

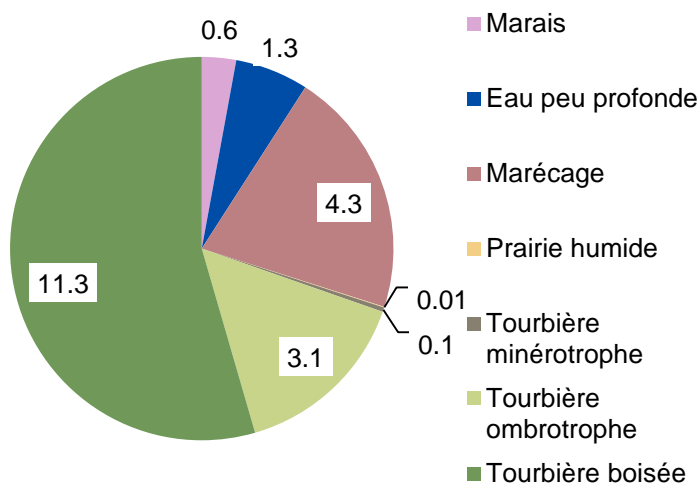


Figure 6.3 : Proportions des classes de milieux humides sur la zone du Chêne

La MRC de Lotbinière abrite 25 % des tourbières ombrotrophes de la région de Chaudière-Appalaches dont certaines ont été identifiées comme ayant un intérêt pour la conservation (MRC de Lotbinière, 2005). En effet, selon le Plan régional de conservation des milieux humides de Chaudière-Appalaches de CIC (2006), près du quart de la superficie des tourbières de la région possède une faune et une flore particulière. La MRC de Lotbinière en partenariat avec l'OBV du Chêne a d'ailleurs entrepris une démarche visant l'inventaire et la caractérisation physique et floristique des milieux humides de la zone du Chêne (Boucher, 2012). Cependant, cet inventaire ne considère pas le niveau de perturbation des milieux humides caractérisés.

L'état des milieux humides, en termes de pressions anthropiques et d'étendues perturbées, est actuellement peu connu à l'échelle de la zone du Chêne. Cependant, selon différents travaux identifiés par [Pellerin et Poulin \(2013\)](#), les superficies perturbées de milieux humides des basses-terres du Saint-Laurent seraient très importantes. Par ailleurs, la MRC de Lotbinière est considérée comme l'une de celles ayant subi le plus de perturbations et les activités agricoles et sylvicoles y seraient les principales sources de pression ([Pellerin et Poulin, 2013](#)).

Or, malgré l'importance des perturbations, aucun milieu humide de la zone ne détient actuellement un statut de protection officiel. En effet, il semble que seuls certains usages (agriculture et/ou déboisement) soient règlementés à l'intérieur ou en bordure de certaines grandes tourbières ombrotrophes (bog) situées en zone agroforestière dans le cadre du schéma d'aménagement ([Cournoyer, communication personnelle, 12 mars 2014](#)). Par manque d'informations sur les milieux humides de la zone, aucun plan de gestion et de protection n'est prévu à ce jour.

6.2.2 Travaux réalisés en 2013 et 2014

6.2.2.1 Travaux de doctorat

Les travaux de terrain réalisés dans le cadre du projet de doctorat de Marc-André Bourgault ont pour objectif de comprendre les fonctions hydrogéologiques des complexes tourbeux de la vallée du Saint-Laurent et de développer des indicateurs de ces fonctions qui permettront aux différents acteurs (ministères, agences de conservation, consultants en environnement et organismes de bassins versants) d'intégrer les complexes tourbeux dans les évaluations environnementales, les plans de gestion intégrée des bassins versants et les plans de conservation. Les objectifs spécifiques de la thèse sont les suivants:

1. Évaluer les variations spatiales des propriétés hydrodynamiques des tourbières comme facteur explicatif des variations des niveaux d'eau intra- et inter-complexe tourbeux;
2. Évaluer l'influence des contextes hydrogéomorphologiques sur les échanges aquifère-tourbière, les variations spatio-temporelles de l'emmagasinement et les hypodépôts de sept complexes tourbeux de la vallée du Saint-Laurent ;
3. Développer des indicateurs topographiques permettant de différencier les fonctions hydrogéologiques des complexes tourbeux.

Sept complexes tourbeux ont été sélectionnés dans les régions de la Montérégie (2), du Centre-du-Québec (3) et dans la région de Chaudière-Appalaches (2). Les deux complexes tourbeux situés dans Chaudière-Appalaches se trouvent sur la zone de gestion intégrée de l'eau du Chêne, ce sont des tourbières de Villeroy et d'Issoudun. Dans chaque complexe tourbeux, six zones ont été instrumentées et caractérisées (Figure 6.4). Quatre zones sont identifiées dans chaque tourbière (secteurs amont, intermédiaire et aval de l'écoulement qui a lieu au sein de la tourbière, et zone de décharge de l'aquifère dans la tourbière) et deux zones sont situées à l'extérieur de la tourbière (secteurs de recharge de l'aquifère par la tourbière et secteur où a lieu l'infiltration qui maintient les niveaux de nappe alimentant la tourbière). L'instrumentation et la caractérisation *in situ* des sites est similaire dans les sept complexes tourbeux:

- Des mesures de profondeur des dépôts organiques à chaque 100 m;
- L'identification de la nature des dépôts meubles sous-jacents aux dépôts tourbeux à chaque 100 m;
- La mesure de niveaux statiques a été réalisée sur deux transects à chaque 100 m à l'intérieur et à des distances variables en périphérie du complexe tourbeux ;
- L'installation de piézomètres instrumentés de sondes Solinst permettant la mesure en continu des niveaux d'eau (secteurs amont, intermédiaire, aval, de décharge, de recharge et infiltration);
- L'installation d'un pluviomètre à bascule et d'un baromètre;

- L'échantillonnage de trois carottes de tourbes de 1 m à l'aide d'un BoxCorer (secteurs amont, intermédiaire, aval dans chaque complexe tourbeux) pour des analyses de densité, de conductivité hydraulique et de concentration en matière organique.

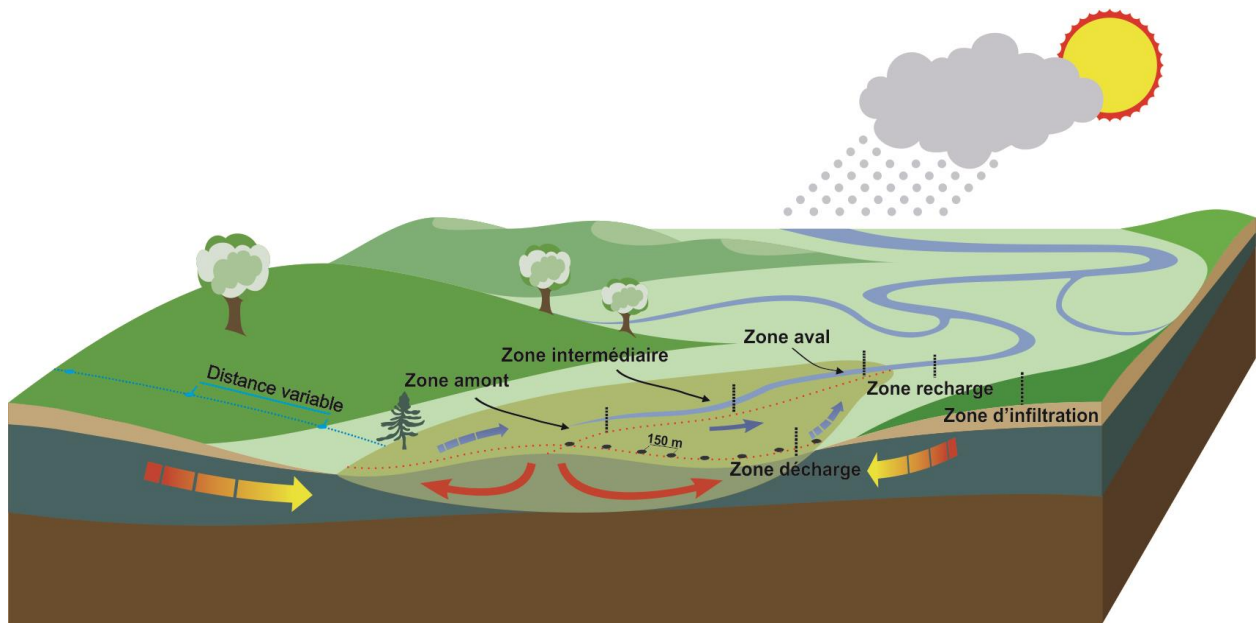


Figure 6.4 : Zones instrumentées à l'aide de piézomètres et emplacement des mesures de niveau statique réalisées à l'intérieur (points noirs) et à l'extérieur du complexe tourbeux (points bleus)

Les échantillons et les données recueillies ont permis de réaliser les travaux suivants :

- Des mesures de conductivités hydrauliques en laboratoire sur les dépôts tourbeux à l'aide de la méthode des cubes (travaux réalisés à l'UQAM);
- Des mesures de densité des dépôts tourbeux à l'aide d'un banc d'analyse «Multi Sensor Core Logger (MSCL)», un instrumenté géophysique encore jamais utilisé sur des carottes de tourbes (travaux réalisés à l'UQAR);
- Des mesures de concentration de carbone et de la densité à l'aide d'une méthode par séchage et de perte au feu (travaux réalisés au GEOTOP);
- Des essais de perméabilité *in situ* dans les dépôts organiques dans tous les piézomètres installés dans les différentes sections de chaque complexe tourbeux;
- Le développement d'un programme permettant de calculer la porosité effective de la tourbe à l'aide des variations de niveaux d'eau et des précipitations.

Les données récoltées pendant les travaux de terrain, de laboratoire et d'analyse numérique réalisés dans le cadre du doctorat de Marc-André Bourgault sont présentement en traitement et ne seront pas présentées dans ce rapport. L'analyse préliminaire des données a fait l'objet de deux communications orales et deux affiches :

1) Premier auteur d'une présentation éclair présentée au colloque organisé par le Centre de la Science de la Biodiversité du Québec (CSBQ) à l'Université McGill, Montréal, Québec, 10 au 12 décembre, 2014;

2) Premier auteur d'une présentation orale au Fall meeting de l'American Geophysical Union à San Francisco, Californie, États-Unis, du 15 au 19 décembre 2014;

3) Premier auteur d'une présentation orale au colloque des étudiants du GÉOTOP, base de plein air Jouvence, Québec, Canada, du 13 au 15 février 2015;

4) Deuxième auteur du poster réalisé par Marjolaine Roux, étudiante au baccalauréat en sciences de la Terre et de l'atmosphère au colloque des étudiants du GÉOTOP, base de plein air Jouvence, Québec, Canada, du 13 au 15 février 2015

Un article scientifique portant sur le développement d'une nouvelle méthode d'analyse des propriétés hydrodynamiques des dépôts tourbeux à l'aide d'un banc d'analyse «Multi Sensor Core Logger (MSCL) sera soumis au journal scientifique *Geophysical Research Letters* au cours de l'été 2015. Finalement, un résumé scientifique a été soumis et accepté pour une présentation orale lors du prochain congrès de l'ACFAS 2015 dans le cadre du colloque annuel du RQES.

6.2.3 Caractérisation des fonctions hydriques et biologiques des complexes tourbeux

Des travaux de terrain ont été réalisés pour évaluer les fonctions hydriques et biologiques des complexes tourbeux à l'échelle régionale en utilisant deux méthodes de caractérisation couramment utilisées au Canada et aux États-Unis. Les objectifs spécifiques de la démarche sont les suivants:

1. Se familiariser avec la méthode de caractérisation fonctionnelle ontarienne (Ontario Wetland Evaluation System - OWES; Ontario Ministry of Natural Resources, 2013) et avec la méthode Wetland Ecosystem Service Protocole - WESP; Adamus, 2011).
2. Caractériser les fonctions biologiques et hydriques des complexes tourbeux de la zone du Chêne afin de répondre au manque d'information concernant les milieux humides de cette région dans une perspective de protection;

Au total, 17 complexes tourbeux (Figure 6.2) comprenant des tourbières ombrotrophes, des tourbières minérotrophes, des tourbières boisées et des marécages ont été visités et caractérisés à l'aide des méthodes OWES et WESP sur la zone du Chêne (le travail a été réalisé également dans le Centre-du-Québec sur sept complexes tourbeux supplémentaires). Plus spécifiquement, un total de 16 tourbières ombrotrophes, 17 tourbières boisées, quatre fens et trois marécages ont été caractérisés sur la zone du Chêne.

Afin d'évaluer les fonctions biologiques et hydriques des complexes tourbeux, chaque type de milieu humide a été visité. Les visites comprenaient, de façon systématique, l'identification des espèces végétales, la mesure des niveaux statiques, l'identification du substratum et des mesures de profondeur de dépôts organiques. L'identification des espèces végétales s'est faite avec la participation de Salomé Pasquet, agente de recherche supervisée par Stéphanie Pellerin, botaniste et chercheuse à l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV). De plus, le formulaire de 128 questions de la méthode WESP a été rempli pour chaque type de milieux humides. Ce formulaire comprend 47 questions complétées préalablement aux travaux de terrain et 81 questions complétées *in situ*. Les questions préalables ont été complétées à l'aide d'images Landsat (GoogleMap) en utilisant la cartographie des réseaux hydrographiques et des milieux humides de la zone du Chêne. La caractérisation fonctionnelle réalisée à l'aide des méthodes WESP et OWES nécessitait entre trois et cinq heures de travail par complexe tourbeux, sans compter les temps associés au déplacement. Les travaux de terrain se sont échelonnés sur quatre semaines plus le temps requis pour l'analyse des résultats.

Les informations cartographiques nécessaires pour caractériser les fonctions des complexes tourbeux à l'aide des méthodes OWES et WESP sont les suivantes :

- Modèle d'élévation terrain à haute résolution provenant des relevés LiDAR de la région de Lotbinière;

- Carte des réseaux hydrographiques (1/20 000) de la Base de données topographique du Québec (BDTQ)
- Carte des dépôts meubles provenant des travaux de l'INRS dans le cadre du PACES Lotbinière;
- Photos aériennes haute résolution;
- Cartographie des types de milieux humides (CIC, 2012).

6.2.4 Système d'évaluation des terres humides de l'Ontario (OWES)

La méthode OWES est une méthode de caractérisation fonctionnelle couramment utilisée en Ontario qui permet de protéger les terres humides d'importance en vertu de la Loi sur l'aménagement du territoire. Basée sur un ensemble de critères climatiques, géographiques, hydrogéologiques et biologiques (Tableau 6.2), cette méthode a été utilisée ici uniquement pour caractériser la fonction biologique des complexes tourbeux de la zone du Chêne. Ce travail de caractérisation a permis de hiérarchiser les complexes tourbeux en ordre d'importance en regard de leur fonction biologique à l'aide d'un système de pointage pouvant varier de 45 à 250 points. Dans la méthode OWES, un complexe tourbeux ayant une fonction biologique dépassant un score de 200 est considéré comme un milieu humide important au niveau provincial. La méthode OWES permet aussi de caractériser les fonctions hydrologiques et sociales en plus d'inclure des composantes spéciales reliées à la présence d'espèce menacée et la rareté du milieu à l'échelle des bassins versants.

Tableau 6.2 : Critères biologiques et hydrologiques pour la caractérisation fonctionnelle OWES et WESP des complexes tourbeux

Critères biologiques (OWES)	Critères hydrologiques (WESP)
Degré-jours de croissance/type de sol	Type de milieux humides
Type de milieux humides	Microtopographie
Contexte hydrogéomorphologique	Présence de l'eau de surface
Nombre de types de MH/complexe	Hydropériode
Communauté végétale	Connectivité avec les rivières
Diversité des habitats périphériques	Complexité de la connexion tourbière-rivière
Proximité d'autres tourbières	Type de végétation
Interspersion	Type de sol
Aire	Échange aquifère-tourbière

Le pointage des complexes tourbeux pour la fonction biologique obtenu sur la zone du Chêne varie entre 124 points et 171 points (Figure 6.5). Le pointage minimum a été calculé à partir d'un milieu humide théorique ayant une superficie inférieure à 0.5 ha, une communauté végétale et une interspersion minimale alors que le pointage maximal a été calculé en maximisant les résultats de chacun des critères tenant compte de la diversité des milieux humides de la zone du Chêne. En calculant l'écart type ($\sigma = 19$ points) des pointages obtenus de l'ensemble des complexes tourbeux localisés dans la vallée du Saint-Laurent qui ont été caractérisés à l'aide de la méthode OWES ($n = 33$), le score associé avec la fonction biologique des complexes tourbeux est significatif à ± 9 points avec intervalle de confiance à 99%. Deux catégories se distinguent, soit les complexes tourbeux localisés en amont à l'exception des complexes tourbeux 12-15-16-17 et les complexes tourbeux localisés à la fois en zone intermédiaire et en zone aval (Figure 6.4).

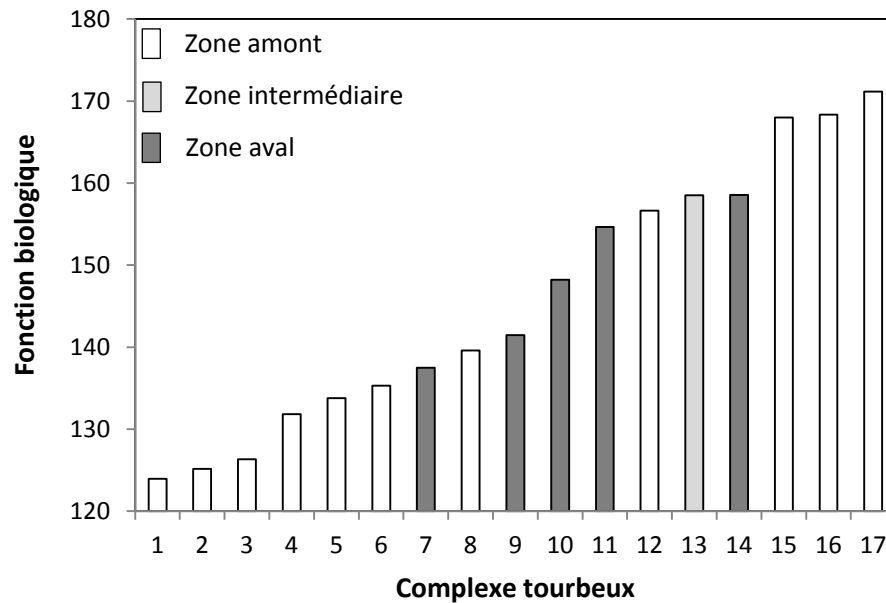


Figure 6.5 : Pointage OWES pour la fonction biologique des complexes tourbeux sur la zone du Chêne

Les complexes tourbeux 17 (171 points), 16 (168 points), et 15 (168 points) obtiennent les scores les plus élevés. Ces complexes tourbeux ont une superficie supérieure à 900 ha, une forme complexe, une forte diversité végétale, au minimum trois types de milieu humide et chacun une particularité qui les distinguent. Le complexe tourbeux 17 est formé d'un assemblage de mare un phénomène très rare dans la vallée du Saint-Laurent alors que les complexes tourbeux 15 et 16 comprennent quatre milieux humides (bog, fen, tourbière boisée et marécage) au sein du même complexe.

Il est important de souligner que les critères hydrologiques de la fonction hydrologique ne permettent pas de refléter de manière réaliste les variations des fonctions hydrologiques et hydrogéologiques des complexes tourbeux, certains critères considérés comme trop subjectifs.

6.2.5 Méthode de caractérisation fonctionnelle et écosystémique (WESP)

La méthode de caractérisation fonctionnelle et écosystémique des milieux humides est une méthode scientifique de terrain permettant de caractériser rapidement tous les types de milieux humides. Cette méthode, qui est présentement utilisée aux États-Unis (Oregon, Alaska) (Adamus, 2011; Adamus, 2013a) et au Canada (Alberta) (Adamus, 2013b) et en processus d'adaptation pour les provinces maritimes du Canada (Nouveau-Brunswick, Nouvelle-Écosse, Terre-Neuve) (Adamus, 2013c), est basée sur des critères géographiques, hydrologiques et hydrogéologiques qui sont observables sur le terrain (Tableau 6.2). Dans la zone du Chêne, cette méthode a été utilisée pour caractériser deux fonctions hydriques soit 1) la capacité des milieux humides à améliorer la qualité des eaux de surface et 2) la capacité des milieux humides à emmagasiner des eaux pluviales. L'application de la méthode a permis de hiérarchiser les complexes tourbeux en ordre d'importance en regard de leur fonction hydrologique à l'aide d'un système de pointage pouvant varier entre 0 et 10.

6.2.5.1 Milieux humides distincts

Les pointages attribués pour l'amélioration de la qualité de l'eau (rétention des nitrates, rétention des sédiments) varient entre 6 et 10. Les marécages, les tourbières ombrotrophes et les tourbières boisées ont

obtenu un score élevé, entre 9 et 10. Pour les marécages, ce score est attribuable à deux caractéristiques: 1) les marécages se forment dans des zones où la microtopographie est accidentée et 2) l'ensemble des dépressions sont isolés les uns des autres. L'eau surface est donc forcée à s'infiltrer dans le sol ce qui change les conditions d'oxydoréduction (Reddy et DeLaune, 2008). Pour les tourbières ombrotrophes et boisées, les niveaux de nappe sont toujours très proches de la surface, ce qui limite la dissolution de l'oxygène dans les dépôts organiques et favorise des conditions réductrices très proches de la surface. Les tourbières minérotrophes obtiennent un score plus faible (6.7) que les autres milieux humides puisqu'elles sont des zones où l'eau circule rapidement et où les variations d'eau interannuelles sont faibles comparativement aux marécages et aux autres tourbières. Le pointage de l'ensemble des milieux humides pour la fonction d'emmagasinement des eaux pluviales varie entre 0.5 et 4.5. Les tourbières ombrotrophes et boisées obtiennent toutes les deux un score de 0.5 alors que les tourbières minérotrophes et les marécages obtiennent un score de 3.3 et de 4.5 respectivement. Selon la méthode WESP, la capacité des tourbières ombrotrophes, des tourbières boisées et des tourbières minérotrophes sont limitées comparativement aux marécages puisqu'ils sont constamment saturés en eau ce qui favorise un écoulement superficiel rapide.

6.2.5.2 Complexes tourbeux

Le pointage des fonctions hydriques a été calculé sur les 17 complexes tourbeux de la zone du Chêne en pondérant la moyenne des scores obtenus préalablement avec l'aire de chaque type de milieux humides rencontré dans le complexe tourbeux. Les pointages pour l'amélioration de la qualité de l'eau (Figure 6.6) et la capacité d'emmagasinement des eaux pluviales (Figure 6.7) varient entre 8.9 et 9.5 et entre 0.5 et 2.3 respectivement. Avec une variation considérée comme significative à 0,5, les variations de pointage des différents complexes tourbeux ne sont pas significatives pour la fonction d'emmagasinement des eaux pluviales et peu significatives pour la fonction amélioration de la qualité de l'eau. Toutefois, le complexe tourbeux 7 se distingue clairement des autres ce qui est attribuable au fort pourcentage (45%) qu'occupe le marécage par rapport à la superficie totale.

La méthode WESP apparaît donc comme une bonne méthode pour distinguer les fonctions hydriques des différents types de milieux humides, mais ne permet pas de caractérisation complètement les fonctions hydrogéologiques des complexes tourbeux de la zone du Chêne. Une modification de ces méthodes et une attention particulière au contexte hydrogéologique serait nécessaires pour mieux intégrer ces fonctions.

6.2.6 Contextes hydrogéomorphologiques des complexes tourbeux

Selon les données recueillies sur le terrain et la compilation de données provenant d'une base de données construite par les chercheuses Stéphanie Pellerin (IRBV) et Monique Poulin (Université Laval), l'épaisseur des dépôts tourbeux de la zone du Chêne varie entre 30 et 610 cm avec une moyenne de 252 cm. Les complexes tourbeux les plus profonds sont localisés dans la zone amont et la zone aval du bassin versant (Tableau 6.3). Les complexes tourbeux localisés dans la zone intermédiaire sont de très faibles épaisseurs avec une moyenne d'épaisseur inférieure à 100 cm.

L'analyse de la nature du substratum indique que les complexes tourbeux se sont développés sur des silts argileux, des silts, des sables fins à moyens et des dépôts de till ayant généralement une matrice très fine. Les complexes tourbeux déposés sur des silts argileux et des dépôts de till sont classés comme ayant un faible potentiel d'interaction avec les aquifères alors que les complexes tourbeux déposés sur des sables fins à moyen sont classés comme des complexes tourbeux ayant un fort potentiel d'interaction avec les aquifères. Par ailleurs, les tourbières déposées uniquement sur des silts sont classées comme des complexes tourbeux ayant un potentiel d'interaction intermédiaires (Tableau 6.3).

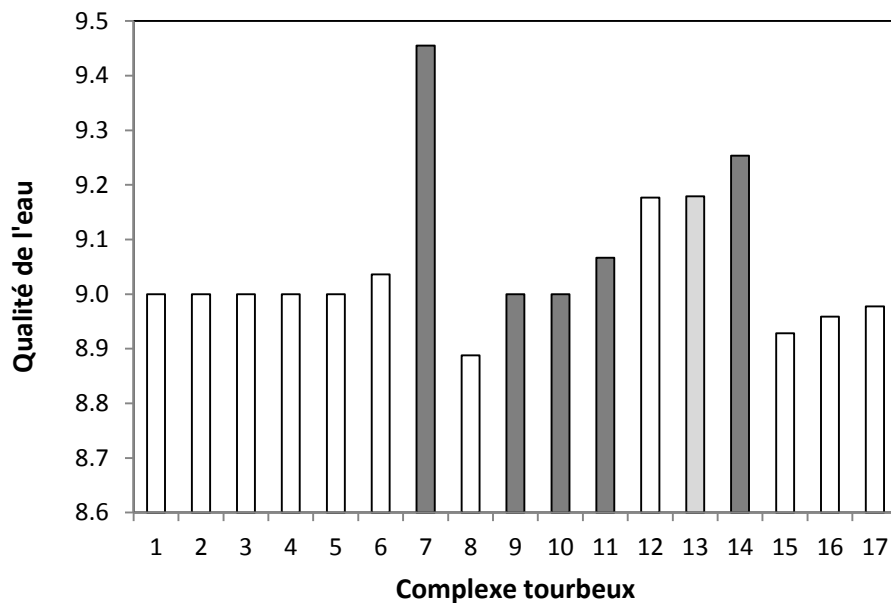


Figure 6.6 : Pointage WESP pour la fonction amélioration de la qualité de l'eau

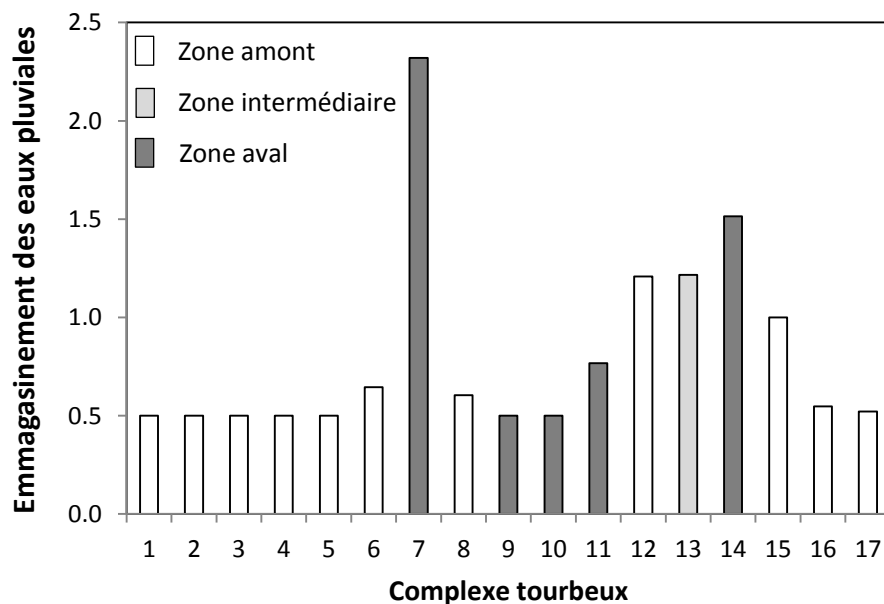


Figure 6.7 : Pointage WESP pour la fonction capacité d'emmagasinement des eaux pluviales

Tableau 6.3 : Contexte hydrostratigraphique des complexes tourbeux étudiés sur la zone du Chêne

Sites	X (UTM 19)	Y (UTM 19)	Épaisseur max (cm)	Substratum	Niveau statique (cm)	Type milieu humide	potentiel interaction	fonction hydrogéologique	Localisation
1	317327	5150054	550	silt	12	1,2	intermédiaire	R, MA	1
2	309099	5159748	215	silt et sable oxidé	22	1,2	fort	R	1
3	314589	5144634	318	sable fin	19	1,2	fort	R, MA	1
4	313362	5150620	220	sable fin	12	1,2	fort	R, MA	1
5	319679	5144733	570	sable fin	17	1,2	fort	R, MA	1
6	298877	5140301	288	sable fin	55	1,2	fort	R, MA	1
7	297706	5164980	520	silt argileux	35	1,2, 4	faible	DR	3
8	311395	5145814	325	sable fin	40	1,2, 3*	fort	R, MA, DB	1
9	310379	5143824	480	silt	50	1,2	intermédiaire	R, MA	3
10	316649	5166686	122	silt et sable oxidé	45	1,2	fort	R	3
11	286801	5164028	420	till matrice fine	50	1,2, 4	faible	DR	3
12	290511	5141311	223	silt et sable oxidé	30	1,2,4	fort	R, MA	1
13	292832	5156512	30	sable fin à moyen	5	2, 4	fort	DR	2
14	301074	5161688	454	till avec matrice fine	15	1,2, 4	faible	DR	3
15	283230	5139738	491	silt et sable oxidé	45	1,2, 3	fort	R, MA, A	1
16	303084	5141283	200	silt et sable	77	1,2,3	fort	R, MA, A, DB	1
17	307402	5145707	610	sable fin à moyen	28	1,2, 3*	fort	R, MA, DB	1

* Type de milieux humide : 1=bog, 2=tourbière boisée, 3=tourbière minérotrophe

* Potentiel d'interaction : R=recharge, MA=maintien des niveaux, DR=contribution aux rivières, A=alimenté par l'aquifère, DB=maintien des débits de base

*** Localisation (sur la zone du Chêne) : 1 = amont, 2 = intermédiaire, 3 = aval

De façon générale, les complexes tourbeux occupent cinq types de fonctions hydrogéologiques. Par exemple, ils peuvent recharger les aquifères (R), être alimentés par les aquifères (A), participer aux débits de rivières (DR), maintenir les débits de base des rivières (DB) et/ou maintenir les niveaux d'eau des aquifères qui alimentent les rivières de la zone du chêne (MA).

Les complexes tourbeux (1-3-4-5-6-8-9-12-15-16-17) localisés en zone amont et intermédiaire de la zone du Chêne occupent une grande superficie du territoire et sont déposés sur des sédiments ayant un fort

potentiel aquifère. En ce sens, ils jouent une fonction indirecte de maintien des niveaux des aquifères. De plus, deux de ces complexes tourbeux sont directement connectés à la rivière, (8-17), et contribuent sans doute au maintien des débits de base de la rivière du Chêne. Sur l'ensemble des complexes tourbeux, seulement deux complexes tourbeux sont alimentés par les eaux souterraines, comme en témoigne la présence de fens juxtaposés aux zones ombrotrophes des complexes tourbeux (15-16).

Par ailleurs, quatre complexes tourbeux sont juxtaposés à des sables oxydés d'origine éolienne (2-10-12-15). Les sables éoliens sont des zones où les complexes tourbeux rechargent l'aquifère. Un des complexes tourbeux (13), localisé dans la zone intermédiaire s'est formé sur des sables fins à moyen formant une pente se dirigeant vers la rivière Huron et participant à son débit. Enfin, trois complexes tourbeux sont localisés dans la zone aval (7-11-14). Ils se sont sans doute formés dans des cuvettes sur des sédiments n'ayant aucun potentiel aquifère, ce qui favorise une dynamique d'accumulation et d'écoulement rapide contribuant davantage à l'eau de surface.

6.2.7 Perspectives

Il est important de rappeler ici que les résultats présentés dans ce rapport doivent être considérés à titre indicatif seulement de la capacité des approches testées à caractériser les milieux humides et des fonctions hydrologiques de ceux-ci. Ces résultats ne doivent pas être utilisés à des fins de prise de décision.

Au cours de l'année 2015 et 2016, l'ensemble des données récoltées sera analysé. Ces analyses permettront d'approfondir les connaissances sur les fonctions hydriques des complexes tourbeux de la région de la zone du Chêne. Des travaux complémentaires seront réalisés pour adapter une méthode de caractérisation fonctionnelle s'inspirant de la méthode OWES pour la caractérisation des fonctions biologiques et de la méthode WESP pour la caractérisation des fonctions hydriques des différents milieux humides. Un travail important sera requis pour arrimer les fonctions hydrogéologiques des complexes tourbeux, les données hydrogéologiques disponibles suite aux travaux de terrain réalisés dans le cadre des projets PACES, de même que les travaux de terrain sur les milieux humides réalisés dans la thèse de Marc-André Bourgault.

6.3 Modélisation régionale hydrogéologique et hydrogéochimique

Cette section décrit un projet de recherche de maîtrise réalisé par Debora Janos à l'Université Laval sous la direction de John Molson et la codirection de René Lefebvre. Ce projet a pour titre « *Le temps de résidence des eaux souterraines dans la région de la Chaudière-Appalaches : Boucler la boucle entre l'écoulement et la géochimie régionale* ». Cette recherche, réalisée dans le cadre et sur la base des données produites par le projet PACES Chaudière-Appalaches, a pour but de mettre en perspective l'influence de la dynamique de l'écoulement régional sur la géochimie de l'eau souterraine dans la région d'étude à l'aide de modélisation numérique. Dans un premier temps, un modèle d'écoulement en deux dimensions le long d'une coupe verticale servira à définir quantitativement l'écoulement régional de l'eau souterraine, notamment en déterminant la profondeur de l'écoulement actif, en quantifiant les flux et vitesses d'écoulement régionaux et en estimant les temps de résidence. La deuxième étape de modélisation consistera à identifier les processus géochimiques dominants à l'aide d'un bilan de masse sur des échantillons caractéristiques de la région d'étude. Ensuite, un modèle 1D sera utilisé pour modéliser l'évolution géochimique des eaux souterraines selon la coupe régionale modélisée précédemment. Les temps de résidence dérivés du modèle d'écoulement seront utilisés comme paramètres communs entre les deux modèles (hydrodynamique et géochimique), permettant ainsi de vérifier la cohérence entre les processus géochimiques et l'écoulement, à la fois dans l'espace et dans le temps. Les résultats de ce projet viendront appuyer le modèle conceptuel du système aquifère et pourront servir d'outil quantitatif pour soutenir les processus décisionnels relatifs à la gestion et protection de la ressource en eau souterraine.

6.3.1 Contextes géologiques et hydrogéologiques

Le chapitre 3 du présent rapport a déjà décrit les contextes géologiques de la Chaudière-Appalaches, alors que le chapitre 4 a présenté des cartes permettant de définir les conditions hydrogéologiques. Le développement du modèle numérique d'écoulement va considérer les particularités de la région, et un court rappel est fait des conditions qui devront particulièrement être pris en considération. La région de la Chaudière-Appalaches traverse plusieurs zones géologiques caractérisées par des reliefs variés. Puisque l'écoulement de l'eau souterraine dépend en grande partie de la topographie, ce relief devra être représenté dans le modèle numérique. Du sud vers le nord, la région est d'abord traversée par les Appalaches, racine d'une ancienne chaîne de montagnes. Le plus au sud, la Ceinture de Gaspé, un bassin sédimentaire formé suite à l'orogène Taconien, est assise sur la Zone de Dunnage. Celle-ci est caractérisée par une géologie volcanique et sédimentaire océanique et est suivie par la zone de Humber. Cette dernière est la résultante d'une marge continentale passive et est donc composée carbonates, grès et shales. Également, la région appalachienne est caractérisée par des intrusions granitiques formant de petites montagnes, notamment les Petits Monts Mégantic atteignent 850 m d'altitude et les Monts Notre-Dame 1000 m d'altitude. Ceux-ci sont entourés par une ceinture de collines, puis, au sud par le haut plateau appalachien et au nord par une zone de piémont qui rejoint la plaine sédimentaire des basses-terres du Saint-Laurent. Ayant des antécédents de forte activité tectonique, la région appalachienne est marquée par la présence de linéaments d'orientation NE-SO se manifestant notamment sous la forme de failles majeures (Caron, 2012). Les basses-terres du Saint-Laurent se composent d'une succession sédimentaire assise en discordance sur le socle du Bouclier Canadien (Globensky, 1987). En raison des compressions tectoniques, des failles normales marquent l'abaissement progressif de la succession sédimentaire qui plonge sous le bassin des Appalaches (Castonguay et al., 2010). La compression tectonique a également mise en place des écailles de chevauchement, notamment l'écaille du réservoir de Saint-Flavien.

L'aquifère régional est constitué de la partie fracturée des unités géologiques appalachiennes qui se situe plutôt vers la surface (section 4.1; Benoit et al., 2014). La présence de failles importantes pourrait également représenter des zones où le niveau fracturation serait plus élevé. Par contre, le rôle que jouent ces zones dans l'écoulement régional reste inconnu.

Le niveau de confinement de l'aquifère régional, quant à lui, dépend de l'épaisseur et de la nature des dépôts meubles qui le recouvrent. Sur l'ensemble du territoire, on retrouve des dépôts de till ayant des épaisseurs et des assemblages variés. Par conséquent, la nature de ces unités de tills définissent le degré de confinement de l'aquifère rocheux. La section 3.3 a montré que des conditions libres prévalent dans les Appalaches, sauf dans les vallées où les conditions sont généralement semi-captives. De plus, les processus de glaciation-déglaciation, la formation des lacs post glaciaires et la présence de la mer de Champlain ont participé, par endroit, au lessivage des particules fines, laissant derrière des dépôts ayant des proportions variés de gravier, sables et silts. Ces derniers, accompagnés des dépôts alluviaux, offrent une voie d'infiltration importante lorsque directement en contact avec l'aquifère rocheux. D'autre part, les éparses dépôts silteux et argileux, déposés au fonds de plans d'eau stagnants suite à la période glaciaire, empêchent l'infiltration des eaux de recharge et occasionnent l'accumulation de matériaux organiques. Ces dépôts sont notamment présents sous la limite marine, particulièrement dans la partie nord-ouest de la région où on retrouve un contexte géologique de Plate-forme. Les sections 4.3 et 4.4 ont montré comment la nature des dépôts meubles contrôle la recharge et les zones d'émergence de l'eau souterraine, alors que la section 4.5 a présenté l'incidence de ces dépôts sur la vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional. Ainsi, du point de vue de l'écoulement des eaux souterraines, en raison de son altitude prédominante, la région des Appalaches peut être considérée comme une zone de recharge à l'échelle régionale et le fleuve Saint-Laurent, marquant la limite nord et le point le plus bas de la région à l'étude, comme l'exutoire ultime de l'écoulement. Cependant, l'importance de l'écoulement régional à l'échelle du bassin n'est pas encore bien définie et la modélisation numérique pourra apporter des indications à ce sujet. Les ruisseaux et rivières

dans les sous-bassins pourraient également agir, dans certaines régions, comme des zones de résurgence, surtout que le réseau de cours d'eau est très dense dans les Appalaches à cause du relief très morcelé qu'on y retrouve (voir sections 4.2 et 4.4).

6.3.2 Approche de modélisation

Le projet PACES en Chaudière-Appalaches a apporté une compréhension qualitative du système d'écoulement régional et a permis de définir les conditions hydrogéologiques qui régissent l'écoulement, telles que les conductivités hydrauliques des différentes unités hydrostratigraphiques et la distribution spatiale de la recharge. La modélisation numérique de l'écoulement va quant à elle servir à évaluer l'influence des caractéristiques régionales sur les conditions d'écoulement, telles que la présence des dépôts meubles, de failles et le gradient de salinité de l'eau souterraine. Dans un premier temps, un modèle vertical en deux dimensions sera développé le long d'une ligne d'écoulement régionale. Cette section de 70 km s'étendra du haut plateau des Appalaches, au sud, jusqu'au fleuve Saint-Laurent, au nord, à travers les MRC Lotbinière et des Appalaches. Ce secteur de la région d'étude a été retenu pour le développement des modèles parce qu'on retrouve dans la partie aval, située dans les basses-terres, les groupes d'eau présent dans la région qui sont les plus évolués géochimiquement (section 4.6). Pour contraindre les résultats de modélisation, les temps de résidence de l'eau souterraine estimés par ce modèle pourront être comparés aux âges ^{14}C corrigés des eaux souterraines obtenues sur des échantillons prélevés dans la région. Le modèle numérique d'écoulement permettra, notamment, de répondre aux questions suivantes :

- Y a-t-il une composante d'écoulement régionale? Quelle est sa profondeur et quelle est l'échelle de temps sur laquelle se fait un tel écoulement régional?
- Quel rôle jouent les dépôts meubles sur le confinement de l'aquifère rocheux. Quel impact ont-ils sur l'emplacement des zones recharge et d'émergence régionales et sur les patrons d'écoulement locaux et régionaux?
- Jusqu'à quelle profondeur retrouve-t-on l'écoulement actif de l'eau souterraine? Quels sont les flux et les vitesses d'écoulement qui y sont associées?
- Le gradient de salinité de l'eau souterraine influence-t-il l'écoulement régional?
- La présence de failles représente-elle des chemins d'écoulements préférentiels?

La deuxième étape de modélisation consistera à identifier les processus géochimiques naturels dominants qui affectent l'eau souterraine à l'aide d'un bilan de masse effectué sur des échantillons caractéristiques des différents groupes d'eau présents dans la région d'étude (section 4.6). Tel que décrit précédemment, à partir du moment où l'eau s'infiltré dans le sol jusqu'à sa résurgence, la nature de la matrice minérale qu'elle traverse vient affecter sa composition chimique. Dans la région de la Chaudière-Appalaches, les processus ayant influencés l'évolution des eaux souterraines sont la dissolution des minéraux carbonatés présentes dans les roches sédimentaires, des échanges ioniques $\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ se produisant à l'intérieur des limites de l'ancienne mer de Champlain ainsi le que mélange avec des eaux de types marines déposées par l'ancienne mer de Champlain et possiblement avec des saumures profondes (section 4.6). Le bilan de masse permettra de vérifier et de quantifier l'apport de chaque processus à la composition des groupes d'eau « naturels » identifiés plus tôt. Les groupes d'eau d'intérêt dans le cadre de l'étude sont le groupe 2 considéré comme de l'eau de recharge, le groupe 5 considéré comme une eau modérément évoluée géochimiquement et le groupe 6 pouvant être considérée comme une eau évoluée.

Ensuite, les processus géochimiques seront modélisés le long d'une ou de plusieurs lignes d'écoulement régionales à l'aide d'un modèle de transport réactif en une dimension. Les échantillons prélevés dans le cadre du projet PACES-CA serviront à définir les compositions chimiques aux extrémités du modèle 1-D. Les temps de résidences dérivés du modèle d'écoulement sont utilisés comme paramètres communs entre les deux modèles, permettant ainsi de vérifier la cohérence entre les processus géochimiques et

l'écoulement dans l'espace et dans le temps. La modélisation géochimique permettra plus spécifiquement de répondre aux questions suivantes :

- Les emprunts géochimiques des groupes d'eau sont-elles cohérentes avec les temps résidences calculés, le chemin empruntés et les âges ^{14}C corrigés des eaux échantillonnées?
- Y a-t-il une évidence de mélange avec des saumures profondes dans les eaux moins profondes?
- Pendant combien de temps encore la signature de géochimiques de l'ancienne mer de Champlain sera-elle apparente?

6.4 Modélisation hydrologique

Cette section décrit les méthodes, les sources données et les résultats de la modélisation hydrologique de l'hydrologie de surface ciblée sur l'évaluation de la recharge de l'aquifère régional de roc fracturé en Chaudières-Appalaches. 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-QC2, une version du modèle SWAT2009 ("Soil Water Assessment Tool") adaptée aux conditions agroclimatiques du Québec afin de reproduire l'hydrologie du parcellaire agricole drainé souterrainement. La modélisation hydrologique a été supportée par le système d'information géographique (SIG) ArcGIS 9.3.

6.4.1 Description du modèle SWAT

Le modèle 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 ([Arnold et al., 2005](#); [Neitsch et al., 2002](#); [Srinivasan, 2000](#); [Santhi et al., 2001](#)) pour prédire les transferts diffus de sédiments, de nutriments et de pesticides. 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. L'ensemble des processus sont simulés de façon quotidienne à l'échelle de petites unités de territoire appelées unités de réponse hydrologique (URH) (figure 6.8). 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 le transportent l'eau d'un tronçon de sous-bassin aux autres, jusqu'à l'exutoire principal.

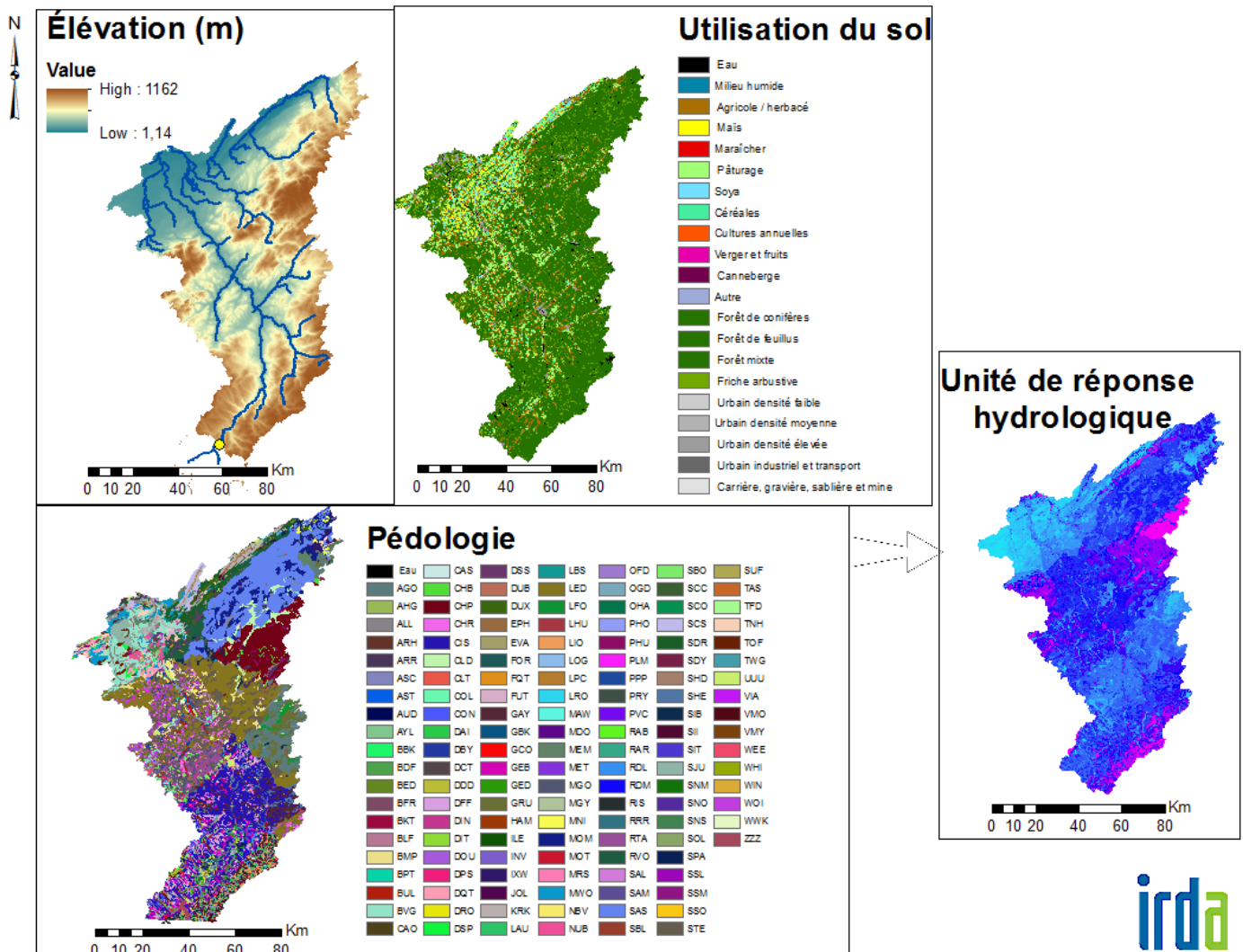


Figure 6.8 : Représentation spatiale des unités de réponse hydrologiques (URH)

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 6.9). 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'infiltré 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/prélèvements en eau, en azote et en phosphore régissent la croissance de ces dernières. SWAT modélise également l'évapotranspiration du sol et des plantes.

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - Qr_i) \quad 6.1$$

- 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.

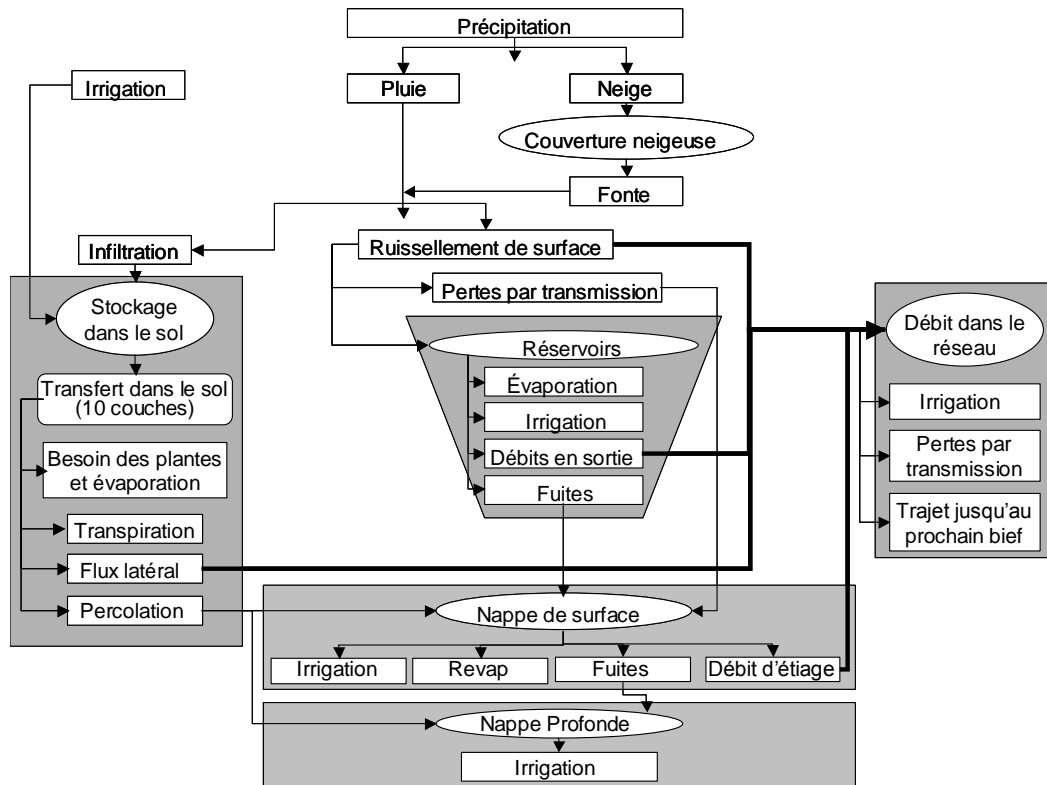


Figure 6.9 : Composantes hydrologiques du modèle SWAT (adapté d'Eckhardt et Arnold, 2001)

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 6.9) à l'aide du coefficient de percolation (r_{chrg_dp}). Ce paramètre de calage distribue en proportion les volumes d'eau entre les deux aquifères, soit les aquifères peu profond et profond. Conceptuellement, l'aquifère peu profond est associé à une nappe non confinée, qui ressurgit au cours d'eau, alors que l'aquifère profond est associé à une nappe d'eau confinée.

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 6.10 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, soit : 1) en résurgence au cours d'eau, 2) par pompage et 3) ou extraction par les plantes. La plus importante composante est la résurgence, contribuant au débit de base du cours d'eau, et 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.

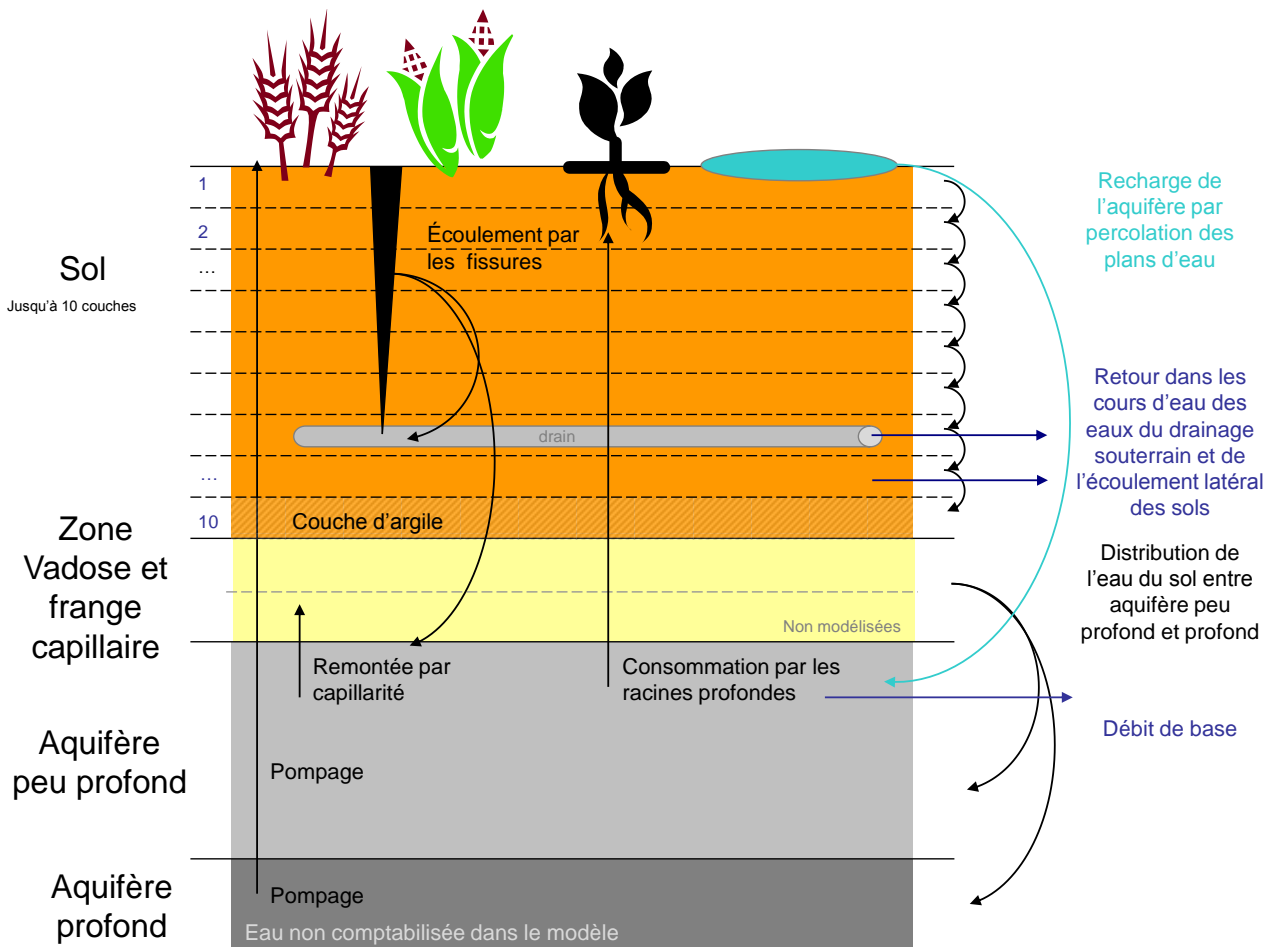


Figure 6.10 : Schéma du fonctionnement souterrain de SWAT

Sur une base annuelle ou saisonnière, la recharge de l'aquifère est définie de la manière suivante:

$$R = R_{ap} + R_{app} - Q_{base} - P - C_p - rc \quad (\text{mm}) \quad 6.2$$

où : R est la recharge des aquifères (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. À toutes fins utiles cependant, 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.

6.4.2 Zone d'étude

L'exercice de modélisation de la recharge de l'aquifère régional à l'aide de SWAT couvre les bassins versants des rivières Chaudières, Etchemin, Boyer et Du Sud, dont la localisation est illustrée en figure 6.11.

6.4.3 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.

6.4.3.1 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 modèle numérique de terrain utilisé dans le cadre de la présente étude provient du [MRN \(2013\)](#). Les pixels originaux ont une résolution spatiale de 10 mètres et une précision autour de 10 mètres également. Le MAN a été ré-échantillonné à une résolution de 30 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 les zones planes des secteurs avals des bassins à l'étude.

Une couche hydrographique linéaire continue a aussi été créée à partir des couches d'hydrographie linéaire et surfacique de la BDTQ ([MRN, 1999](#)). Le modèle SWAT-QC2 a mis à profit cette couche hydrographique de façon à encaver le réseau hydrographique dans le MAN et assurer que le patron d'écoulement de l'eau de surface respecte l'écoulement réel.

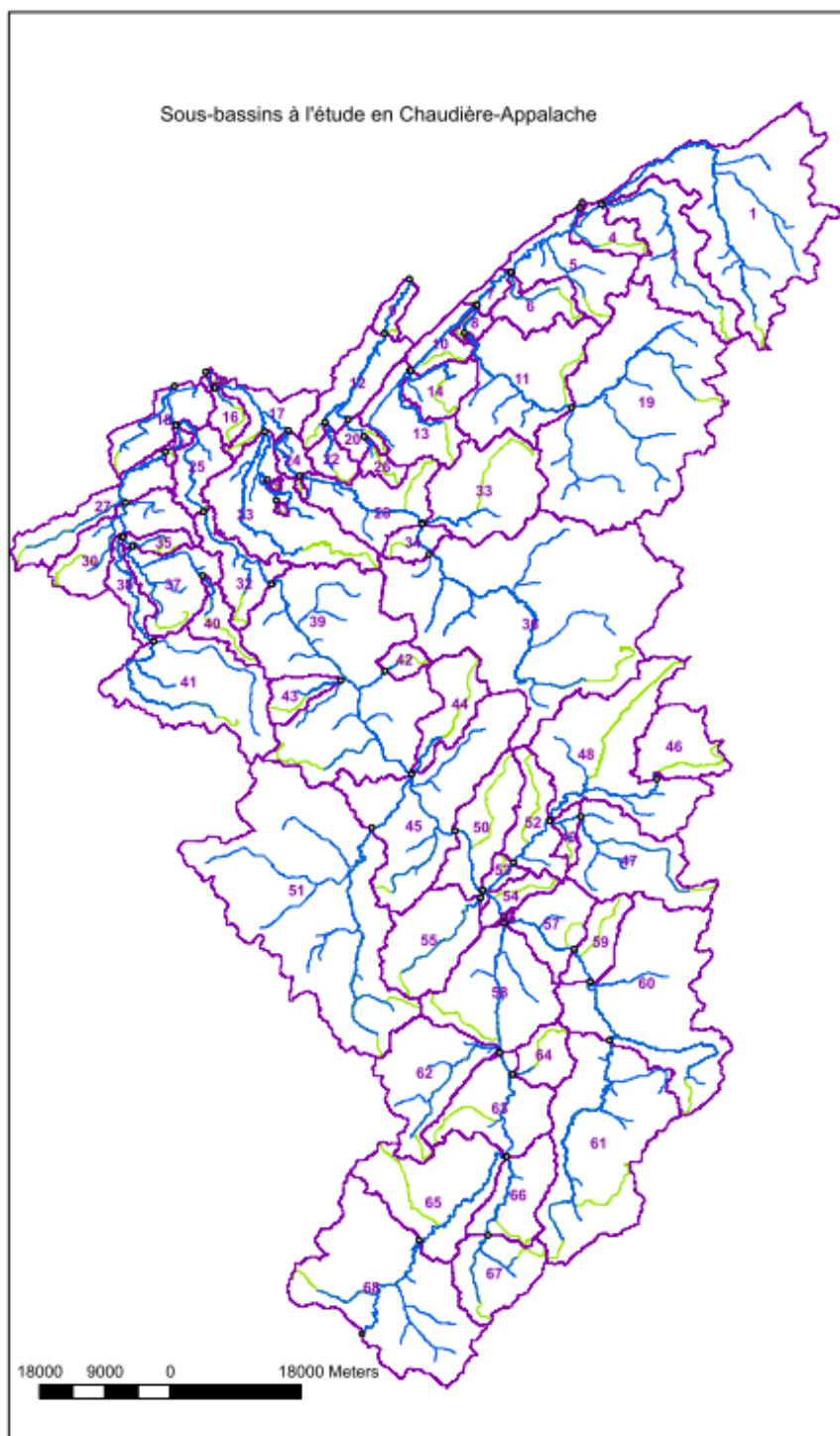


Figure 6.11 : Localisation des 68 sous-bassins versants retenus pour la modélisation hydrologique

6.4.3.2 Localisation des stations hydrométriques et délimitation des sous-bassins

Le découpage du territoire à l'étude en 68 sous-bassins a été supporté par les localisations des stations hydrométriques en opération ou historiques, de même que par les délimitations proposées par le SWAT-QC2 sur la base des parcours de l'eau défini à l'aide du MAN. Au total, les localisations de 33 stations hydrométriques, en opération ou associées à des jeux de données historiques (figure 6.12), ont été retenues dans le découpage des sous-bassins. À ces stations, 35 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 région de Chaudières-Appalaches à l'étude. Au total, 68 sous-bassins ont ainsi été créés, dont la localisation est illustrée en figure 6.11. Pour les fins du calage du modèle hydrologique, les observations journalières de onze stations hydrométriques, couvrant douze années complètes (2001-2012) ont été retenues. La liste des stations hydrométriques utilisées, de même que les superficies correspondantes de leurs bassins versants est reproduite au tableau 6.4.

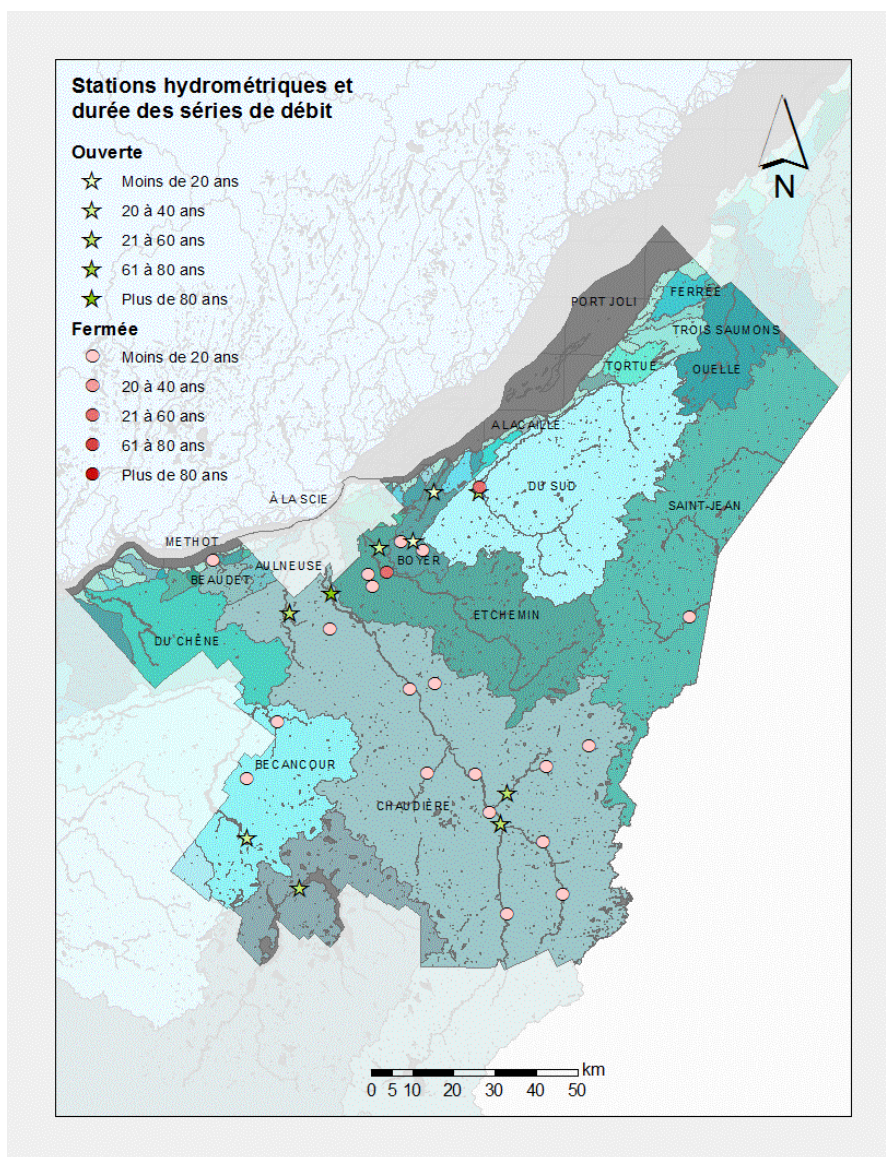


Figure 6.12 : Localisation des stations hydrométriques et durée des séries de débit

Tableau 6.4 : Localisation et périodes d'opération des stations hydrométriques utilisées dans la modélisation hydrologique

Station	Nom	Statut	Début	Fin	Longitude	Latitude	Type
023401	Beaurivage	Active	1925-09-15		-71° 17' 20"	46° 39' 25"	Exutoire
023402	Chaudière (St-Lambert)	Active	1915-02-27		-71° 12' 49"	46° 35' 13"	Exutoire
023422	Famine	Active	1964-10-22		-70° 38' 21"	46° 10' 1"	Exutoire
023429	Chaudière (Mégantic)	Active	1976-10-19		-70° 52' 50"	45° 34' 23"	Entrée
023429	Chaudière (St-Georges)	Active	1978-10-01		-70° 39' 16"	46° 5' 47"	Exutoire
023445	Bras d'Henri	Fermée	2006-06-26	2013-12-07	-71° 12' 44"	46° 30' 25"	Exutoire
023303	Etchemin (St-Henri)	Active	1980-10-01		-71° 4' 5"	46° 41' 29"	Exutoire
023304	Fourchette Amont ⁽¹⁾ (St-Geneviève)	Active	2001-10-15		-71° 5' 7"	46° 36' 15"	Exutoire
023305	Fourchette Aval ⁽¹⁾ (branche 52)	Active	2001-10-15		-71° 6' 8"	46° 37' 45"	Exutoire
023004	Boyer	Active	1993-05-29		-70° 54' 2"	46° 48' 57"	Exutoire
023002	Boyer Sud	Active	1993-06-29		-70° 57' 38"	46° 42' 27"	Exutoire

⁽¹⁾ Stations hydrométriques opérées par l'IRDA et disposant d'observations du signal géochimique.

6.4.3.3 Délimitation et caractérisation des unités de réponses hydrologiques

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-QC2 (version ArcSwat) effectue un recoupement entre la délimitation des sous-bassins, l'utilisation du sol et les sols. Le modèle ainsi créé pour ce projet comporte 7,033 URH, créées à partir de 68 sous-bassins, 14 classes d'utilisation du sol et 141 types de sols. L'ensemble des données géospatiales ont été ramenées à une résolution de 30 m.

Données pertinentes à l'utilisation du sol

La couche matricielle de l'utilisation du sol utilisée dans le montage du modèle a été produite à partir de quatre sources de données (tableau 6.5). La carte écoforestière du SIEF (MRN, 2003) en constitue la carte de base, à laquelle ont été ajoutées la couche d'hydrographie surfacique du MRN (MRN, 2012) et la carte de la base de données des cultures assurées de 2010 de la Financière Agricole du Québec (FADQ, 2010). Au départ, les données pertinentes à l'occupation du sol 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, a été d'avantage simplifiée. La couche de données résultante est de 30 m de résolution et comporte 14 catégories, décrites au tableau 6.6.

Le système d'information géographique (SIG) 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 CO₂ des plantes ainsi que leur mort et leur décomposition. Une description complète de ces bases de données est disponible dans Neitsch et al. (2002).

Tableau 6.5 : 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	2010	1/50 000
Carte écoforestière	MRNF	2003	1/20 000
Hydrographie surfacique	MDDEFP	2012	1/20 000

Tableau 6.6 : Classes d'utilisation du sol utilisées en support à la modélisation hydrologique

Catégorie	Pourcentage d'occupation	Code SWAT
Lac et rivière	5.7 %	WATR
Milieu humide	0.2 %	WETL
Urbain	3.0 %	UIDU et URBN
Sablère ou sol découvert	0.8 %	BARR
Maïs	7.1 %	CORN
Maraîcher	1.3 %	CRRT
Fraise	0.9	STRW
Céréale - Avoine	5.1 %	OATS
Cultures pérennes	13.4 %	PAST
Agricole - Général	0.4 %	AGRC
Jachère ou herbage	8.0 %	RNGB
Soya	7.2 %	SOYB
Forêt de conifères	11.3 %	FRSE
Forêt de feuillus	35.6 %	FRSD

Enfin, les statistiques de rendements extraites des données de la Financière agricole du Québec par culture pour les années 2001 à 2012 ont servi de balises à la modélisation des biomasses annuelles modélisées par SWAT-QC2. 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).

Cartographie et base de données des sols

La carte pédologique numérique développée pour l'ensemble de la zone d'étude a été constituée à partir des différentes études pédologiques de comtés publiées dans les différentes régions au fil des années et numérisées par l'IRDA (2010). Une description complète des sources de données pédologiques est présentée en 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 30 m, à partir de l'identifiant du sol dominant (code sol1). La carte finale des sols de la zone d'étude comporte 141 types de sols distincts, associés à des propriétés physico-chimiques spécifiques.

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 physiques nécessaires au modèle pour calculer le bilan hydrique des sols, incluant notamment le nombre et la profondeur des horizons (couches) de sol, les contenus en sable, limon et argile, la densité apparente, la fraction d'eau utile et la conductivité hydraulique saturée. Afin de rassembler les informations requises, plusieurs sources d'informations ont été utilisées, telles que décrites au tableau 6.7.

Tableau 6.7 : Données pédologiques utilisées dans le paramétrage du modèle hydrologique

Source	Informations disponibles
Inventaire des problèmes de dégradations des sols (Tabi et al., 1990)	Profondeur Sable, limon, argile Conductivité hydraulique Densité apparente Matière organique
Base de données analytiques d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (Lamontagne et Nolin, 2008)	Profondeur Sable, limon, argile Conductivité hydraulique Matière organique
Base de données des groupes hydrologiques de l'IRDA (Gagné et al., 2013)	Groupe hydrologique
Fonctions de pédo-transfert (Saxton, 2004)	Contenu en eau utile Densité apparente Conductivité hydraulique

La profondeur des couches de sols et les pourcentages de sable, de limon, argile et carbone organique, ainsi que la conductivité hydraulique sont tirés de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles (Tabi et al., 1990) ou de la base de données analytiques de Lamontagne et Nolin (2008). La densité apparente est tirée de l'inventaire de Tabi et al. (1990), alors que le groupe hydrologique a été extrait de la base de données des groupes hydrologiques de l'IRDA (Gagné et al, 2013). Certains rapports pédologiques ont également été mis à profit pour documenter les profondeurs des couches de certains

sols. La réserve en eau utile (AWC) 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 facteur d'érodabilité des sols ont été tirés de la base de données de l'ODEP ([Michaud et al., 2008a](#)). Lorsque les propriétés physiques (contenue en eau utile, conductivité hydraulique, densité apparente) de certains types de sol n'étaient pas documentés auprès des sources mentionnées précédemment, les propriétés ont été estimées au moyen de fonctions de pédo-transferts de [Saxton \(2004\)](#) qui utilisent comme intrants minimum les contenus en sable et argile. Enfin, une partie des données pédologiques ont été recueillies par l'Université Laval dans le cadre du projet PACES-Lévis.

6.4.3.4 Données météorologiques

Les données quotidiennes de précipitations totales et de température utilisées en support à la modélisation hydrologique proviennent d'Environnement Canada, telles que rapportées en section 1.5.2.2. En tout, les données de précipitations et de températures minimales et maximales journalières de 26 stations météorologiques ont été utilisées couvrant la période de modélisation hydrologique 2001-2012.

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. 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.

6.4.3.5 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 ont été choisies en fonction des données pluviométriques, tout en tenant compte des informations contenues dans le bulletin annuel *L'état des cultures* (FADQ). 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. Les opérations au champ ont par la suite été simulées en ciblant un critère d'absence de précipitations pour les deux jours précédents. Pour le présent exercice, les opérations de fertilisation des cultures ont été simulées de façon automatique, de façon à répondre en continue aux besoins en nutriments des cultures.

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 \(2011\)](#) ont été mises à profit pour redistribuer les champs ayant un drainage souterrain. Le drainage souterrain des sols à texture plus lourdes et supportant des cultures annuelles a été privilégié. Finalement, un des paramètres les plus importants, les valeurs initiales des numéros de courbes (ou « curve number »), à la base de la méthode SCS-CN ([USDA-SCS, 1972](#)) qui sert à calculer le ruissellement, ont également été inscrits dans les fichiers de gestion.

6.4.3.6 Observations hydrométriques

Les mesures de débits 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 cette étude, les observations de 11 stations hydrométriques ont été mises à profit dans le calage du modèle hydrologique, tel que rapportées au tableau 6.4.

En complément des observations de débits, deux stations hydrométriques équipées de sondes multi-paramètres opérées par l'IRDA dans le cadre de différents projets (Michaud et al., 2009; Michaud et al., 2012) ont été mises à profit. Ces sondes mesurent notamment la turbidité et la conductivité électrique de l'eau à un pas de temps de 15 minutes. Une des applications intéressantes du traitement de ces données consiste à séparer les débits totaux des cours d'eau entre ses composantes d'écoulements rapides et d'écoulement de base. Conceptuellement, la conductivité électrique témoigne de la charge en électrolytes que l'eau accumule au travers son passage dans le sol. Ainsi, l'eau qui s'infiltré lentement dans le sol se charge d'ions et possède une conductivité électrique plus élevée que le ruissellement de surface. Suivant une approche de bilan de masse, la conductivité électrique de l'eau est dès lors utilisée pour séparer les hydrogrammes. Ces séparations de débits en contributions rapides (ruissellement de surface et écoulement préférentiel au drain) et débit de base du cours d'eau ont été mises à profit dans le calage des composants hydrologiques du modèle.

6.4.4 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 été supportés au Québec, les valeurs des paramètres de calage initiaux retenues dans le présent exercice ont été tirées d'études antécédentes réalisées en Montérégie (Michaud et al., 2006, 2008b; Poon, 2012). Certains paramètres liés aux cycles de croissance des plantes ont toutefois été ajustés en fonction des observations historiques régionales, lesquels ont une influence sur l'évapotranspiration. De la même façon, certains paramètres déterminants de l'hydrologie hivernale ont été adaptés aux importantes contributions de la fonte de neige aux débits des cours d'eau dans la zone d'étude.

6.4.4.1 Ajustement du modèle hydrologique aux observations 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 détermination (R^2) témoigne quant à lui de la corrélation entre les valeurs mesurées et prédites. Les valeurs de R^2 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 estimées très bonnes (Moriasi et al., 2007).

Dix stations hydrométriques ont été utilisées afin de comparer les débits journaliers et mensuels simulés aux débits mesurés pour la période de calage (tableau 6.4). 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 2012. La période de calage s'étend donc sur douze ans pour la plupart des stations, à l'exception du Bras D'Henri (2006-2012).

Dans l'ensemble, la comparaison des débits simulés aux mesures prises en cours d'eau témoignent d'un très bon ajustement. Le tableau 6.8 rapportent les indicateurs d'ajustement du modèle hydrologique sur une base mensuelle pour les dix stations hydrométriques mises à contribution dans le calage du modèle hydrologique pour la période comprise entre 2001 et 2012. Les biais témoignent d'écart entre les débits mensuels simulés et observés compris entre -11% et +9%, ce qui rencontrent les critères d'un très bon ajustement au plan du bilan hydrique global des sous-bassins à l'étude. Au niveau des coefficients Nash-Sutcliffe et R^2 mensuels, la performance du modèle est aussi estimée très bonne, avec des indices NS compris entre 0,73 et 0,83 et des coefficients R^2 compris entre 0,73 et 0,83. Cet ajustement témoigne de l'habileté du modèle à bien reproduire la variabilité temporelle des réponses hydrologiques des sous-bassins aux précipitations liquides et à la fonte des neiges. Les débits totaux pour la période de simulations sont montrés à la figure 6.13, alors que les débits journaliers simulés et observés pour la station de la rivière Chaudière à Saint-Georges (sous-bassin no.56) sont reproduits en figure 6.14 pour la période 2009-2012. Dans l'ensemble, les débits simulés reproduisent bien les débits de pointe, les récessions de même que les débits de base de la rivière. Les résultats témoignent d'une bonne représentation de l'hydrologie hivernale, dans une région où la fonte du couvert nival contribue de façon important au bilan hydrique annuel.

Tableau 6.8 : Indicateurs d'ajustement du modèle hydrologique aux 10 stations hydrométriques mises à contribution dans le calage du modèle hydrologique pour la période comprise entre 2001 et 2012

Rivière	Numéro sous-bassins	Station de mesure mm / an	Simulée avec SWAT mm / an	Différences mesurés mm / an	Dev % du total	Coefficient	
						R^2 mensuel	Nash-Sutclif mensuel
Boyer	12	753	751	-2	0%	0.91	0.82
Boyer sud	20	702	732	29	4%	0.91	0.79
Fourchette aval	29	759	761	3	0%	0.90	0.81
Fourchette amont	31	703	689	-14	-2%	0.86	0.73
Bras d'Henri	40	684	692	8	1%	0.87	0.76
Etchemin	24	770	769	-1	0%	0.91	0.74
Famine	52	726	643	-83	-11%	0.91	0.80
Beaurivage	27	716	714	-2	0%	0.88	0.78
Chaudière à St-Georges	56	660	603	-57	-9%	0.91	0.83
Chaudière à St-Lambert	32	650	611	-38	-6%	0.91	0.83

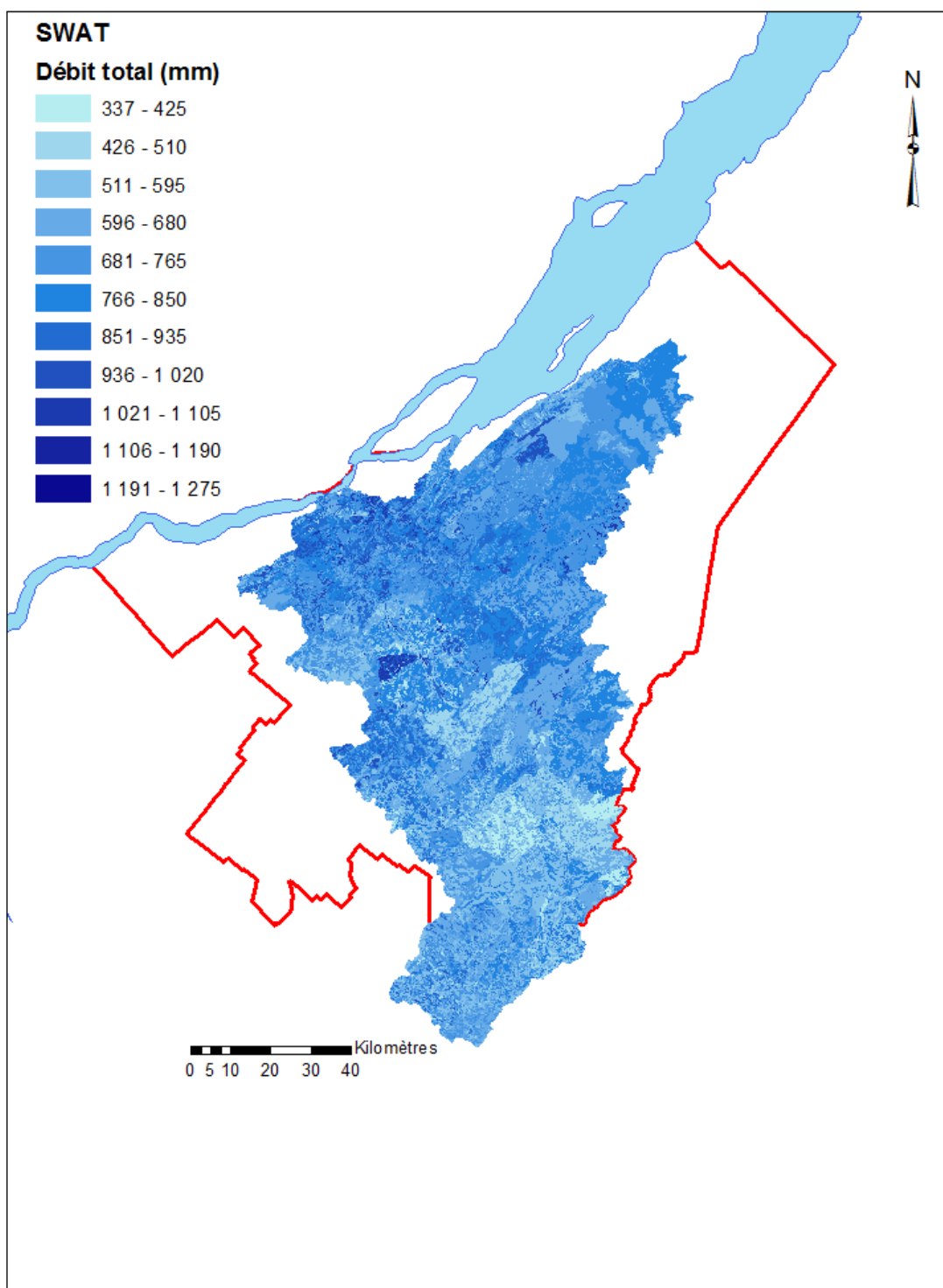


Figure 6.13 : Hauteurs d'eau annuelles moyennes simulées pour la période 2001-2012 pour l'ensemble de la région d'étude.

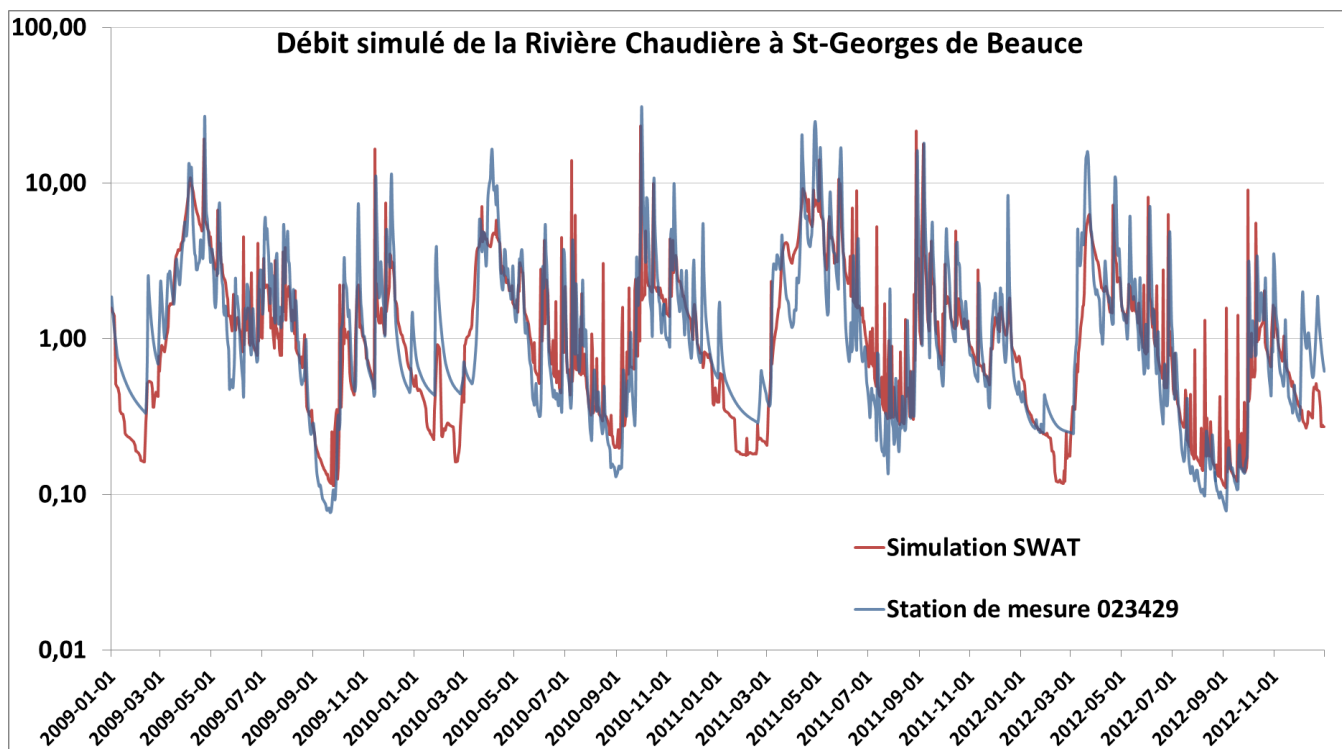


Figure 6.14 : Débits journaliers simulés et observés pour la station du sous-bassin no. 56 (Riv. Chaudière à Saint-Georges) pour la période 2009-2012

6.4.4.2 Bilan hydrique

Le tableau 6.9 présente la répartition du bilan hydrique annuel moyen simulé pour la période d'étude 2001-2012. Considérant la moyenne de 1190 mm de précipitations totales pour cette période sur l'ensemble des bassins versants à l'étude, environ la moitié est estimée perdue en évapotranspiration (531 mm). La hauteur d'eau annuelle moyenne exportée en rivière (débit total) est de l'ordre de 630 mm et comprend un ruissellement de surface annuel moyen estimé à 164 mm. Le cumul des contributions du ruissellement de surface, du drainage souterrain et de l'écoulement latéral (conceptuellement associé dans SWAT aux transferts superficiels dans le profil du sol) est de l'ordre de 208 mm par an et témoigne des écoulements rapides vers le cours d'eau. L'écoulement de base, associé à la résurgence de l'aquifère peu profond (non confiné) au cours d'eau est estimée à 422 mm par an en moyenne. Finalement, la recharge moyenne annuelle de l'aquifère profond, ou confiné, est estimée à 27 mm par an.

Dans l'ensemble, cette répartition des composantes du bilan hydrique est représentative des conditions agro-climatiques et hydrologiques locales. Les suivis hydrométriques des micro-bassins Fourchette Amont (no.31) et Aval (no.29), qui ont épaulé le calage des composantes du bilan hydrique dans le cadre du présent exercice de modélisation, permettent d'apprécier la performance de SWAT-Qc2 à séparer de façon satisfaisante les écoulements de base et rapides. Ces deux petits ruisseaux (1,9 et 2,5 km²) tributaires du ruisseau Fourchette ont profité d'un suivi hydrométrique dans le cadre d'une action concertée sur la qualité de l'eau (Michaud et col. 2009 ; 2012). Le ruisseau Fourchette est le principal tributaire de la rivière Le Bras, qui se jette dans la rivière Etchemin à la hauteur de Saint-Henri-de-Lévis (figure 6.15). Principalement à vocation agricole (60 % de la superficie totale), la pression environnementale des activités d'élevage y est relativement élevée, alors que la densité animale est de l'ordre de 2,1 unités animales/hectare.

La comparaison des séparations de débits observés et simulés aux exutoires des micro-bassins exprimée au tableau 6.10 témoigne d'un ajustement satisfaisant du modèle hydrologique à l'égard de la séparation des écoulements de base et rapides aux exutoires des ruisseaux. La simulation reflète l'activité hydrologique plus importante du micro-bassin aval, dont le débit total annuel moyen simulé est estimé à 773 mm contre 707 en amont. Cet écart dans les débits simulés est particulièrement redevable aux prédictions d'écoulements rapides contrastés entre les bassins, respectivement estimés à 355 et 214 mm pour les micro-bassins aval et amont. Les différences dans les propriétés et l'aménagement des sols (drainage) expliquent en partie ces différences dans les réponses hydrologiques. Rappelons par ailleurs que les simulations ne tiennent pas compte de la variabilité inter-annuelle dans l'occupation des cultures, alors que le même patron spatial dans l'occupation du sol a été retenu pour l'ensemble de la période 2001-2012.

Tableau 6.9 : Bilans hydriques annuels moyens simulés pour la région d'étude entre 2001 et 2012

Année	Précipitations totales (mm)	Évapo- transpiration (mm)	Débit total (mm)	Ruissellement de surface (mm)	Écoulement latéral (mm)	Écoulement au drain ⁽¹⁾ (mm)	Recharge de l'aquifère peu profond ⁽²⁾ (mm)	Recharge de l'aquifère profond (mm)
2001	898	518	474	89	13	24	347	22
2002	1063	516	472	128	13	20	311	20
2003	1263	524	590	152	16	28	394	26
2004	1127	545	634	172	17	27	418	28
2005	1291	522	713	213	18	30	453	29
2006	1250	566	713	172	20	32	489	32
2007	1352	535	657	162	17	27	451	28
2008	1383	539	840	194	22	36	589	36
2009	1194	505	703	173	19	30	481	31
2010	1104	540	526	150	16	20	341	21
2011	1312	552	760	218	20	31	490	31
2012	1049	508	476	141	14	20	302	21
Minimum	898	505	472	89	13	20	302	20
Maximum	1383	566	840	218	22	36	589	36
Moyenne	1190	531	630	164	17	27	422	27
Écart-type	145	19	123	36	3	5	86	5
Pourcentage du débit total				26%	3%	4%	67%	4%

(1) Exprime la contribution de l'eau de drainage souterrain des champs rapporté à l'ensemble du bassin versant.

(2) La recharge de l'aquifère peu profond (non confiné) ressurgit au cours d'eau.

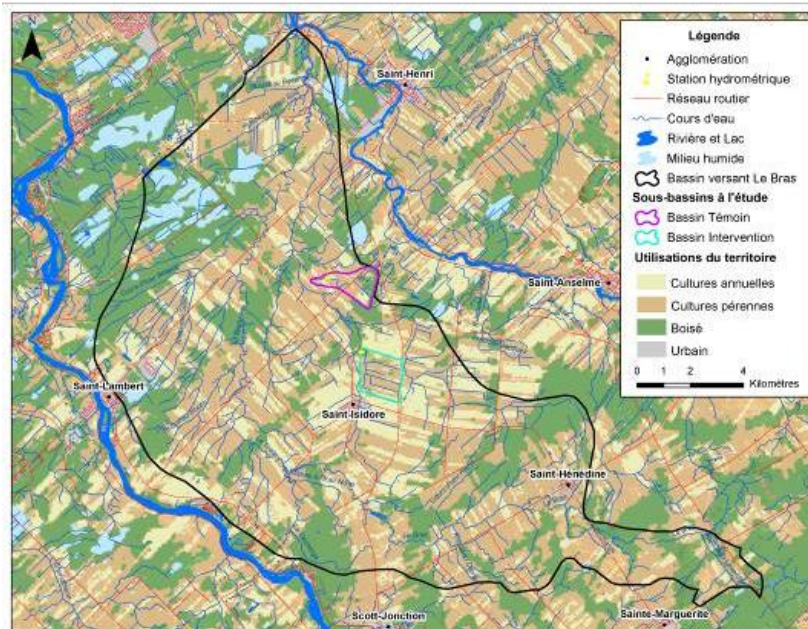


Figure 6.15 : Localisation des micro-bassins Fourchette Amont (no.31) et Fourchette Aval (no.29) dans le bassin de la Rivière LeBras, tributaire de de la rivière Etchemin (Michaud et al., 2009)

Tableau 6.10 : Comparaison des séparations des débits observés et simulés aux exutoires des micro-bassins Fourchette Amont (no.31) et Aval (no.29)

Fourchette amont

Année	Débit total		Écoulement rapide		Débit de base	
	Mesure IRDA (mm)	Simulé SWAT (mm)	Mesure IRDA (mm)	Simulé SWAT (mm)	Mesure IRDA (mm)	Simulé SWAT (mm)
2007	674	608	257	173	418	435
2008	913	857	433	287	481	570
2009	661	690	189	217	472	473
2010	562	521	174	171	389	350
2011	864	798	371	260	493	538
2012	564	533	240	177	324	356
Moyenne	707	668	277	214	430	454
Écart-type	150	139	103	50	65	91

Fourchette aval

Année	Débit total		Écoulement rapide		Débit de base	
	Mesure IRDA (mm)	Simulé SWAT (mm)	Mesure IRDA (mm)	Simulé SWAT (mm)	Mesure IRDA (mm)	Simulé SWAT (mm)
2007	868	760	377	347	491	413
2008	992	1073	469	538	522	535
2009	678	777	234	356	443	421
2010	596	542	214	224	382	318
2011	883	893	370	381	513	512
2012	622	630	245	283	377	348
Moyenne	773	779	318	355	455	424
Écart-type	163	189	102	106	64	86

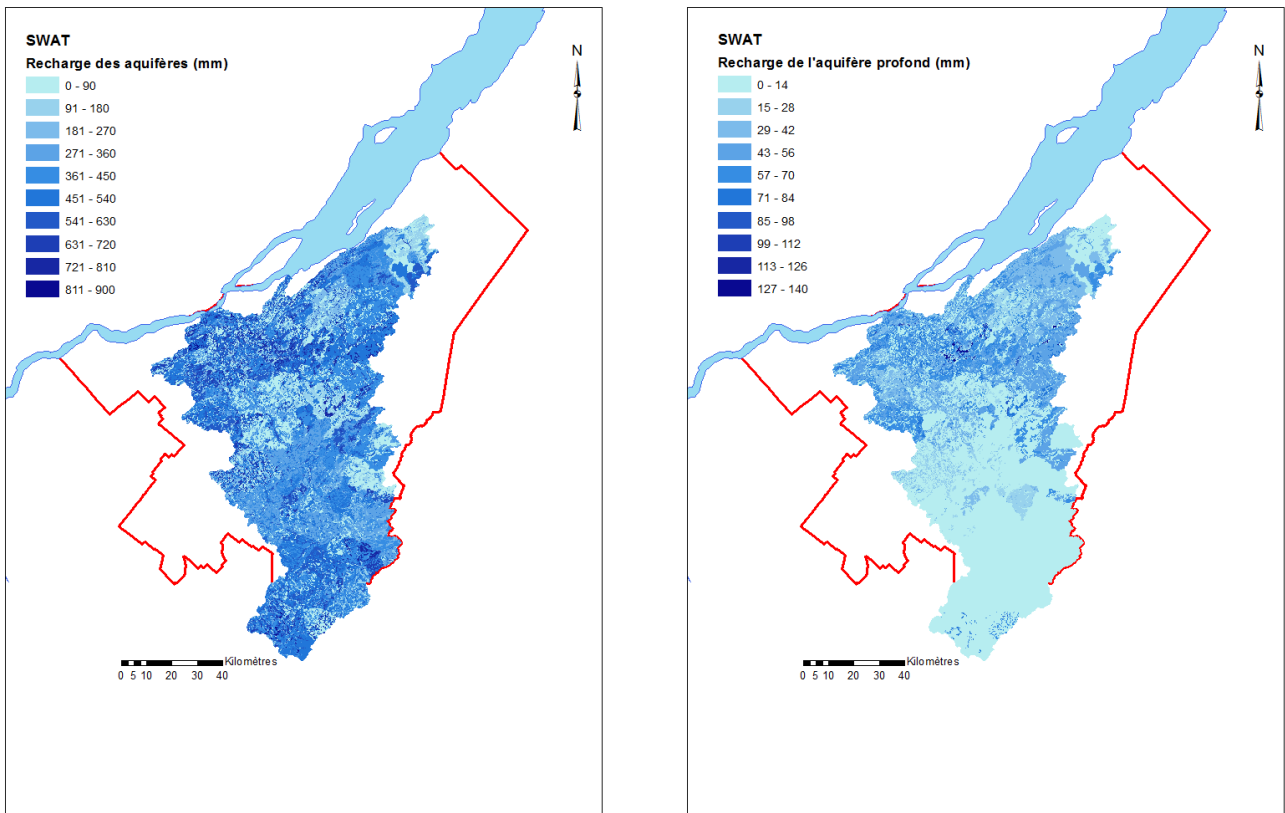


Figure 6.16 : Recharge totale des aquifères et recharge de l'aquifère profond découlant de la modélisation hydrologique de surface appliquée à l'ensemble de la région d'étude

En ce qui a trait aux simulations des écoulements souterrains, les résultats de la modélisation hydrologique témoignent d'un transfert très important de l'aquifère peu profond vers le cours d'eau, de l'ordre de 422 mm par an en moyenne pour la région à l'étude (figure 6.16). Suivant l'approche conceptuelle du modèle hydrologique, cet écoulement définit à moyen terme le débit de base du ruisseau, durant les périodes où les écoulements rapides ne sont pas actifs. Le modèle hydrologique attribue ainsi 67% des hauteurs d'eau exportées au cours d'eau à la résurgence des aquifères peu profond (non confinés). Les transferts vers l'aquifère profond sont pour leur part estimés à 27 mm d'hauteur d'eau annuelle moyenne pour l'ensemble de la région à l'étude. Cette estimation est conservatrice. Rappelons que dans le cadre du modèle SWAT, la recharge de l'aquifère profond est estimée de façon empirique, et découle d'une simulation optimale des débits des cours d'eau. A cette fin, le coefficient de percolation utilisé dans le modèle hydrologique a été optimisé afin de reproduire les débits de base observés aux dix stations hydrométriques mises à profit dans le calage du modèle.

Si la séparation des débits des cours d'eau permet de valider, conceptuellement, l'apport en eau en provenance des aquifères non confinés, elle ne permet cependant pas de valider la hauteur d'eau transférée vers l'aquifère profond. La prise en considération des propriétés des dépôts meubles et des formations géologiques de la zone d'étude offre la possibilité de moduler le coefficient de percolation du modèle hydrologique, à l'échelle par exemple des 68 sous-bassins considérés pour la zone d'étude. Une telle démarche constitue une suite logique à la présente étude, mettant à profit un couplage des résultats des volets d'étude hydrologique et hydrogéologique.

6.4.4.3 Comparaison des estimations de la recharge

La recharge des nappes, distribuée spatialement sur l'ensemble de la région d'étude, a été estimée à l'aide du modèle d'infiltration HELP (section 4.3). La recharge est aussi un des résultats donnés par SWAT, bien que cela ne soit pas l'objet central de ce simulateur numérique hydrologique. Les résultats de SWAT, particulièrement sa capacité à reproduire les débits des cours d'eau (figure 6.14), ont été validés dans la section précédente. Avant de comparer les recharges obtenues de HELP et de SWAT, la présente section va présenter la validation des résultats obtenus de HELP.

La figure 6.17 montre la localisation des stations de jaugeage du CEHQ qui ont été utilisées pour faire la validation des résultats obtenus de HELP par rapport au débit total ainsi que le débit de base obtenus de la séparation des hydrogrammes de cours d'eau réalisée par le CEHQ. Ces sous-bassins sont dans des contextes différents de la région et permettent donc la vérification de la performance de HELP pour l'ensemble de la région. Le tableau 6.11 et la figure 6.18 résument les résultats de cette comparaison.

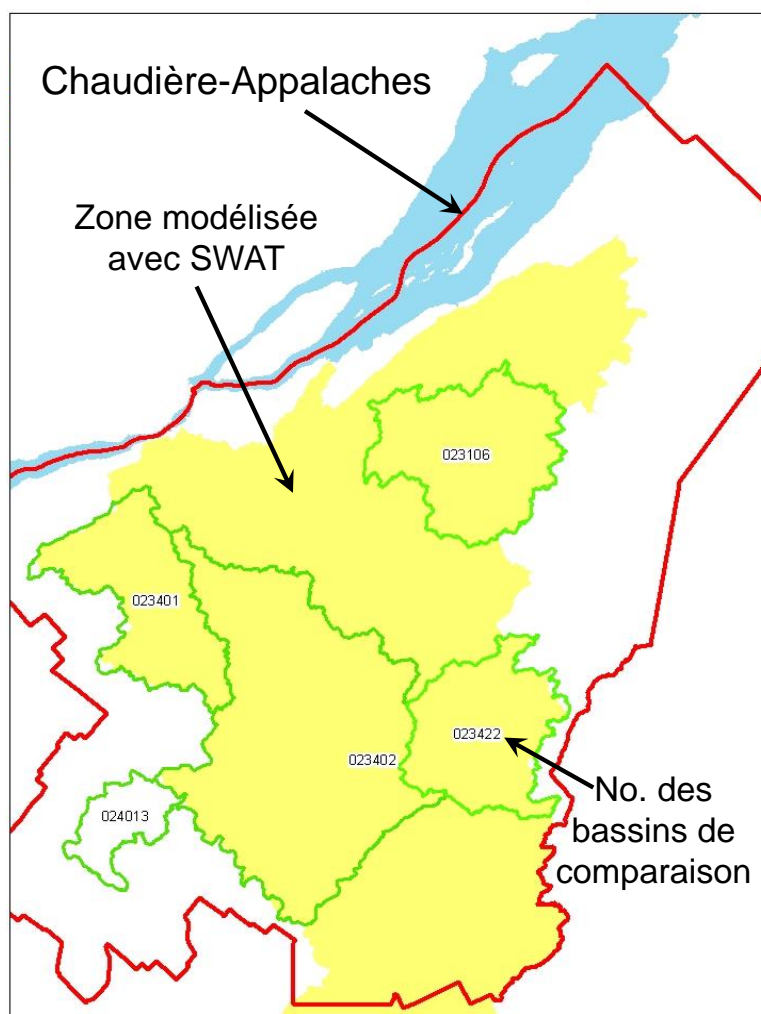


Figure 6.17 : Cartes des sous-bassins versants correspondant aux stations de jaugeage utilisées pour comparer les résultats de HELP avec ceux du CEHQ

Tableau 6.11 : Comparaison des débits totaux et débits de base (ou recharge) de HELP et du CEHQ

Bassin	CEHQ		HELP		Comparaison	
	Débit de base	Débit total	Recharge	Débit total	Recharge	Débit total
	(mm/an)	(mm/an)	(mm/an)	(mm/an)	(%)	(%)
23106	223	756	187	641	17%	16%
23401	186	626	118	660	45%	-5%
24013	274	725	190	697	36%	4%
23422	67	672	189	585	-96%	14%
23402 - 23429	221	541	182	578	20%	-7%
Moyenne	194	664	173	632	11%	5%

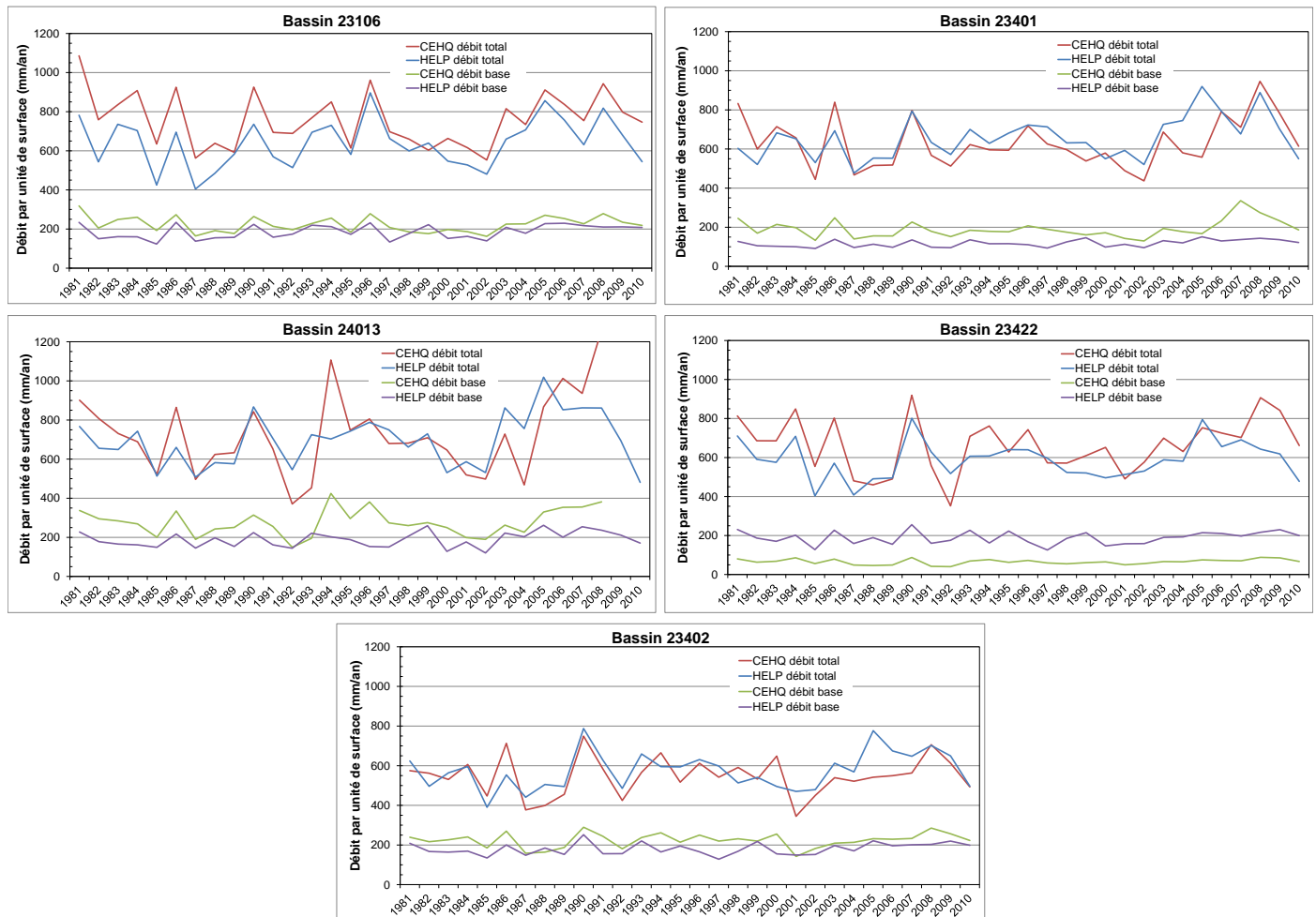


Figure 6.18 : Comparaison des débits totaux et des débits de base (ou recharge) obtenus de HELP et du CEHQ pour les stations de jaugeage de comparaison (localisation à la figure 6.17)

La comparaison des débits totaux et des débits de base permet de vérifier la représentativité de l'estimation par HELP de différentes composantes du bilan hydrologique. Le débit total permet d'évaluer si l'évapotranspiration a été correctement estimée par HELP. En effet, sur la base de plusieurs années les variations de l'emmagasinement ne sont plus importantes et le débit total moyen correspond à toute l'eau des précipitations qui n'a pas été retournée à l'atmosphère par évapotranspiration. Encore une fois sur la base de plusieurs années, le débit de base moyen correspond à la recharge des nappes puisque le débit de base est dérivé en éliminant l'effet du ruissellement sur le débit total des cours d'eau, ne laissant que l'effet de l'apport d'eau souterraine au cours d'eau.

Le tableau 6.11 montre que, sur une période de 30 ans, le débit total moyen obtenu de HELP correspond bien au débit total mesuré aux stations de jaugeage. Ce résultat est d'autant plus satisfaisant considérant la grande variabilité annuelle des débits totaux, tel que le montre la figure 6.18. La figure 6.18 montre aussi que les débits totaux sont bien reproduits pour toutes les stations de jaugeage localisées dans tous les contextes de la région d'étude. Le tableau 6.11 compare aussi les débits de base aux estimations de la recharge obtenues de HELP. Globalement, la recharge estimée par HELP est du même ordre que le débit de base, mais il y a une grande variabilité dans la différence des valeurs obtenues de ces deux méthodes. Contrairement au débit total, il faut souligner que le débit de base dérivé de la séparation des hydrogrammes comporte aussi une marge d'erreur significative et il ne s'agit pas dans ce cas d'une référence permettant de juger de façon absolue de la validité de la recharge obtenue de HELP. Au niveau des variations annuelles (figure 6.18), les débits de base montrent un peu plus de variabilité que la recharge estimée par HELP, mais dans les deux cas les valeurs ne sont pas très variables. Si ces estimations sont justes, cela implique que la recharge des nappes demeure assez constante, malgré les variations climatiques importantes qui peuvent survenir d'année en année, et qui sont bien reflétées par la variabilité des débits totaux (figure 6.18).

Les bilans hydrologiques obtenus de HELP et de SWAT sont présentés aux tableaux 4.2 et 6.9, respectivement. Il y a des différences apparentes importantes entre les composantes du bilan, mais ces différences reflètent des fonctionnements différents de ces simulateurs par rapport à des objectifs différents. Les deux simulateurs se distinguent particulièrement au niveau de la partition de l'eau en sous-surface, comme le montre une comparaison des figures 4.7 (HELP) et 6.10 (SWAT). Le tableau 6.12 fait la comparaison des composantes des bilans hydrologiques dérivées de HELP et de SWAT pour la région modélisée par SWAT (voir figure 6.17). Il faut souligner que la période représentée par HELP est de 30 ans alors que celle modélisée par SWAT a été de 12 ans. Le tableau 6.12 a regroupé les composantes du bilan des deux simulateurs et présente des calculs complémentaires permettant de mieux comparer les résultats des deux simulateurs.

Tableau 6.12 : Comparaison des composantes du bilan hydrologique obtenues de HELP et de SWAT pour la région modélisée par SWAT (mais pour des périodes de temps différentes)

HELP (mm/an)						
Precipitation	ET	Recharge	Lat_Drainage	Infiltration	Ruisellement	Débit total
1147	545	167	134	300	310	610
1204	475		25	398	329	701
Precipitation	ET	DA_RCHG		GW_RCHG	Ruisellement	WYLD
SWAT (mm/an)						

Les composantes hydrologiques de la précipitation, de l'évapotranspiration et du débit total ont la même signification physique pour HELP et SWAT et peuvent donc être directement comparées. D'abord, puisque les périodes de simulations sont différentes, il y a une différence entre la précipitation, qui explique en partie pourquoi le débit total est plus élevé pour SWAT. En fait, la comparaison des débits uniquement

pour les bassins jaugés montrés à la figure 6.17 donnait des débits totaux plus similaires (HELP : 632 mm; SWAT : 667 mm; CEHQ : 664 mm). Il faut rappeler que SWAT reproduit très bien le débit total des cours d'eau (figure 6.14), tout comme HELP (tableau 6.11, figure 6.18). On peut noter une différence assez significative entre l'évapotranspiration estimée par les deux simulateurs. Même si le tableau 6.12 ne montre qu'une valeur pour le ruissellement pour SWAT (329 mm/an), ce chiffre représente en fait la somme de trois composantes produites par SWAT : le ruissellement de surface de 267 mm/an (SURQ_GEN), l'écoulement latéral de 22 mm/an (LATQ) et l'écoulement aux drains de 40 mm/an (TILEQ). Toutefois, la somme de ces composantes donne une valeur très similaire à ce qui est estimé par HELP (310 mm/an). La plus grande distinction entre HELP et SWAT est le traitement de la partition de l'eau en sous-surface. La recharge estimée par HELP correspond à l'eau qui s'infiltré jusqu'à l'aquifère rocheux régional (167 mm/an). Une grande partie de l'infiltration de l'eau en surface (300 mm/an) subit un ruissellement de sous-surface (Lat_Drainage, 134 mm/an) à l'interface entre des couches perméables et des couches peu perméables (figure 4.7). Pour SWAT, l'eau qui dépasse la zone racinaire du sol devient de la recharge de la nappe (GW_RCHG) et il n'y a pas de distinction entre les aquifères superficiels et profonds (figure 6.10), dans le sens hydrogéologique du terme. SWAT calcule en fait aussi une recharge à l'aquifère profond (DA_RCHG), mais qui correspond dans ce cas à de l'eau qui circule en profondeur et ne retourne pas au cours d'eau à l'intérieur de l'unité hydrologique. Si on compare la somme de la recharge et du drainage latéral obtenu de HELP (300 mm/an) à la recharge estimée de SWAT (398 mm/an), on constate que SWAT estime une plus grande proportion de recharge. Considérant la distinction dans le fonctionnement des simulateurs, ces chiffres peuvent tout de même être considérés être d'un ordre de grandeur compatible. De plus, le temps ne nous a pas permis de faire une optimisation de la partition de l'eau en sous-surface entre les composantes de SWAT afin d'approcher un peu plus de l'estimation obtenue de HELP. Dans le cadre du projet en Montérégie Est, un long processus itératif avait permis de rapprocher les estimations de recharge de ces deux simulateurs, en plus de rendre plus compatibles le sens des paramètres de ces simulateurs reliés à l'écoulement en sous-surface (Carrier et al., 2013a).

7 CONCLUSIONS

Le *Projet d'acquisition de connaissances sur l'eau souterraine en Chaudière-Appalaches* a été réalisé conjointement, d'avril 2012 à mars 2015, par le Centre Eau Terre Environnement de l'INRS (INRS-ETE), par l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et par le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA). La région d'étude couvre la Chaudière-Appalaches (14 600 km²; terre ferme), excluant toutefois Lévis qui a été couvert par le projet PACES de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). Huit (8) des neuf (9) municipalités régionales de comté (MRC) et la Conférence régionale des élus (CRÉ) de la Chaudière-Appalaches sont partenaires du projet. Ce territoire couvre, en tout ou en partie, les territoires de six (6) OBV de la région qui sont aussi partenaires du projet.

La compilation des données existantes a permis d'extraire de l'information sur près de 30 000 puits à partir du Système d'information hydrogéologie (SIH) du MDDELCC. Des données ont aussi été extraites de plus de 350 rapports obtenus des municipalités et des agences gouvernementales. Les données existantes ont été complétées par des levés de terrain ciblés. Ces travaux ont utilisé une combinaison de méthodes conventionnelles et novatrices. L'utilisation de la foreuse de l'INRS a permis de faire 11 sondages au piézocône et 24 sondages par rotoperçusion ainsi que l'installation de 19 puits d'observation de petit diamètre (2.5 cm) dans les dépôts meubles. De plus, une foreuse conventionnelle a été utilisée pour installer neuf (9) puits de 150 mm (6 po) de diamètre ouverts au roc qui complètent les 20 puits déjà existants du réseau de suivi du MDDELCC dans la région d'étude. Des essais hydrauliques ont été réalisés dans les nouveaux puits d'observation. Une campagne d'échantillonnage d'eau souterraine a permis de récolter 125 échantillons provenant principalement de puits résidentiels. Ces échantillons ont été analysés principalement pour les ions majeurs et mineurs, ainsi que les gaz dissous (méthane) et plusieurs isotopes (²H, ¹⁸O, ³He, ¹⁴C) pour un sous-groupe représentatif. Plus de 260 autres analyses chimiques ont été obtenues d'études antérieures ou en voie de réalisation dans la région d'étude. Plus de 4 km de levés sismiques haute résolution ont été réalisés pour mieux définir la profondeur des vallées enfouies représentant les anciennes positions des rivières Chaudière et Etchemin juste au sud de Lévis.

La province géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent couvre une étendue restreinte dans la moitié nord-ouest de la MRC de Lotbinière, alors que le reste de la région fait partie des Appalaches, incluant les zones de Humber interne et externe, la zone de Dunnage et la ceinture de Gaspé. Ces zones ont une orientation générale du sud-ouest au nord-est et se succèdent à partir du fleuve Saint-Laurent, au nord-ouest, jusqu'à la frontière des États-Unis, au sud-est. Le roc fracturé représente un aquifère régional continu, alors que des aquifères granulaires d'étendue restreinte se retrouvent par endroits dans les dépôts meubles. Sur la base de la physiographie et de la nature des dépôts meubles, trois contextes hydrogéologiques peuvent être définis dans la zone d'étude : 1) basses-terres du St-Laurent, 2) vallées appalachiennes, et 3) hautes-terres appalachiennes. Les basses-terres du St-Laurent se retrouvent sur une bande ayant 10 à 30 km de largeur en bordure du fleuve St-Laurent. On y retrouve une topographie de bas plateau qui a été recouvert par la Mer de Champlain jusqu'à une élévation de 180 m par rapport au niveau moyen de la mer (NMM). Des sédiments à grains fins sont présents sous 100 m NMM, alors qu'une couverture sableuse se retrouve jusqu'à la limite marine. Au sud des basses-terres, au-delà de la limite marine, on retrouve une topographie de collines, montagnes et vallées. Les hautes-terres appalachiennes ne sont généralement recouvertes que d'une mince couche de till relativement perméable, ce qui en fait une vaste zone de recharge préférentielle de l'aquifère régional. Les vallées appalachiennes peuvent être comblées d'épaisseurs importantes de sédiments (plus de 15 m). Ces sédiments sont souvent fins et peuvent recouvrir de la roche altérée, ce qui limite le potentiel aquifère des dépôts meubles dans les vallées. Toutefois, on retrouve par endroits des sédiments fluvioglaciers qui peuvent avoir un potentiel aquifère local. La conductivité hydraulique décroît avec la profondeur et les puits montrent des valeurs très variables, étant généralement de l'ordre de 10⁻⁸ à 10⁻⁵ m/s. Globalement, la recharge de l'aquifère rocheux est de 166 mm/an, avec des valeurs distinctes pour les hautes-terres appalachiennes (186 mm/an), les

vallées appalachiennes (192 mm/an) et les basses-terres du St-Laurent (85 mm/an). La vulnérabilité suit généralement la même tendance, mais elle n'atteint généralement pas un niveau absolu élevé.

L'agriculture occupe 27% du territoire et se retrouve surtout dans les basses-terres du St-Laurent et les vallées appalachiennes, alors que 65% du territoire est forestier et le reste est soit urbain, des milieux humides ou des plans d'eau. L'eau souterraine de cette région suscite de plus en plus d'intérêt, non seulement à cause de la nouvelle réglementation sur les prélèvements d'eau, mais aussi à cause de la mauvaise qualité de l'eau de surface. En date du rapport, l'usage total annuel de l'eau dans la région d'étude a été évalué à 109 million de m³, dont 42% provenait de l'eau souterraine. Globalement, les usages résidentiel (38%), agricole (32%) et industriel-commercial-institutionnel (30%) sont équilibrés, mais il y a des variations importantes dans ces proportions entre les MRC. En tout, 36% de la population totale de la région d'étude, qui s'élève à 278 180 personnes (sans Lévis), s'alimente en eau à partir d'un puits privé, alors que le reste de la population est desservi par un réseau d'aqueduc municipal ou privé (20 personnes et plus). 60% des réseaux municipaux sont approvisionnés par de l'eau souterraine grâce à plus de 300 puits d'approvisionnement en eau. Bien que l'eau souterraine soit généralement de bonne qualité, on y retrouve localement certains éléments naturels à des concentrations excédant les normes de potabilité de l'eau (F, Ba, As). Sept (7) types d'eau ont été définis sur la base des proportions des ions majeurs. Certains de ces types d'eau représentent l'évolution géochimique naturelle de l'eau souterraine. Toutefois, d'autres types d'eau semblent indiquer une dégradation anthropique de la qualité de l'eau souterraine qui pourrait être reliée à différentes activités, telles que l'agriculture, le sel déglacant ou les eaux usées. Bien que les concentrations associées à ces types d'eau n'excèdent généralement pas les normes de potabilité, des mesures devraient être envisagées pour éviter l'amplification de cette dégradation. La présence de fortes concentrations en nitrite-nitrates est généralement associée à l'agriculture mais, malgré l'importance de l'agriculture en Chaudière-Appalaches, un seul échantillon a présenté des concentrations excédant le critère de potabilité et les concentrations atteignent rarement des niveaux importants. Dans la partie nord-ouest de la région à l'intérieur de la zone prospective pour le gaz de shale, 44 (59%) des 74 échantillons d'eau analysés ont montré des concentrations en méthane quantifiables. Onze (11) échantillons (15%) ont présenté des concentrations excédant le seuil d'alerte de 7 mg/L. Le méthane peut causer des problèmes lorsqu'il s'accumule dans la tuyauterie mais il n'a pas d'incidence sur la santé. La signature isotopique et la composition du gaz naturel détecté indiquent qu'il est biogénique de façon prédominante, c'est-à-dire qu'il a été formé en place à faible profondeur et ne représente pas l'effet d'une migration de gaz à partir d'une grande profondeur.

En plus des livrables prévus par le PACES, des travaux spécifiques ont été réalisés par des étudiants de 2^e et 3^e cycles sur des thèmes d'intérêt pour les ressources en eau souterraine de la région. Les résultats initiaux de ces travaux sont documentés dans le présent rapport. Ces travaux comprennent la cartographie des sédiments superficiels et la définition des événements géologiques au Quaternaire, l'étude des milieux humides présents dans la zone du Chêne et de leur interaction avec les eaux souterraines, et la modélisation de l'écoulement régional et de l'évolution géochimique de l'eau souterraine. L'IRDA a aussi fait la modélisation hydrologique de l'écoulement de l'eau de surface ainsi que de la recharge des nappes.

Enfin, le projet PACES en Chaudière-Appalaches a fourni les connaissances requises pour assurer la bonne gouvernance de l'eau souterraine. Une section du rapport met en relation les préoccupations par rapport aux eaux souterraines exprimées par les acteurs de la région et l'éclairage qui peut être apporté sur ces préoccupations par les connaissances acquises dans le cadre du présent projet. 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 en eau souterraine. Ces efforts devront être soutenus par les organismes gouvernementaux et les chercheurs intéressés à la ressource.

8 RÉFÉRENCES

- Adamus, P. (2013a) Manual for Wetland Ecosystem Services Protocol for Southeast Alaska (WESPAK-SE). Prepared for Southeast Alaska Land Trust and US Fish & Wildlife Service, Juneau, AK. 146 p.
- Adamus, P. (2013b) Wetland Ecosystem Services Protocol for Southern Alberta (WESPAB). Prepared for Alberta Environment and Sustainable Resource Development, Government of Alberta, Edmonton, AB. 34 p.
- Adamus, P. (2013c) Wetland Ecosystem Services Protocol (WESP) workshop for Nova Scotia Environment, August 13-15, Halifax, Nova Scotia, 65 p.
- Adamus, P. (2011) Manual for the Wetland Ecosystem Services Protocol for the United States (WESPUS), Adamus Resource Assessment Inc, 57 p.
- 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.
- Appelo, C.A.J. et Postma, D. (2005) Geochemistry, groundwater and pollution. CRC Press, Boca Raton (FL), USA, 649 pp.
- Armandine Les Landes, A., Aquilina, L., Davy, P., Vergnaud, V. et Le Carlier C. (2014) *Time scales of regional circulation of saline fluids in continental crystalline rock aquifers (Armorican massif, Western France)*. *Hydrology and Earth System Science Discussions*, 18, 1-37, 2014.
- Arnold, J.G. et Fohrer, N. (2005) SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19, 563-572.
- Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Lefebvre, R. et Mallet, X. (2014b) Rapport sur des zones cibles potentielles pour l'aménagement de puits de surveillance supplémentaires en Chaudière-Appalaches. Rapport INRS soumis au MDDELCC dans le cadre du projet PACES Chaudière-Appalaches, 15 pp. et annexes.
- Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Vigneault, H., Malet, X., Therrien, A., Berthot, L., Légaré-Couture, G., Beaudin, I., Michaud, A., Drouin, A., Cloutier, M.-H. et Parent, M. (2014a) Rapport d'étape de la phase II (version finale) – Projet de connaissance sur les eaux souterraines en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, l'IRDA et l'OBV Chaudière-Appalaches, dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines Rapport INRS R-1509, version finale soumise en avril 2014 au MDDEFP et aux partenaires du projet, 33 p. et 5 annexes.
- Ballard, J.-M., Malet, X., Beaudry, C., Lefebvre, R., Carrier, M.-A. et Vigneault, H. (2013) Premier rapport d'étape – Projet de connaissance sur les eaux souterraines en Chaudière-Appalaches. Rapport INRS R-1402, réalisé par INRS-ETE, en collaboration avec l'IRDA et le COBARIC, version préliminaire soumise au MDDEFP le 28 mars 2013, 66 p. et 18 cartes.

- Ballard, J.-M., Lefebvre, R., Fagnan, N., Martel, R., Nastev, M., Carrier, C. et Boutin, A. (2004) Impact of septic systems on groundwater quality in a fractured rock aquifer, Lac-Beauport, Quebec. In D. Demers, D. Leahy, R. Lefebvre, S. Leroueil et R. Martel, ed., Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, ISBN 0-920505-29-5, Session 8B, 15-22.
- Beaudry, C. (2013) Hydrogéochimie de l'aquifère rocheux régionale en Chaudière-Appalaches, Québec. Mémoire de maîtrise, INRS - Centre Eau terre Environnement, Québec, 195 pp.
- Bélanger, C., Gloaguen, E., Giroux, B. et Lefebvre, R. (2010) GPR, ERT and CPT data integration for high resolution aquifer modeling. *GPR 2010*, XIII International Conference on Ground Penetrating Radar, June 21-25, 2010, Lecce, Italy, 6 pp. IEEE Catalog Number CFP10538, ISBN: 978-1-4244-4605-6.
- Benoit, N., Nastev, M., Blanchette, D. et Molson, J. (2014) Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Chaudière River watershed aquifers, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 24(1), 32-48.
- Benoit, N., Nastev, M., Blanchette, D. et Roy, N. (2009) Hydrogéochimie du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec. 10th Joint CGS/IAH-CNC Conference, Halifax, 8 p.
- Benoit, N., Forest, G., Roy, N. et Nastev, M. (2008). Développement d'un modèle hydrogéologique conceptuel pour le bassin de la rivière Chaudière, Québec. 9th Joint CGS/IAH-CNC Conference, Edmonton, 8 p.
- Bernard, B.B., Brooks, J.M. et Sackett, W.M. (1978) Light hydrocarbons in recent Texas continental shelf and slope sediments. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 83 (C8), 4053-4061.
- Blouin, M., Martel, R. et Gloaguen, E. (2013) Accounting for aquifer heterogeneity from geological data to management tools. *Groundwater*, 51 (3), 421-431.
- Boucher, P. (2012) Réalisation d'un outil d'identification des milieux humides de la zone du Chêne (Québec) – Rapport de stage. Organisme de Bassins Versants de la zone du Chêne, 52 p.
- Bourgault, M.-A., Larocque, M., Pellerin, S. et Graveline, M.-H. (2015) Milieux humides de la zone du Chêne. Rapport de l'Université du Québec à Montréal soumis à l'INRS-ETE, 31 mars 2015, 20 pp.
- Brisebois, D. (2003) Géologie de la Gaspésie et du Bas-Saint-Laurent. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Québec, Rapport DV 2003-08, 10 p., 26 cartes (échelle variant de 1/20 000 à 1/1 000 000).
- Canards illimités Canada (CIC) (2006) Plan régional de conservation des milieux humides et de leurs terres hautes adjacentes de la région administrative de la Chaudière-Appalaches, 90 p.
- Caron, O. (2012) Synthèse et modèle cartographique 3D des formations quaternaires pour les bassins versants des rivières Chaudière et Saint-François: géochronologie, stratigraphie et paléogéographie wisconsienne du sud du Québec. UQAM, Thèse de doctorat, 389 p.
- Caron, O., Tremblay, T., et Lamothe, M. (2007) 3D hydrostratigraphic modelization using relative calculation method, Chaudière watershed, Québec, unpublished.
- Carrier, A., Benoit, N., Nastev, M., Roy, N., Beaudoin, E., Giguère, P. et Bouffard, P. (2014) Atlas des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Chaudière : secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière. Commission géologique du Canada, Dossier public 7284, 199 p.

- 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. et Lavoie, D. (2013b) Atlas hydrogéologique de la 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-1432, version finale soumise en juin 2013 au MDDEFP et aux partenaires régionaux.
- 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. et Lavoie, D. (2013a) 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, version finale soumise en juin 2013 au MDDEFP et aux partenaires régionaux, 283 p., annexes, incluant 29 cartes et base de données.
- Castonguay, S., Dietrich, J., Shinduke, R. et Laliberté, J.-Y. (2006) Nouveau regard sur l'architecture de la plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches du sud du Québec par le retraitement des profils de sismique réflexion M-2001, M-2002 et M-2003, Commission géologique du Canada, Dossier public no 5328.
- Castonguay, S., Tremblay, A. et Lavoie, D. (2002) Carte de compilation géologique, Québec-Chaudière Les ponts géologique de l'est du Canada Transect 2, Québec. Dossier public 4314, carte à l'échelle 1/125 000.
- Castonguay, S. (2000) Évolution tectonique et géochronologie $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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 Chaudière-Appalaches. Gouvernement du Québec, MDDELCC, 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, MDDELCC, fichiers en format shapefile distribués en 2010.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2010) Guide de référence en fertilisation. Sainte-Foy, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.
- Clark, I.D. et Fritz, P. (1997) Environmental Isotopes in Hydrogeology. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 328 pp.
- 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.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R. et Savard, M. (2008) Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. J. of Hydrology, 353 (3-4), 294-313.

- Cloutier, V. (2004) Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère de roche sédimentaire paléozoïque des Basses-Laurentides, Qc, Canada. INRS-ÉTÉ, Thèse de doctorat, Juin 2004.
- COBARIC et UPA (2008) Atlas des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Chaudière : secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière. CD-ROM COBARIC and UPA 2008. Atlas des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Chaudière : secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière. CD-ROM.
- 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.
- 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, 526-534.
- CRAAQ (2010) Guide de référence en fertilisation. 2^{ième} édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 473 p.
- Croteau, A., Nastev, M. et Lefebvre, R. (2010) Groundwater recharge assessment in the Châteauguay River watershed. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 451-468.
- Daigneault, R.A., Roy, M., Milette, S., Hurtubise, M.A., Leduc, E., Thiery, G., Horth, N. et Dubois-Verret, M. (2014) Cartographie des formations superficielles de la partie sud du projet PACES Chaudière-Appalaches. UQAM, Rapport présenté au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, 26 mai 2014, 51 p.
- Department of the Interior (DOI) (2001) Technical measures for the investigation and mitigation of fugitive methane hazards in areas of coal mining. US Department of the Interior, Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, Pittsburgh.
- Eckhardt, K. et Arnold, J.G. (2001) Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 251(1-2): 103-109.
- FADQ (Financière agricole du Québec) (2010) Banque de données des cultures assurées. Financière agricole du Québec, Lévis, QC.
- Fagnan, N., Bourque, É., Michaud, Y., Lefebvre, R., Boisvert, É., Parent, M. et Martel, R. (1999) Hydrogéologie des complexes deltaïques sur la marge nord de la mer de Champlain. *Hydrogéologie*, no. 4, 9-22.
- Falardeau I., Villeneuve, C. et Cournoyer, L. (2009) Plan de gestion des milieux humides de la MRC de Lotbinière – Rapport méthodologique de la cartographie de base des milieux humides du territoire de la MRC et du bassin versant de la rivière du Chêne, 40 p.
- 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, 18 pp.
- Feth, J.H. (1981) Chloride in natural continental water, a review. USGS Water Supply Paper: 2176.

- Financière agricole du Québec (FADQ) (2011) Base de données des cultures assurées (BDCA). Gouvernement du Québec, Direction des ressources informationnelles (FADQ), fichiers en format shapefile distribués en octobre 2011.
- Foster, S.S.D. et Hirata, R.C.A. (1988) Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data, CEPIs – PAHO / WHO, Lima, 78 pages.
- 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.
- Gagné G., Beaudin I., Drouin A., Veilleux G. et Sylvain J. D. 2013. Classement des séries de sols minérales du Québec selon les groupes hydrologiques. Dans le cadre du projet « Mise à jour des normes et procédures de conception d'ouvrages hydrauliques en milieu rural dans un contexte de changements ». Programme ICAR et Mesure 26 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 (PACC) du gouvernement du Québec en collaboration avec Ressources naturelles Canada. Consortium de recherche Ouranos. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada. 62 p.
- Gaucher, E et al. (1984) Compilation de la géologie du Quaternaire - Région des Appalaches. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, Rapport DV 84-10, 89 cartes à 1:50 000.
- 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 1/250 000.
- 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.
- 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 pp.
- Gorody, A.W. (2012) Factors affecting the variability of stray gas concentration and composition in groundwater. *Environmental Geosciences*, 19(1), 17-31.
- Gouvernement du Québec (2012) Règlement sur la qualité de l'eau potable c.Q-2, r.40. In: Ministère du Développement durable, E., Faune et Parcs, (Ed.).
- Groupe de travail national sur les terres humides (GTNTH) (1997) Le système de classification des terres humides du Canada (SCTHC), 2e édition. Édité par B.G. Warner et C.D.A. Rubec. Centre de recherche sur les terres humides, Université de Waterloo. Waterloo. Ontario. 68 p.
- Hébert, S. (1997) Développement d'un indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau pour les rivières du Québec, Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des écosystèmes aquatiques, envirodoq no EN/970102, 20 p., 4 annexes.
- Hem, J.D. (1985) Study and interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, Third Edition. USGS, Water-supply paper 2254, Alexandria, VA.
- Hoque, M.A. et Burgess, W.G. (2012) ¹⁴C dating of deep groundwater in the Bengal Aquifer System, Bangladesh: Implications for aquifer anisotropy, recharge sources and sustainability. *Journal of Hydrogeology* 444-445 (2012), 209-220.
- Hounslow, A.W. (1995) Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Lewis Publisher, Boca Raton, Florida, USA, 397 pp.

- Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) (2008) Feuilles 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 la statistique, 2011. 12 - La Chaudière-Appalaches ainsi que ses municipalités régionales de comté(MRC) et territoire équivalent (TE). Site Internet consulté en novembre 2011 : http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/profils/region_12/region_12_00.htm
- IRDA (Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.) (2010) Études pédologiques. Documents pédologiques disponibles sur le site internet : <http://www.irda.qc.ca/documents/type/2.html>
- Jackson R.E., Gorody, A.W., Mayer, B., Roy, J.W., Ryan, M.C. et Van Stempvoort, D.R. (2013) Groundwater protection and unconventional gas extraction: the critical need for field-based hydrogeological research. *Ground water* 51(4):488-510.
- 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, 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.
- 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.
- Kazemi, G.A., Lehr, J.H. et Perrochet, P. (2006) *Groundwater Age*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 288 pp.
- Lamontagne, L. et M.C. Nolin (2008) Dossier des noms de sols du Québec. SISCan (Système d'information des sols au Canada). Bulletin d'expertise No. 8. Contribution No. 971124 du Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures et du Centre de recherches de l'Est sur les céréales et les oléagineux, AAC, Québec (QC) et Ottawa (ON), 58 p.
- 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. *Proceedings of GeoMontreal 2013, the 66th Canadian Geotechnical Conference and the 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, Montreal, Quebec, Canada, September 29-October 3, 8 p.
- Laurencelle, M., Morin, R.H., Lefebvre, R., Rivard, C., Paradis, D., Lavoie, D., Benoît, N., Carrier, M.A. et Beaudry, C. (2011) Initial characterization of fractures and hydraulic properties of a rock aquifer system, Montérégie Est, Quebec, Canada. *Geohydro2011, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference*, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 7 p.
- 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.

- Lavoie, D., Rivard, C., Lefebvre, R., Séjourné, S., Thériault, R., Duchesne, M.J., Ahad, J., Wang, B., Benoit, N., Lamontagne, C., 2014. The Utica Shale and gas play in southern Quebec: Geological and hydrogeological synthesis and methodological approaches to groundwater risk evaluation. *International Journal of Coal Geology (IJCG)*, 126 (2014), 77-91.
- Lavoie, D. (2002) Stratigraphic framework for the Cambrian Chaudière Nappe in the external domain of the Humber Zone in the Quebec Re-entrant, and preliminary correlation with adjacent stratigraphic frameworks. Geological Survey of Canada, Current Research 2002-D2, 11 p.
- Lavoie, D. (1994) Diachronous tectonic collapse of the Ordovician Continental-Margin, Eastern Canada - Comparison between the Quebec Reentrant and St-Lawrence Promontory. *Can J Earth Sci* 31 (8),1309-1319.
- 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.
- 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 01-2, Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin, 44 p.
- MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec) (2011) Plan d'accompagnement agroenvironnemental, Chaudières-Appalaches, Québec.
- 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 MDDELCC, transmis le 8 février 2013, 29 p.
- McDonald, B.C. et Shilts, W.W. (1971) Quaternary Stratigraphy and events in southeastern Québec. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 82, p. 683-698.
- Michaud, A.R., Deslandes, J., Beaudin, I. et Desjardins, J. (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 de recherche, IRDA, 105 pages.
- Michaud, A.R., Giroux, M., Beaudin, I., Desjardins, J., Gagné, G., Duchemin, M., Deslandes, J., Landry, C., Beudet, 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.R., Deslandes, J., Desjardins, J. et Grenier, M. (2009) Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), MAPAQ, Club du bassin LaGuerre, Dura-Club, Club de fertilisation de la Beauce, Fonds d'action québécois pour le développement durable, Conseil pour le

développement de l'agriculture du Québec et Programme d'aide technique de Couverture végétale du Canada. Québec, Québec, 155 p.

Michaud, A.R., Drouin, A., Desjardins, J. et Coté, N. (2012) Rapport final sur le rendement pour la période 2009-2013 pour les bassins versants du ruisseau Fourchette et du Bras D'Henri. Programme d'évaluations des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle du bassin hydrographique. Agriculture et agroalimentaire Canada. Accord de contribution 1585-10-3-2-5-1. 68 p. et annexes.

Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec (MAMROT) (2013) Décret de population pour l'année 2012. Gouvernement du Québec, MAMROT, 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) (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 du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2015b) La qualité de l'eau de mon puits. Consulté en mars 2015. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/potable/depliant/index.htm>

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2015a) Diffusion de la cartographie hydrogéologique [accédé en mars 2015] <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/diffusion-carto-hydrogeologique.htm>

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques MDDELCC (2014b) *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP)*. Québec, Qc, (Consulté le 15 septembre 2014) http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q_2R35_2.HTM

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2013) Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. Gouvernement du Québec, Direction de la politique sur les eaux souterraines, URL : www.MDDELCC.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2012a) Critères de qualité de l'eau potable. Gouvernement du Québec, Direction de la politique sur les eaux souterraines, URL : www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/guide.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MDDELCC) (2012b) Données climatiques de la région de Chaudière-Appalaches. Gouvernement du Québec, MDDELCC, Direction du suivi de l'état de l'environnement (DSEE), compilation de données tabulaires par station, fichiers en format texte distribués en 2012. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les

changements climatiques (MDDELCC) (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 et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2011b) Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA),. In: Direction des écosystèmes aquatiques (Ed.), Québec, base de données géospatiales distribuée en 2012.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MDDELCC) (2011c) Cartographie des milieux humides potentiels. Gouvernement du Québec, MDDELCC, Direction du Patrimoine Écologique et des Parcs (DPEP), version de septembre 2011, base de données géospatiales distribuée en 2012. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (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 et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (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, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MDDELCC) et Canards illimités (2012) Cartographie détaillée des milieux humides des basses terres du Saint-Laurent et de la plaine du Lac Saint-Jean. Projet de collaboration entre le MDDELCC et Canards Illimités, version de mars 2012, base de données géospatiales distribuée en 2012.

Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) (1993) Courbes bathymétriques du Lac Frontière. Gouvernement du Québec, Service des eaux de surface, carte C-9381.

Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) (1992a) Courbes bathymétriques du Lac des Abénaquis. Gouvernement du Québec, Service des eaux de surface, carte C-9211.

Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) (1992b) Courbes bathymétriques du Lac du Huit. Gouvernement du Québec, Service des eaux de surface, carte C-9292.

Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) (1992c) Courbes bathymétriques du Lac Bolduc. Gouvernement du Québec, Service des eaux de surface, carte C-9254.

Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) (1988) Courbes bathymétriques du Lac Joli. Gouvernement du Québec, Direction du milieu hydrique, carte C-10002.

Ministère des ressources naturelles (MRN) (2013) La géoboutique du Québec. Modèles numériques d'altitudes aux échelles 1/20000 et de 1/100 000. Ministères des ressources naturelles et de la faune du Québec.

- 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 des Ressources naturelles du Québec (MRN) (2007) Système d'information écoforestière (SIEF). Gouvernement du Québec, Direction des inventaires forestiers, échelle 1/20 000, fichiers en format shapefile distribués en juin 2010.
- Ministères des Ressources naturelles (MRN) (2004) Le Système d'information écoforestière. Produits de diffusion – Spécifications technique. Publication disponible en ligne, consulté en mai 2013. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-cartes-sief.jsp>
- Ministères des Ressources naturelles (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 (MRN) (2001) Carte géologique du Québec (édition 2001 en format numérique). Gouvernement du Québec, Québec, carte au 1/2 000 000.
- Ministères des Ressources naturelles (MRN) (1999) Base de données topographiques du Québec (BDTQ), échelle 1/20 000. Version 1.2. MRN, Québec, Qc.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1984) Courbes bathymétriques du Lac à la Truite. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8459.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1983a) Courbes bathymétriques du Lac Saint-Charles. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8300.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1983b) Courbes bathymétriques du Lac Fortin. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8362.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1983c) Courbes bathymétriques du Lac Algonquin. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8314.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1983d) Courbes bathymétriques du Lac Falardeau. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8321.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1982a) Courbes bathymétriques du Lac Bécancour. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8257.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1982b) Courbes bathymétriques du Lac à la Raquette. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8211.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1982c) Courbes bathymétriques du Lac Poulin. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8243.

- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1982d) Courbes bathymétriques du Lac des Plaines. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8275.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1982e) Courbes bathymétriques du Lac Therrien. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8259.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1982f) Courbes bathymétriques du Lac Trois Saumons. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8262.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1980) Courbes bathymétriques du Lac aux Grelots. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-8002.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1977a) Courbes bathymétriques du Lac Breeches. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-7759.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1977b) Courbes bathymétriques du Lac Etchemin. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Service des relevés, carte C-7725.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1976a) Courbes bathymétriques du Lac Saint-François. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Hydrographie, carte C-7669.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1976b) Courbes bathymétriques du Lac Aylmer. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Hydrographie, carte C-7678.
- Ministère des Richesses Naturelles du Québec (MRN) (1968) Lac Talon. Gouvernement du Québec, Direction générale des eaux, Domaine hydraulique, carte D-6843.
- Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche (MTCP) (1976) Lac des Îles. Gouvernement du Québec, Service de l'Aménagement de la Faune, carte bathymétrique.
- Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche (MTCP) (1963a) Lac à la Truite. Gouvernement du Québec, Service de la Faune, carte bathymétrique.
- Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche (MTCP) (1963b) Lac du Caribou. Gouvernement du Québec, Service de la Faune, carte bathymétrique.
- Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche (MTCP) (1963c) Petit lac Saint-François. Gouvernement du Québec, Service de la Faune, carte bathymétrique.
- Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche (MTCP) (1952) Lac de l'Est. Gouvernement du Québec, Service de la Faune, carte bathymétrique.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. et Veith, T.L. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3), 885-900.
- Moritz, A., Hélie, J.F., Pinti, D.L., Larocque, M., Barnatche, D., Retailleau, S., Lefebvre, R. et Gélinas, Y. (2015) Methane baseline concentrations and sources in shallow aquifers from the shale gas-prone region of the St. Lawrence Lowlands (Quebec, Canada). En ligne le 9 mars 2015, *Environmental Science & Technology*, doi : 10.1021/acs.est.5b00443.

- MRC de Lotbinière (2005) Schéma d'aménagement et de développement révisé de la MRC de Lotbinière-SADR2- 22 février 2005. Tomes I, II & III. 244 p.
- MRC de la Nouvelle-Beauce (2005) Schéma d'aménagement et de développement révisé. Version administrative refondue, adoptée le 19 avril 2005, 489 p.
- 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.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2010) River Forecast Center Basin Boundaries. NOAA's National Weather Service, National Operational Hydrologic Remote Sensing Center, vector digital data, last updated in November 2010.
- Natural Resources 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., Kiniry, J.R., Williams, J.R. et King, K.W. (2002) Soil and Water Assessment tool. User's Manual version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas, 458 p.
- Neville, C.J. (2011) Critical thinking in aquifer test interpretation. Short course notes, S.S. Papadopoulos & Associates Inc., Waterloo, Ontario.
- Ogunyomi, O., Martin, R.F. et Hesse, R. (1980) Albite of secondary origin in Charny sandstones, Québec: a re-evaluation. *J. Sediment. Res.* 51(2), 597-606.
- Ontario Ministry of Natural Resources (2013) Ontario Wetland Evaluation System-Southern Manual, 3rd Edition Version 3.2, 284 p.
- Panno, S.V., Hackley, K.C., Hwang, H.H., Greenberg, S.E., Krapac, I.G., Landsberger, S. et O'Kelly, D.J. (2006) Characterization and identification of Na-Cl sources in ground water. *Ground Water* 44(2), 176-187.
- Parent, M. (1987) Late Pleistocene stratigraphy and events in the Asbestos-Valcourt region, Québec. Thèse de doctorat (Geology), University of Western Ontario, 320 p.
- Parent, M., Daigneault, R.-A., Roy, M., Légaré-Couture, G., Milette, S., Hurtubise, M.-A., Leduc, E., Thiery, G., Horth, N. et Dubois-Verret, M. (2015) Cartographie des formations superficielles de la région de Chaudière-Appalaches. Carte de compilation issue d'une collaboration entre l'Université du Québec à Montréal, la Commission géologique du Canada et l'Institut National de la Recherche Scientifique (Centre Eau, Terre et Environnement), échelle 1/100 000.
- Parent, M. et Occhietti, S. (1999) Late Wisconsinan deglaciation and glacial lake development in the Appalachians of southeastern Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 53(1), 117-135.
- Parent, M. et Occhietti, S. (1988) Late Wisconsinan deglaciation and Champlain Sea invasion in the St. Lawrence valley, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 42(3), 215-246.
- Pedosphere (2009) http://weather.nmsu.edu/Teaching_Material/soil456/soilwater.html
- Pellerin, S. et Poulin, M. (2013) Analyse de la situation des milieux humides au Québec et recommandations à des fins de conservation et de gestion durable – Rapport final. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 104 p.

- Pinti, D.L., Gelinas, Y., Larocque, M., Barnetche, D., Retailleau, S., Moritz, A., Helie, J.F. et Lefebvre, R. (2013) Concentrations, sources et mecanismes de migration preferentielle des gaz d'origine naturelle (méthane, hélium, radon) dans les eaux souterraines des Basses-Terres du Saint-Laurent. Volet géochimie, Etude E3-9, FQRNT ISI n° 171083, Université du Québec a Montréal, Université Concordia, INRS-ETE, Aout 2013, 94 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.
- Poon, D. (2013) Re-conceptualizing the soil and water assessment tool to better predict subsurface water flow through macroporous soils. Mémoire de Maîtrise. Université McGill. Codirections J. Whalen, et A. Michaud, IRDA. 127 p. avec annexes.
- R Core Team (2014) R: A Language and Environment for Statistical Computing, version 3.1.1 (2014-07-10). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>
- Reddy, R.K. et DeLaune, R.D. (2008) Biogeochemistry of Wetlands. CRC Press, 800 p.
- Rivard, C., Lefebvre, R. et Paradis, D. (2014) Regional recharge estimation using multiple methods: an application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada). *Environmental Earth Sciences*, 71(3), 1389–1408.
- Rivard, C., Lavoie, D., Lefebvre, R., Séjourné, S., Lamontagne, C., Johnson, E.G. et Duchesne, M.J. (2013) An overview of Canadian shale gas production and environmental concerns. *International Journal of Coal Geology (IJCG)*, Special issue on potential environmental impacts of unconventional fossil energy development, 13 pp.
- 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.
- 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.
- Santé Canada (2012) Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, Tableau sommaire. In: Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement (Ed.).
- 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.
- Saxton, K. (2004) Saxton-Rawls Equation Solutions for Soil Water Characteristics. Fichier excel téléchargé en 2013 du site: <http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>

- 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.
- 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, 156 p. et annexe.
- 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.
- Srinivasan, R. (2000) Hydrologic unit model for the United States (Humus), Texas Agricultural Experiment Station, Blackland Research Center, Internet: srph.brc.tamus.edu/hamus
- St-Julien, P. (1995) Géologie de la région de Québec. Ministère de l'énergie et des ressources Québec, MB94-40, 62 p.
- St-Julien, P. et Hubert, C. (1975) Evolution of the Taconian orogen in the Quebec Appalachians. *American Journal of Science*, v. 275A, 337-362.
- Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G. et Rompré, M. (1990) Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, Canada. 70 p.
- Talbot Poulin, M.C., Comeau, G., Tremblay, Y., Therrien, R., Nadeau, M.M., Lemieux, J.M., Molson, J., Fortier, R., Therrien, P., Lamarche, L., Donati-Daoust, F. et Bérubé, S. (2013) *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2013, 172 pages, 19 annexes, 28 cartes.
- Tecsult (2008) Cartographie hydrogéologique du bassin versant de la rivière Chaudière - Secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière. Étude réalisée dans le cadre du Projet eaux souterraines de la Chaudière, financé par le Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ) et géré par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ), 142 p.
- 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. (éd.) *Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown*, 331-341.
- 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 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 p.
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (1972) National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Chapters 4-10.
- 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, 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.
- 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.

Annexe 1 :
Rapport vulgarisé

Rapport vulgarisé sur les ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada

Déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les
changements climatiques, dans le cadre du
Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines

Par

Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement,
Institut de recherche et développement en agroenvironnement et
Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches

Rapport de recherche INRS R-1580

Mars 2015

Conditions d'utilisation et notice bibliographique suggérée

Ce document a été préparé dans le cadre d'un projet réalisé avec le support du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Il peut être reproduit en tout ou en partie à des fins éducationnelles ou non lucratives s'il est cité de façon appropriée. Ce document devrait être cité comme suit:

Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Vigneault, H., Beaudry, C., Légaré-Couture, G., Parent, M., Laurencelle, M. (2015) Rapport vulgarisé sur les ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, Rapport final INRS R-1581, soumis au MDDELCC en mars 2015.

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.

Bien que ce document puisse être consulté de façon autonome, il sert aussi à décrire les livrables du projet PACES en Chaudière-Appalaches de façon vulgarisée. Ces livrables sont présentés dans le rapport suivant dont le rapport vulgarisé constitue un des annexes :

Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Vigneault, H., Beaudry, C., Berthot, L., Légaré-Couture, G., Parent, M., Laurencelle, M., Malet, X., Therrien, A., Michaud, A., Desjardins, J., Drouin, A., Cloutier, M.H., Grenier, J., Bourgault, M.-A., Larocque, M., Pellerin, S., Graveline, M.-H., Janos, D. et Molson, J. (2015) Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Rapport final INRS R-1580, soumis au MDDELCC en mars 2015.

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 les cartes ou des données y étant rattachées.

RÉSUMÉ

Ce rapport et les produits cartographiques qui l'accompagnent représentent les résultats d'un projet réalisé conjointement par le Centre Eau Terre Environnement de l'INRS (INRS-ETE), par l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et par le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA). Le *Projet d'acquisition de connaissances sur l'eau souterraine en Chaudière-Appalaches* a été supporté financièrement par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), par la Conférence régionale des élus (CRÉ) de la Chaudière-Appalaches et par l'IRDA ainsi que par des contributions en nature des organismes partenaires du projet. Les travaux réalisés s'intègrent dans le *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines* (PACES) du MDDELCC. 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 région d'étude couvre la Chaudière-Appalaches (14 600 km²), excluant toutefois Lévis qui a été couvert par le projet PACES de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). Huit (8) des neuf (9) municipalités régionales de comté (MRC) et la Conférence régionale des élus (CRÉ) de la Chaudière-Appalaches sont partenaires du projet. Ce territoire couvre, en tout ou en partie, les territoires de six (6) OBV qui sont aussi partenaires du projet.

La compilation des données existantes a permis d'extraire de l'information sur près de 30 000 puits à partir du Système d'information hydrogéologie (SIH) du MDDELCC. Des données ont aussi été extraites de plus de 350 rapports obtenus des municipalités et des agences gouvernementales. Les données existantes ont été complétées par des levés de terrain ciblés. La foreuse de l'INRS a permis de faire 11 sondages au piézocône et 24 sondages par rotoperçusion ainsi que l'installation de 19 puits d'observation de petit diamètre (2.5 cm) dans les dépôts meubles. De plus, une foreuse conventionnelle a été utilisée pour installer neuf (9) puits de 150 mm (6 po) de diamètre ouverts au roc qui complètent les 20 puits déjà existants du réseau de suivi du MDDELCC dans la région d'étude. Des essais hydrauliques ont été réalisés dans les nouveaux puits d'observation. Une campagne d'échantillonnage d'eau souterraine a permis de récolter 131 échantillons provenant principalement de puits résidentiels. Ces échantillons ont été analysés principalement pour les ions majeurs et mineurs, ainsi que les gaz dissous (méthane) et plusieurs isotopes (²H, ¹⁸O, ³He, ¹⁴C) pour un sous-groupe représentatif. Presque 200 autres analyses chimiques ont été obtenues d'études antérieures ou en voie de réalisation dans la région d'étude.

La province géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent couvre une étendue restreinte dans la moitié nord-ouest de la MRC de Lotbinière, alors que le reste de la région fait partie des Appalaches, incluant les zones de Humber interne et externe, la zone de Dunnage et la ceinture de Gaspé. Le roc fracturé représente un aquifère régional continu, alors que des aquifères granulaires d'étendue restreinte se retrouvent par endroits dans les dépôts meubles. Sur la base de la physiographie et de la nature des dépôts meubles, trois contextes hydrogéologiques peuvent être définis dans la région d'étude : 1) basses-terres du St-Laurent, 2) vallées appalachiennes, et 3) hautes-terres appalachiennes. Les basses-terres du St-Laurent se retrouvent sur une bande ayant 10 à 30 km de largeur en bordure du fleuve St-Laurent. On y retrouve une topographie de bas plateau qui a été recouvert par la Mer de Champlain, ce qui fait qu'on y retrouve d'épaisses accumulations de sédiments à grains fins (plus de 10 m). Au sud des basses-terres, on retrouve une topographie de collines, montagnes et vallées. Les hautes-terres appalachiennes ne sont généralement recouvertes que d'une mince couche de till relativement perméable, ce qui en fait une vaste zone de recharge préférentielle de l'aquifère régional. Les vallées appalachiennes peuvent être comblées d'épaisseurs importantes de sédiments (plus de 15 m) mais leur potentiel aquifère est généralement faible. Toutefois, on

retrouve par endroits des sédiments fluvioglaciaires qui peuvent avoir un potentiel aquifère local. La conductivité hydraulique décroît avec la profondeur et les puits montrent des valeurs très variables, étant généralement de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-5} m/s. Globalement, la recharge de l'aquifère rocheux est de 166 mm/an, avec des valeurs distinctes pour les hautes-terres appalachiennes (186 mm/an), les vallées appalachiennes (192 mm/an) et les basses-terres du St-Laurent (85 mm/an). La vulnérabilité suit généralement la même tendance, mais elle n'atteint généralement pas un niveau absolu élevé.

L'agriculture occupe 27% du territoire et se retrouve surtout dans les basses-terres du St-Laurent et les vallées appalachiennes, alors que 65% du territoire est forestier. L'usage total annuel de l'eau dans la région d'étude a été évalué à 109 million de m³, dont 42% provenait de l'eau souterraine. Globalement, les usages résidentiel (38%), agricole (32%) et industriel-commercial-institutionnel (30%) sont équilibrés, mais il y a des variations importantes entre les MRC. En tout, 36% de la population totale de la région d'étude, qui s'élève à 278 180 personnes (sans Lévis), s'alimente en eau à partir d'un puits privé, alors que le reste de la population est desservie par un réseau d'aqueduc municipal ou privé (20 personnes et plus). 60% des réseaux municipaux sont approvisionnés par de l'eau souterraine grâce à plus de 300 puits d'approvisionnement en eau. Bien que l'eau souterraine soit généralement de bonne qualité, on y retrouve localement certains éléments naturels à des concentrations excédant les normes de potabilité de l'eau de consommation (F, Ba, As). Sept (7) types d'eau ont été définis sur la base des proportions des ions majeurs. Certains de ces types d'eau représentent l'évolution géochimique naturelle de l'eau souterraine. Toutefois, d'autres types d'eau semblent indiquer une dégradation anthropique de la qualité de l'eau souterraine qui pourrait être reliée à différentes activités, telles que l'agriculture, le sel déglacant ou les eaux usées. Les concentrations associées à ces types d'eau n'excèdent généralement pas les normes de potabilité. La présence de fortes concentrations en nitrite-nitrates est généralement associée à l'agriculture mais, malgré l'importance de ces activités en Chaudière-Appalaches, un seul échantillon a présenté des concentrations excédant le critère de potabilité et les concentrations atteignent rarement des niveaux importants. Dans la partie nord-ouest de la région à l'intérieur de la zone prospective pour le gaz de shale, 44 (59%) des 74 échantillons d'eau analysés ont montré des concentrations en méthane quantifiables. Onze (11) échantillons (15%) ont présenté des concentrations excédant le seuil d'alerte de 7 mg/L. Le méthane n'a pas d'incidence sur la santé. Ce méthane est d'origine biogénique prédominante, c'est-à-dire qu'il a été formé en place à faible profondeur.

En plus des livrables prévus par le PACES, des travaux spécifiques ont été réalisés par des étudiants de 2^e et 3^e cycles sur des thèmes d'intérêt pour les ressources en eau souterraine de la région. Les résultats initiaux de ces travaux sont documentés dans le présent rapport. Ces travaux comprennent la cartographie des sédiments superficiels et la définition des événements géologiques au Quaternaire, l'étude des milieux humides présents dans la zone du Chêne et de leur interaction avec les eaux souterraines, la modélisation de l'écoulement régional et de l'évolution géochimique de l'eau souterraine, et la modélisation hydrologique de l'écoulement de l'eau de surface ainsi que de la recharge des nappes.

Enfin, le projet PACES en Chaudière-Appalaches a fourni les connaissances requises pour assurer la bonne gouvernance de l'eau souterraine. Une section du rapport met en relation les préoccupations sur eaux souterraines exprimées par les acteurs de la région et l'éclairage apporté sur ces préoccupations par les connaissances acquises dans le cadre du présent projet. 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 et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) ainsi que tous les organismes partenaires du projet pour leurs contributions de même que leur collaboration à la collecte de d'information données au cours du projet. Plus particulièrement, nous voulons souligner la contribution financière de la CRÉ de la Chaudière-Appalaches et les contributions en ressources humaines des organismes partenaires suivants :

- les municipalités régionales de comté (MRC) suivantes : Lotbinière, La Nouvelle-Beauce, Robert-Cliche, Beauce-Sartigan, Bellechasse, Les Etchemins, Montmagny et L'Islet
- les organismes de bassins versants (OBV) partenaires du projet : OBV de la zone du Chêne, Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC), Conseil de bassin de la rivière Etchemin (CBE), OBV de la Côte-du-Sud, Groupe de concertation des bassins versants de la zone Bécancour (GROBEC), OBV du fleuve Saint-Jean, et Conseil de la gouvernance de l'eau des bassins de la rivière Saint-François (COGESAF)

Les auteurs veulent également remercier les organismes suivants de leur appui au projet :

- les Fédérations de l'Union des producteurs agricoles (UPA) de la Chaudière-Appalaches (Lotbinière-Mégantic, Lévis-Bellechasse, Beauce, Côte-du-Sud)
- le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) - Direction régionale de la Chaudière-Appalaches

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

- le ministère des Transports du Québec (MTQ)
- le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN)
- le ministère du Développement durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MDDELCC) - Direction régionale de la Chaudière-Appalaches
- le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)
- la Commission régionale sur les ressources naturelles et le territoire (CRRNT) de la Chaudière-Appalaches
- l'Université Laval
- l'Université du Québec à Montréal
- le Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES)
- 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

Nous tenons aussi à remercier nos collaborateurs scientifiques :

- Dr. Christine Rivard, Commission géologique du Canada (CGC), responsable du projet réalisé dans la région de Saint-Édouard-de-Lotbinière dans le cadre duquel nous avons échangé des données
- Dr. John Molson, Université Laval, qui a encadré le projet de maîtrise de Debora Janos sur la modélisation de l'écoulement régional et de la géochimie de l'eau souterraine
- Dr. Marie Larocque, UQAM, qui a encadré le projet de doctorat de Marc-André Bourgault sur les échanges entre les milieux humides en tête de bassin et les eaux souterraines

Enfin, nous remercions les résidents de la Chaudière-Appalaches ainsi que les municipalités qui ont collaboré au projet en donnant accès à leur propriété ou à leur puits, afin de réaliser des travaux de terrain.

Liste des livrables PACES

- Livable PACES no. 1 : TOPOGRAPHIE**
- Livable PACES no. 2 : ROUTES ET LIMITES ADMINISTRATIVES**
- Livable PACES no. 3 : MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN**
- Livable PACES no. 4 : PENTE**
- Livable PACES no. 5 : HYDROGRAPHIE**
- Livable PACES no. 6 : BASSINS VERSANTS**
- Livable PACES no. 7 : OCCUPATION DU SOL**
- Livable PACES no. 8 : COUVERTURE VÉGÉTALE**
- Livable PACES no. 9 : MILIEUX HUMIDES**
- Livable PACES no. 10 : AFFECTATION DU TERRITOIRE**
- Livable PACES no. 11 : PÉDOLOGIE**
- Livable PACES no. 12 : GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE**
- Livable PACES no. 13 : GÉOLOGIE SIMPLIFIÉE DU ROC**
- Livable PACES no. 14A : COUPE STRATIGRAPHIQUE SIMPLIFIÉE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES**
- Livable PACES no. 14B : COUPES GEOLOGIQUES CONCEPTUELLES DU ROC**
- Livable PACES no. 15 : ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES**
- Livable PACES no. 16 : TOPOGRAPHIE DU ROC**
- Livable PACES no. 17 : CONDITIONS DE CONFINEMENT**
- Livable PACES no. 18 : CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES**
- Livable PACES no. 19 : PIÉZOMÉTRIE DANS LES DÉPÔTS MEUBLES (pas produit)**
- Livable PACES no. 20 : PIÉZOMÉTRIE DANS LE ROC**
- Livable PACES no. 21 : PARAMÈTRES HYDRAULIQUES**
- Livable PACES no. 22 : VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES (DRASTIC)**
- Livable PACES no. 23 : INDICE DE DENSITÉ DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES**
- Livable PACES no. 24 : QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE (CRITÈRES POUR L'EAU POTABLE)**
- Livable PACES no. 25 : QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE (CRITÈRES ESTHÉTIQUE)**
- Livable PACES no. 26 : UTILISATION DE L'EAU**
- Livable PACES no. 27 : EMBLEMES DES STATIONS MÉTÉO, HYDROMÉTRIQUES ET DE SUIVI DE LA NAPPE**
- Livable PACES no. 28A : ZONES POTENTIELLES DE RECHARGE ET DE RÉURGENCE PRÉFÉRENTIELLES**
- Livable PACES no. 28B : RECHARGE DISTRIBUÉE**

Livrable PACES no. 1 : TOPOGRAPHIE

Une carte topographique représente l'élévation du terrain par des lignes, appelée courbes de niveau, qui correspondent à une même élévation de la surface du sol par rapport au niveau moyen de la mer. Plus les courbes de niveau sont rapprochées l'une de l'autre, plus le relief est accidenté. À l'opposé, des courbes de niveau éloignées indiquent un relief plat. À l'échelle régionale, la topographie influence le climat, les directions d'écoulement des eaux souterraines et les zones de réalimentation (recharge) des aquifères. L'écoulement souterrain régional se fait généralement des hauts topographiques, qui sont souvent des zones de recharge des aquifères, vers les bas topographiques. Le livrable PACES no. 3 montrant le modèle numérique de terrain permet de représenter la topographie avec un autre mode de présentation.

La Chaudière-Appalaches présente trois contextes hydrogéologiques dont la topographie est distincte : 1) on retrouve dans les basses-terres du St-Laurent une topographie de bas plateau qui a été recouvert par la Mer de Champlain jusqu'à une élévation de 180 m par rapport au niveau moyen de la mer (NMM), les Basses-terres elles-mêmes ayant une altitude entre 10 m en bordure du fleuve Saint-Laurent et 90 m NMM à la limite des Appalaches; 2) les vallées appalachiennes incisent les reliefs montagneux et se trouvent à des élévations généralement inférieures à 350 m NMM; et 3) les hautes-terres appalachiennes peuvent atteindre jusqu'à 900 m NMM d'élévation, particulièrement dans leur partie centrale (Zone de Humber interne).

Livrable PACES no. 2 : ROUTES ET LIMITES ADMINISTRATIVES

La carte du réseau routier et des limites administratives permet de situer dans l'espace les données acquises sur l'eau souterraine et les points d'intérêt avoisinants. La notation du nom des lieux, routes et municipalités facilitent d'autant plus cette localisation. La carte montre les limites des MRC et des municipalités de la région d'étude, et elle donne une indication de la population des municipalités.

Le projet couvre la région administrative de la Chaudière-Appalaches, mais en excluant Lévis qui a été couvert par le projet PACES de la CMQ. La région d'étude de 14 600 km² est bornée au nord-est par la région du Bas-Saint-Laurent, au nord-ouest par le fleuve Saint-Laurent et la région de la Capitale-Nationale, au sud-ouest par les régions du Centre-du-Québec et de l'Estrie et au sud-est par la frontière internationale avec les États-Unis (Vermont et Maine). La Chaudière-Appalaches comprend neuf municipalités régionales de comté (MRC) qui incluent 134 municipalités. De plus, la région couvre, en tout ou en partie, les territoires de neuf organismes de bassins versants qui ont formé le Regroupement des organismes de bassins versant de la Chaudière-Appalaches pour concerter leurs travaux dans la région.

Le réseau routier du territoire à l'étude comprend deux axes routiers principaux, soient les autoroutes 20, et 73. L'autoroute 20 est parallèle au fleuve Saint-Laurent et il assure les échanges avec les régions du Bas Saint-Laurent, à l'est, et celle du Centre-du-Québec, à l'ouest, en passant à proximité des municipalités de Laurier-Station, Montmagny, L'Islet et Saint-Jean-Port-Joli. L'autoroute 73 (Autoroute de la Beauce) relie la ville de Lévis, au nord-ouest, avec la frontière des États-Unis, au sud-est, en passant par les principales municipalités de la Beauce, notamment Saint-Lambert-de-Lévis, Sainte-Marie, Beauceville et Saint-Georges. Plusieurs routes nationales et secondaires parcourent également ce territoire.

Livable PACES no. 3 : MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

Le modèle numérique de terrain (MNT) rapporte l'élévation de la surface du sol par rapport au niveau moyen de la mer sur un maillage régulier de cellules dont la dimension est de 10 m par 10 m. Le modèle numérique de terrain constitue une autre forme de représentation de la surface du terrain et est donc comparable à la topographie (livable PACES no. 1). La représentation de la topographie avec le MNT utilise une échelle de couleur correspondant à différentes plages d'élévation. Ce format de présentation permet de visualiser plus facilement les variations de la topographie. Le texte associé au livable PACES no. 1 décrit la topographie de la région d'étude. Le livable PACES no. 4 de la pente du sol est dérivé du modèle numérique de terrain.

Livrable PACES no. 4 : PENTE

La pente de la surface du sol représente le degré d'inclinaison de la surface du sol par rapport à l'horizontale. Les pentes montrées sur le livrable PACES no. 4 ont été calculées sur un maillage régulier de 10 m par 10 m à l'aide d'un logiciel de cartographie en utilisant le modèle numérique de terrain (livrable PACES no. 3). La pente du sol influence le ruissellement des précipitations et ainsi la recharge des aquifères. En effet, plus la pente est forte, plus il y aura de ruissellement à la surface du sol et moins il y aura d'infiltration d'eau dans le sol pour réalimenter les aquifères.

On retrouve la même distinction au niveau de la pente que ce qui était apparent pour la topographie : 1) dans les basses-terres du St-Laurent la topographie plane fait en sorte que les pentes y sont en général faibles avec des valeurs entre 0 et 2%; 2) les vallées appalachiennes on des pentes un peu plus fortes, particulièrement à leur périphéries, et les valeurs varient généralement de 2 à 12 %; et 3) les hautes-terres appalachiennes on des pentes généralement fortes dépassant souvent 18 %, notamment dans la partie la plus élevée de la Zone de Humber interne ainsi qu'au sud de la limite des Appalaches et des Basses-terres entre Montmagny et Saint-Jean-Port-Joli.

Livrable PACES no. 5 : HYDROGRAPHIE

L'hydrographie est la description de la distribution dans un territoire de l'ensemble des cours d'eau (ruisseaux, rivières et fleuve) et des plans d'eau (lacs) qui y sont présents. La connaissance de l'hydrographie est essentielle pour identifier les endroits où les eaux souterraines et les eaux de surface peuvent être en contact. À ces endroits, l'eau souterraine peut s'écouler vers les eaux de surface et ainsi les réalimenter, si les aquifères sont en contact avec le cours d'eau. Au Québec, l'écoulement est rarement dans la direction inverse, c'est-à-dire des eaux de surface vers les eaux souterraines.

La carte 5 montre le réseau hydrographique (seuls les sous-bassins principaux sont présentés) ainsi que les limites des bassins versants. Le réseau hydrographique est plus dense dans les Appalaches que dans les basses-terres étant donné la topographie plus variable de la région appalachienne. Les rivières importantes sont évidemment les principaux cours d'eau des cinq bassins versant principaux : la rivière Du Chêne, la rivière Chaudière, la rivière Etchemin, la rivière du Sud et la rivière Saint-Jean. Les rivières Boyer, Nicolet, Saint-François, Bécancour et Ouelle possèdent elles aussi des bassins versants importants. Les débits des rivières étaient disponibles pour 37 des 47 stations de jaugeage situées dans la zone d'étude. Au total, 15 stations sont encore actives et 3 de ces stations sont situées relativement en aval des bassins, soit près de l'exutoire de rivières importantes (ex. Chaudière, Beauvillage, du Sud).

Livrable PACES no. 6 : BASSINS VERSANTS

Un bassin versant est un territoire dont les eaux de surface se déversent vers un lieu donné, comme un cours d'eau, un lac ou un ouvrage artificiel. Le territoire d'un bassin versant est contrôlé par la topographie du terrain (livrables PACES no. 1 et no. 2). Les bassins versants de niveau 1 sont distingués sur la carte du livrable PACES no. 6. Ce sont généralement les bassins dont la rivière principale se déverse dans le fleuve Saint-Laurent et dont la superficie est de plus de 25 km².

La Chaudière-Appalaches couvre, en tout ou en partie, les territoires de 9 organismes de bassins versants : de la zone Bécancour, de la zone du Chêne, de la Côte-du-Sud, du Fleuve Saint-Jean, de la rivière Chaudière, de la rivière Etchemin, des rivières Kamouraska, L'Islet, Rivière-du-Loup (OKABIR), de la rivière Nicolet et de la rivière Saint-François. Ces organismes ont formé le Regroupement des organismes de bassins versant de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) pour concerter leurs travaux dans la région.

Livrable PACES no. 7 : OCCUPATION DU SOL

La carte d'occupation du sol montre les usages qui sont faits de la surface du territoire. Une connaissance de l'occupation du sol est utile pour cibler les secteurs où les activités sont susceptibles d'exercer une pression sur la ressource en eaux souterraines et d'en modifier la qualité ou la quantité par rapport à son état présent. L'occupation du sol influence aussi le cycle de l'eau. Par exemple, en zone urbaine dense, le ruissellement de l'eau à la surface du terrain est généralement plus élevé qu'en région rurale. En zone de couvert forestier, l'évapotranspiration des plantes sera beaucoup plus importante qu'en région urbaine.

En Chaudière-Appalaches, plus de la moitié du territoire (65.1%) est en zone forestière et l'agriculture occupe un peu plus du quart du territoire (26.7%). Dans la zone agricole couvrant près de 4 200 km², les cultures agricoles indifférenciées et les pâturages occupent la majeure partie (respectivement 40 % et 39 %), suivies par le maïs (6.7 %), les céréales (6.6 %) et le soya (6 %). Le reste du territoire, soit environ 1 280 km², est occupé par les zones d'activités anthropiques (1.8 %), les milieux humides (6.3 %) et les activités non différenciées (0.1 %).

Livrable PACES no. 8 : COUVERTURE VÉGÉTALE

La carte de la couverture végétale montre l'ensemble des végétaux qui recouvrent le sol. Les végétaux utilisent l'eau pour leur croissance et ont donc un impact sur le cycle de l'eau. Les végétaux contiennent beaucoup d'eau qu'ils retournent à l'atmosphère par évapotranspiration. Les précipitations sont soit interceptées par les feuilles avant que la pluie n'atteigne le sol ou par leurs racines qui retirent une partie l'eau contenue dans le sol. Le type de couvert végétal, sa densité et sa maturité aura un impact sur la quantité d'eau disponible pour la recharge des aquifères (livrable PACES no. 28).

Les peuplements forestiers ont été regroupés en trois classes afin de simplifier la représentation cartographique : feuillus, résineux et mélangés (mixte). Les forêts mixtes occupent la plus grande partie du territoire (32%), suivi des conifères (18%) et des feuillus (15%). Au total, 64% du territoire est ainsi forestier. Le couvert forestier est dominant dans les haute-terres appalachiennes, mais il est faible dans les vallées appalachiennes et dans les basses-terres.

Livrable PACES no. 9 : MILIEUX HUMIDES

Les milieux humides sont des terres qui sont inondées ou saturées d'eau assez longtemps pour modifier la composition du sol ou de la végétation. Au même titre que les eaux de surface, les milieux humides peuvent être des lieux d'échanges importants entre l'eau de surface et l'eau souterraine. Certains milieux humides représentent parfois d'importantes zones de résurgence de l'eau souterraine.

Au total, les milieux humides (potentiels et détaillés) couvrent 1 923 km², soit 12.3 % de la région. Pour la majeure partie de la Chaudière-Appalaches, seuls les milieux humides potentiels non différenciés sont disponibles et ils couvrent 1 549 km², soit 9.9% de la région. Dans la région de Lotbinière, une cartographie détaillée des milieux humides est disponible. Bien que les vastes milieux humides de Lotbinière soient bien connus, on retrouve aussi de grandes étendues de milieux humides potentiels dans les vallées et les points bas des Appalaches.

Livrable PACES no. 10 : AFFECTATION DU TERRITOIRE

En aménagement du territoire ou en urbanisme, l'affectation du territoire représente l'attribution à un territoire d'une utilisation, d'une fonction ou d'une vocation déterminée. Les grandes affectations du territoire indiquent formellement comment une municipalité locale ou une municipalité régionale de comté (MRC) entend utiliser son territoire. L'affectation du territoire peut être utilisée comme un moyen de contrôle pour régir les activités sur le territoire. Pour la protection des eaux souterraines, l'affectation du territoire peut être établie en tenant compte des zones de recharge des aquifères, où les eaux qui s'infiltrent à partir de la surface du sol atteignent directement les aquifères.

La grande majorité du territoire de la Chaudière-Appalaches est à vocation agricole (36.7 %), forestière (31.4 %) et agroforestière (19.9 %). Les principales zones urbaines sont situées dans la vallée de la rivière Chaudière et la vallée de la rivière Etchemin ainsi qu'autour de la municipalité de Thetford Mines et le long de l'autoroute 20. Plusieurs zones d'affectation récréative sont aussi réparties sur le territoire, notamment dans le secteur du Massif du Sud et du Lac Saint-François. Les zones d'affectation industrielle couvrent une faible superficie (< 1 %) et sont concentrées dans les centres urbains, dont une majorité à proximité de Thetford Mines.

Livrable PACES no. 11 : PÉDOLOGIE

La pédologie est la science étudiant la formation et les modifications du sol, ainsi que ses propriétés. La connaissance de la composition des sols aide à la compréhension de plusieurs processus dynamiques liés à l'eau, notamment l'infiltration de l'eau dans le sol et la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine.

La carte pédologique a été constituée à partir des cartes pédologiques publiées à différentes échelles dans les différentes parties de la région d'étude au fil des années. Elle a servi aux travaux d'évaluation de la recharge (livrable no. 28) ainsi qu'à l'estimation de la vulnérabilité (livrable no. 22) et à la modélisation hydrologique. Toutes ces données ont permis de classer et représenter chaque série de sols selon six catégories de texture (sableux, loameux, argileux, graveleux, tills et autres) et sept classes de drainage (très rapidement drainé, rapidement drainé, bien drainé, modérément bien drainé, mal drainé et très mal drainé). Les sols issus de till sont les plus répandus (67 %) dans la zone d'étude, particulièrement dans les hautes-terres appalachiennes, suivis des sols graveleux (8.5%) et sableux (5.1%), qui dominent dans les basses-terres, où les sols argileux (3.2%) se prédominent surtout dans le bassin de la rivière du Sud. Les sols organiques (3.4%) sont présents à la fois dans les basses-terres et les vallées appalachiennes.

Livrable PACES no. 12 : GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE

La géologie du Quaternaire porte sur les dépôts meubles qui recouvrent le socle rocheux et qui sont généralement associés à la glaciation de la période géologique du Quaternaire. Ces dépôts meubles, aussi appelés sédiments superficiels, ont des propriétés aquifères variables selon leur nature. Les tills sont des dépôts glaciaires de nature, compacité et textures variables, et qui agissent généralement en tant qu'aquitard (unité hydrogéologique peu perméable). À l'opposé, les dépôts fluvioglaciers, tels que ceux formant des eskers ou des épandages proglaciaires, contiennent des sédiments sablo-graveleux qui peuvent constituer d'excellents aquifères. Les sédiments silto-argileux déposés dans des lacs ou les mers formés avant ou après la glaciation constituent également des aquitards. De plus, selon leur nature, les dépôts meubles influencent l'écoulement de l'eau souterraine dans les aquifères rocheux fracturés sous-jacents. Ils peuvent, entre autres, influencer la recharge, le confinement de l'aquifère, la vulnérabilité de l'aquifère à la contamination et les conditions d'émergence de l'eau souterraine.

La carte de la géologie du Quaternaire de la région de Chaudière-Appalaches a été assemblée à partir de trois sources : 1) une nouvelle cartographie réalisée par l'UQAM de douze (12) feuillets à l'échelle 1/50 000 dans la partie sud de la région, 2) une cartographie détaillée par un doctorant de l'INRS de toute la bande nord de la région située sous la limite marine où des levés LiDAR étaient disponibles, et 3) pour le reste de la région, des cartes existantes ont subi des corrections semi-automatiques à l'aide de SIG les rendre cohérentes avec les cartes récentes. Ces derniers secteurs se trouvent dans les Appalaches et ont une couverture quaternaire relativement simple.

Dans les basses-terres, on retrouve typiquement en surfaces des unités marines et glaciomarines associés à la Mer de Champlain ou de Goldthwait. C'est dans ce secteur que sont recoupées les épaisseurs les plus importantes de dépôts meubles, bien que celles-ci soit très variables, allant de nulles à plus de 20 m d'épaisseur. Le secteur des Hautes-terres appalachiennes est quant à lui dominé par des sédiments glaciaires. De grandes zones de till mince ou d'affleurements rocheux sont observées sur les sommets topographiques, mais le till peut atteindre jusqu'à 5 m d'épaisseur où la topographie est moins accidentée. Les vallées appalachiennes sont orientées principalement nord-ouest/sud-est, comme celle de la rivière Chaudière dans l'axe Sainte-Marie–Saint-Georges. Des complexes de dépôts fluvioglaciers, mis en places principalement lors du retrait des glaces, occupent souvent les fonds de vallées.

Livrable PACES no. 13 : GÉOLOGIE SIMPLIFIÉE DU ROC

La carte de la géologie du roc présente les différents types de roches ainsi que les principales structures géologiques, telles que les plis et les failles. Lorsque les roches sont fracturées, elles peuvent constituer un aquifère et des puits peuvent y être aménagés pour exploiter l'eau souterraine. Le type de roche a une incidence sur les propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux et les conditions d'écoulement. Puisque l'eau souterraine circule généralement à des vitesses très faibles dans les formations géologiques, elle y réside suffisamment longtemps pour dissoudre une partie des minéraux contenus dans la roche. Cela peut avoir un effet sur la qualité de l'eau souterraine lorsque la concentration de certains composés dissous dans l'eau souterraine dépasse les critères de potabilité.

Dans la région à l'étude, on distingue deux régions géologiques : la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. La Ligne (ou faille) de Logan, s'étendant du lac Champlain à la Ville de Québec, 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 lors de la formation des Appalaches. Les roches des Appalaches sont également des roches d'origine sédimentaires d'âge Cambrien et Ordovicien mais ayant subies un métamorphisme régional et plusieurs épisodes de déformations d'intensité variable, notamment lors des orogénèses taconienne et acadienne. Ces roches chevauchent en séquence progressives les roches de la Plate-forme du Saint-Laurent.

Livrable PACES no. 14 : COUPE STRATIGRAPHIQUE SIMPLIFIÉE DES FORMATIONS QUATÉRNAIRES

Une coupe « stratigraphique » montre la superposition des unités géologiques. Les informations en découlant peuvent servir à préparer une coupe « hydrostratigraphique » qui identifie les matériaux géologiques constituant des aquifères (matériaux perméables) ou des aquitards (matériaux peu perméables). Les coupes sont généralement dessinées à partir de la carte Géologie du Quaternaire (livrable PACES no. 12) et des données de forages qui donnent des informations sur les matériaux géologiques rencontrés en surface et en profondeur, respectivement. Une interprétation doit ensuite être faite sur les regroupements de matériaux géologiques ayant des propriétés hydrogéologiques similaires ainsi que sur la continuité latérale des unités d'un forage à l'autre. Des levés géophysiques peuvent aussi être utilisés pour la construction des coupes.

En Chaudière-Appalaches, une dizaine de coupes stratigraphiques simplifiées ont été préparées afin d'illustrer l'architecture des dépôts dans des contextes typiques. Ces coupes ont été élaborées à partir des données de forages colligées et validées dans le cadre du projet, mais également à partir de la géologie du Quaternaire, des données sur les affleurements et des données géophysiques interprétées (sismique réflexion). Ces coupes permettent de déduire les conditions hydrogéologiques régionales qui prévalent dans la région d'étude.

Livrable PACES no. 14B : COUPES GEOLOGIQUES CONCEPTUELLES DU ROC

Les coupes géologiques sont des représentations verticales des matériaux géologiques présents sous la surface du sol. Les coupes géologiques présentées ici sont qualifiées de « conceptuelles » car elles représentent les conditions géologiques prédominantes sans toutefois prétendre à l'exactitude des conditions représentées. Ces coupes ont été préparées dans le cadre d'un rapport synthèse (Séjourné et al., 2013) à partir de l'interprétation de levés sismiques profonds, d'un levé aéromagnétique régional, de données de forages pétroliers et gaziers ainsi que de la cartographie géologique de surface et de la cartographie structurale. Aux endroits où les forages disponibles ne fournissaient pas un contrôle suffisant, les épaisseurs et profondeurs ont été interprétées ou interpolées pour respecter l'architecture générale de chaque coupe.

La coupe géologique est présentée à la figure 3.3 du rapport. De la base au sommet, la coupe distingue cinq grands groupes d'unités géologiques : le socle précambrien, les roches sédimentaires déposées horizontalement et peu déformées de la Plate-forme du Saint-Laurent, le Shale d'Utica, la formation de Nicolet (aussi constituée en grande partie de shale) et les roches appartenant aux Appalaches. La coupe montre l'extension verticale et latérale des groupes d'unités géologiques ainsi que les principales failles caractérisant la région. On distingue notamment la ligne (ou faille) de Logan qui correspond à la limite entre la Plate-forme du Saint-Laurent et la zone externe des Appalaches.

Référence :

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.

Livrable PACES no. 15 : ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES

15A : Épaisseur totale. 15B : Sédiments argileux. 15C : Sédiments sous-jacents à l'argile. 15D : Sédiments sus-jacents à l'argile.

L'épaisseur et les propriétés des dépôts meubles qui recouvrent le roc influencent l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle régionale. Lorsque les dépôts meubles sont grossiers (sables et graviers) et que leur épaisseur est suffisamment importante, ils constituent un aquifère potentiellement exploitable. Cependant, si les dépôts meubles sont fins (argile et silt) et donc peu perméables, ils formeront plutôt un aquitard. Parce qu'il est peu perméable, un aquitard situé au-dessus d'un aquifère le protégera d'une contamination potentielle venant de la surface. La recharge de l'aquifère sous-jacent à partir des précipitations sera cependant réduite en présence de l'aquitard. Les informations sur l'épaisseur et le type de dépôts meubles proviennent majoritairement des données de forage. L'épaisseur totale des dépôts meubles a été estimée en interpolant les données colligées et validées dans le cadre du projet, incluant les forages, les affleurements rocheux (qui indiquent une épaisseur nulle de dépôts), les données géophysiques interprétées (ex. sismique réflexion) et, de manière indirecte, les données sur la distribution des sédiments du Quaternaire (livrable no. 12).

Pour la Chaudière-Appalaches, différentes méthodes d'interpolation ont été utilisées pour estimer les épaisseurs de dépôts meubles dans les basses-terres et les Appalaches et une validation itérative des résultats a été réalisée. L'épaisseur de dépôts meubles est plus importante dans les basses-terres, allant de 0 à 30 m (moyenne de 4.7 m), et l'épaisseur est particulièrement importante dans la partie nord-ouest des basses-terres, entre Sainte-Croix et Lévis. On peut aussi retrouver des épaisseurs de dépôts meubles pouvant excéder 15 m dans les vallées appalachiennes, où l'épaisseur moyenne est de 3 m. Les hautes-terres appalachiennes sont généralement recouvertes de faibles épaisseurs de till et l'épaisseur moyenne de dépôts meubles y est d'un peu moins de 2 m. En plus de l'épaisseur totale de dépôts meubles, des cartes ont aussi été produites pour montrer l'épaisseur de différents types des sédiments : les sédiments fins argileux, les sédiments au-dessus des sédiments fins et les sédiments retrouvés sous les sédiments fins. Les accumulations importantes des sédiments fins ne se retrouvent que dans les basses-terres où ces sédiments ont des épaisseurs entre 5 et 10 m, mais peuvent localement excéder 15 m. C'est encore une fois dans la partie nord-ouest des basses-terres qu'on retrouve des épaisseurs importantes et continues de sédiments fins. Il y a peu de sédiments au-dessus ou en-dessous des sédiments fins et ces sédiments sont généralement retrouvés dans les basses-terres ou dans les vallées appalachiennes.

Livrable PACES no. 16 : TOPOGRAPHIE DU ROC

La carte de la topographie du roc représente une estimation de l'élévation de la surface du roc qui se trouve souvent sous une certaine épaisseur de dépôts meubles. Donc, contrairement à la topographie de la surface (livrable PACES no. 1), il n'est pas possible de connaître la topographie du roc à moins de disposer de données de forages, ou d'affleurements rocheux indiquant que le roc est présent à la surface. La précision de l'estimation de la topographie du roc dépend donc surtout de la quantité et de la répartition spatiale des données de forage. La topographie du roc sert à identifier les dépressions (creux) importantes du roc où peuvent s'être accumulés une grande quantité de dépôts meubles qui peuvent avoir un potentiel aquifère intéressant si ces sédiments sont grossiers (sables et graviers). La topographie du roc a été obtenue en soustrayant l'épaisseur totale des dépôts meubles (livrable PACES no. 15) du modèle numérique de terrain (livrable PACES no. 3).

En Chaudière-Appalaches, la topographie du roc reflète généralement la topographie de la surface, à l'exception de certaines vallées appalachiennes comblées d'épaisseurs importantes de sédiments (Chaudière et Etchemin) ainsi que de la partie nord-ouest des basses-terres du St-Laurent où on observe des différences marquées entre le relief de surface du sol et celui du roc. Dans les basses-terres, des dépressions dans la surface du roc sont aussi associées aux vallées enfouies sous certains cours d'eau, notamment pour les rivières du Chêne, Beaurivage, paléo-Chaudière, paléo-Etchemin, Boyer et du Sud. Dans le cas des rivières Chaudière et Etchemin, leur présente position dans les basses-terres ne correspond pas à celles qu'elles ont occupées dans l'histoire géologique. On retrouve donc les dépressions de la surface du roc associées aux positions anciennes (« paléo ») de ces vallées et non à leur position actuelle.

Livrable PACES no. 17 : CONDITIONS DE CONFINEMENT

Le confinement d'un aquifère est lié à son recouvrement par une couche de matériaux peu perméables (aquitard) qui isole l'eau souterraine qu'il contient. La nature et l'épaisseur des dépôts meubles ou des unités géologiques déterminent le niveau de confinement des aquifères, qui va de non confiné (nappe libre), à semi-confiné (nappe semi-captive) et jusqu'à confiné (nappe captive). Les dépôts meubles fins (silt et argile) sont des matériaux confinants. Lorsque les matériaux fins qui recouvrent un aquifère sont plus ou moins perméables, discontinus ou de faible épaisseur, on considère l'aquifère sous-jacent comme étant semi-confiné. En l'absence de couverture de dépôts meubles, ou lorsque ceux-ci sont perméables, les conditions seront libres. Le confinement influence les divers processus dynamiques et chimiques de l'eau souterraine, en limitant ou favorisant la recharge de l'aquifère ou encore sa protection par rapport à une contamination provenant de la surface.

En Chaudière-Appalaches, trois types de conditions de confinement ont été définies à partir des épaisseurs de sédiments fins estimées pour l'aquifère rocheux régional : nappe libre, semi-captive et captive. Trois catégories de conditions semi-captives distinguent les différentes séquences de sédiments reliées à ce type de condition. Les conditions captives (en vert) couvrent des étendues très restreintes de la région d'étude (603 km² ; 3.8%), principalement dans la partie nord-ouest, entre la limite marine et le fleuve Saint-Laurent, ainsi que dans les portions avals des rivières Boyer et du Sud. La distribution spatiale des conditions semi-captives (trois tons de beige) est assez semblable à celle des conditions captives, mais les conditions semi-captives couvrent une plus grande étendue au nord-ouest de la limite marine et particulièrement à l'intérieur des vallées appalachiennes, pour un total de 3158 km² (20.1% de la région). Ce sont les conditions libres qui prévalent sur la très grande majorité de la région d'étude (11 982 km² ; 76.1%). En dehors de la limite marine, on retrouve des conditions libres sur pratiquement tout le territoire, excepté dans les vallées appalachiennes. Les conditions libres dominent aussi la partie est des basses-terres du St-Laurent, entre Lévis et St-Jean-Port-Joli, où les accumulations de sédiments sont restreintes, particulièrement les sédiments fins.

Livrable PACES no. 18 : CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES

Le livrable PACES no. 18 définit les contextes hydrogéologiques sur la base de la séquence verticale de matériaux meubles recouvrant l'aquifère rocheux. Ces contextes peuvent être générés sur la base des données de forages, de la géologie du Quaternaire (livrable PACES no. 12), de la géologie du roc (livrable PACES no. 13), des épaisseurs de sédiments (livrable PACES no. 15) et des levés géophysiques. Ces séquences de sédiments, de même que des critères géomorphologiques, distinguent les grands contextes hydrogéologiques

La **carte 18** présente les trois grands contextes hydrogéologiques définis en Chaudière-Appalaches : 1) les basses-terres du St-Laurent, 2) les vallées appalachiennes et 3) les hautes-terres appalachiennes. Les basses-terres du St-Laurent forment une bande de 10 à 30 km de largeur entre la bordure du fleuve Saint-Laurent et la limite marine (180 m NMM). Dans ce contexte, l'épaisseur totale de sédiments va de nulle jusqu'à plus de 30 m. De la surface au roc, ces sédiments forment une séquence typique de sable mince (parfois absent) sur de l'argile, parfois épaisse (10-15 m), reposant sur du till ou directement sur le roc. Les vallées appalachiennes sont reliées aux principaux cours d'eau qui incisent le relief montagneux à des élévations généralement inférieures à 350 m NMM. On y retrouve des séquences de sédiments semblables à celles des basses-terres, à l'exception qu'on y retrouve par endroits des sédiments anciens et que le roc à la base des vallées peut être altéré. De plus, on peut y retrouver des intervalles de sédiments granulaires plus grossiers, soit en profondeur ou en bordure des vallées. En dehors des vallées, les hautes-terres appalachiennes occupent la majorité des Appalaches où elles montrent des topographies de collines ou de montagnes, pouvant atteindre une élévation de 900 m NMM. Les hautes-terres sont typiquement recouvertes d'une mince (< 5 m) couche de till relativement perméable sur le roc. On y retrouve aussi des accumulations localement plus importantes de sédiments fluvio-glaciaires.

Les séquences de sédiments typiques montrées sur la **carte 18** ont été définies à partir des épaisseurs estimées des sédiments : 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 till sur roc. Les séquences sont distinctes dans les différents contextes hydrogéologiques. La distribution de ces séquences sur la **carte 18** indique toutefois une prédominance de la séquence sédiments indifférenciés sur roc dans tous les contextes. Cette carte 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 (livrable PACES no. 12) et les épaisseurs des sédiments (livrable PACES no. 15).

Livrable PACES no. 19 : PIÉZOMÉTRIE DANS LES DÉPÔTS MEUBLES

La piézométrie, aussi appelé niveau piézométrique, est une mesure de l'élévation du niveau de l'eau souterraine dans un puits. Lorsqu'il y a suffisamment de puits dans un secteur ou une région, il est possible d'interpoler ces niveaux pour créer une carte piézométrique qui illustre la tendance de l'élévation des niveaux piézométriques sur le territoire. Un peu comme la carte topographique l'est pour l'élévation du sol, la carte piézométrique représente les variations de l'élévation du niveau de l'eau dans un aquifère donné sous la surface du sol. La piézométrie indique le sens de l'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère, qui va des zones à piézométrie plus élevée vers celles où la piézométrie est plus basse.

En Chaudière-Appalaches, 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.

Livrable PACES no. 20 : PIÉZOMÉTRIE DANS LE ROC

La piézométrie, aussi appelé niveau piézométrique, est une mesure de l'élévation du niveau de l'eau souterraine dans un puits. Lorsqu'il y a suffisamment de puits dans un secteur ou une région, il est possible d'interpoler ces niveaux pour créer une carte piézométrique qui illustre la tendance de l'élévation des niveaux piézométriques sur le territoire. Un peu comme la carte topographique l'est pour l'élévation du sol, la carte piézométrique représente les variations de l'élévation du niveau de l'eau dans un aquifère donné sous la surface du sol. La piézométrie indique le sens de l'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère, qui va des zones à piézométrie plus élevée vers celles où la piézométrie est plus basse.

La **carte 20** montre des plages d'élévation des niveaux d'eau allant de moins de 30 m à plus de 730 m. Cette carte piézométrique régionale donne une vue d'ensemble de l'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux régional et permet de constater que les conditions d'écoulement sont très distinctes dans les contextes hydrogéologiques de la Chaudière-Appalaches. Dans les basses-terres, les très faibles changements des niveaux d'eau indiquent que l'écoulement y est généralement faible et se fait généralement vers le fleuve Saint-Laurent. Au contraire, dans les Appalaches au sud de la limite marine, les fortes variations de la topographie donnent des niveaux d'eau beaucoup plus élevés et variables. L'élévation topographique maximale se trouve au centre des Appalaches et cela crée une grande ligne de partage des eaux souterraines orientée du sud-ouest au nord-est. Du côté nord de la ligne de partage, l'eau souterraine s'écoule généralement vers le nord, tandis que du côté sud l'écoulement se fait vers le sud. Plusieurs vallées orientées perpendiculairement à la topographie créent toutefois des directions d'écoulement opposées à l'écoulement régional. L'écoulement est convergent vers les vallées appalachiennes, quelle que soit leur orientation. De plus, l'orientation de l'écoulement n'est pas régulière parce que la topographie des Appalaches est très morcelée par un dense réseau de cours d'eau qui sont des exutoires de l'eau souterraine qui a circulée dans l'aquifère rocheux régional. L'écoulement de l'eau souterraine dans les Appalaches doit ainsi être rapide et les voies d'écoulement généralement assez courtes. Il en découle que le temps de résidence de l'eau souterraine devrait être généralement court, ce qui est confirmé par la géochimie de l'eau souterraine.

Livrable PACES no. 21 : PARAMÈTRES HYDRAULIQUES

Les propriétés hydrauliques d'un aquifère sont généralement obtenues en pompant l'eau d'un puits et en y mesurant les variations du niveau d'eau. La conductivité hydraulique (K ; m/s) est la capacité d'un milieu géologique à permettre l'écoulement de l'eau souterraine dans les pores des dépôts meubles ou les fractures d'un aquifère rocheux. La transmissivité (T ; m²/s) est le produit de la conductivité hydraulique et de l'épaisseur verticale saturée b (m) de l'aquifère ($T = K \cdot b$). Enfin, la capacité spécifique (CS , Q/s; m²/s) est le rapport entre le débit d'un puits (Q ; m³/s) et l'abaissement du niveau d'eau (« rabattement » s ; m) dans le puits par rapport au niveau mesuré en l'absence de pompage. La capacité spécifique est une propriété d'un puits de pompage qui permet une estimation indirecte et approximative de la transmissivité T . Puisque les données de capacité spécifique CS sont beaucoup plus courantes que celles sur T ou K , la capacité spécifique est fréquemment utilisée pour l'estimation de T , puis K .

En Chaudière-Appalaches, l'analyse a été faite des données de capacité spécifique associées à 9 061 puits terminés dans le roc et de 274 puits installés dans dépôts meubles. Les valeurs de K du roc vont généralement de 10^{-8} à 10^{-5} m/s. Il y a un écart moyen d'environ 2 à 3 ordres de grandeur entre les K des aquifères granulaires et les K de l'aquifère rocheux régional. Les valeurs de K pour l'aquifère rocheux régional montrent 1) que K diminue rapidement avec la profondeur dans le roc, 2) que la distribution de la profondeur des puits dans le roc est très semblable pour les puits dans les Appalaches (20-40 m) mais plus importante dans la Plateforme du St-Laurent (30-90 m), et 3) que la différence entre les valeurs moyennes de K pour différentes unités géologiques n'est pas importante, surtout considérant la variabilité de K . Le tableau 4.1 du livrable PACES no. 21 montre les plages de valeur de K et de T pour les différentes unités géologiques du roc présentes en Chaudière-Appalaches.

Livrable PACES no. 22 : VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES (DRASTIC)

La vulnérabilité d'un aquifère est sa sensibilité à la pollution de l'eau souterraine à partir de l'émission de contaminants à la surface du sol. Une carte de vulnérabilité permet donc d'identifier les zones les plus vulnérables à la contamination et de fournir un outil d'aide à la prise de décision pour aménager le territoire tout en protégeant la ressource en eau souterraine. La carte de vulnérabilité permet 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. Le programme PACES spécifie que la méthode DRASTIC doit être utilisée pour évaluer la vulnérabilité. La méthode DRASTIC permet le calcul d'un indice à partir de 7 paramètres, chacun correspondant à l'une des lettres du mot « DRASTIC ».

En Chaudière-Appalaches, la méthode DRASTIC a été appliquée uniquement pour l'aquifère rocheux régional puisque les aquifères granulaires n'y sont pas assez étendus pour être cartographiés à l'échelle régionale. Deux présentations différentes des cartes de vulnérabilité ont été faites : 1) en utilisant les intervalles de valeurs des indices DRASTIC et les couleurs standards de la méthode (carte 22A), et 2) en utilisant des plages de valeurs relatives basées sur les percentiles des indices DRASTIC rencontrés dans la région, ce qui permet de représenter la vulnérabilité relative des conditions de la région (carte 22B).

Les basses-terres du St-Laurent ont les plus grandes étendues (60%) de vulnérabilité relative faible ou même très faible. La vulnérabilité est particulièrement faible sur de grandes étendues l'ouest de Lévis où il y a des sédiments fins épais. On trouve tout de même des vulnérabilités relatives élevées dans plusieurs secteurs où les conditions sont libres et la recharge importante. Dans les hautes-terres appalachiennes, puisqu'elles occupent la majorité de la région d'étude, on retrouve en majorité des zones à vulnérabilité moyenne. Les hauts topographiques les plus importants n'ont toutefois que des vulnérabilités faibles parce que les pentes y sont fortes, la recharge modérée et la profondeur à la nappe plus importante. Les plus fortes vulnérabilités des hautes-terres sont présentes en marge des plus hauts sommets, dans les secteurs de plateaux ou en bordure des vallées, où se trouvent aussi parfois d'intenses activités anthropiques. C'est dans les vallées appalachiennes qu'on trouve proportionnellement le plus de zones à vulnérabilité élevée ou très élevée. Les plus fortes vulnérabilités dans les vallées se retrouvent toutefois dans des secteurs où la densité de population est moindre qu'ailleurs en Chaudière-Appalaches. La vulnérabilité dans les vallées est plutôt moyenne, ou même faible, là où on retrouve de plus grandes épaisseurs de sédiments fins et des conditions semi-captives. Toutefois, la vulnérabilité est souvent élevée, ou même très élevée, en bordure des vallées où se trouvent souvent des activités anthropiques assez intenses ainsi que de l'agriculture.

Livrable PACES no. 23 : ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

L'intensité des activités anthropiques peut poser un risque pour la qualité de l'eau souterraine car une plus grande intensité peut augmenter la possibilité d'émission de contaminants en surface. Le livrable PACES no. 23 présente l'indice de densité des activités anthropiques et vise principalement à faire ressortir les tendances régionales de la pression que ces activités pourraient exercer sur la qualité de l'eau souterraine. Le format cartographique du livrable représente la densité des activités pondérée par le poids de l'impact potentiel des activités anthropiques pour la région d'étude. Cet indice ne représente qu'une indication et il comporte un certain niveau d'incertitude. Une validation de la nature des activités dans un secteur à fort indice de densité des activités anthropiques sera donc nécessaire avant d'entreprendre des actions visant à réduire les pressions sur la qualité de l'eau souterraine.

Le livrable PACES no. 23 montre qu'il y a trois grands axes avec des indices plus élevés d'activités anthropiques en Chaudière-Appalaches : 1) la bordure du fleuve Saint-Laurent, de Sainte-Croix à Saint-Jean-Port-Joli, 2) la vallée de la rivière Chaudière, entre Lévis et Saint-Georges, et 3) entre Thetford Mines et la vallée de la Chaudière. Il y a aussi de forts indices au nord-ouest de Saint-Pamphile. Ces activités anthropiques potentiellement polluantes doivent être mises en relation avec l'usage de l'eau souterraine et la vulnérabilité de l'aquifère dans les secteurs à fort indice d'activité anthropique. Il faut noter que cet indice ne tient pas compte des activités agricoles qui peuvent aussi avoir une incidence sur la qualité de l'eau souterraine.

Livrable PACES no. 24 : QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE (POTABILITÉ)

L'usage de l'eau souterraine dépend de sa qualité, c'est-à-dire de la concentration dans l'eau de différents composés chimiques, par rapport à des critères de qualité fixés par les instances gouvernementales. Dans le cas du livrable PACES no. 24, les critères de la qualité de l'eau considérés sont les concentrations maximales acceptables (CMA) pour que l'eau soit potable. La consommation d'une eau dont la concentration d'un composé chimique dépasse la concentration maximale acceptable pose un risque pour la santé.

En Chaudière-Appalaches, une campagne d'échantillonnage d'eau souterraine a permis de récolter 131 échantillons provenant principalement de puits résidentiels qui ont fait l'objet d'analyses chimiques. Presque 200 autres analyses chimiques ont aussi été obtenues d'études antérieures ou en voie de réalisation dans la région d'étude. La densité d'échantillonnage relativement faible donne un portrait régional mais ne permet pas de préciser exactement les zones où des dépassements de critères pourraient être rencontrés. De plus, la géochimie de l'eau varie d'un endroit à l'autre, de sorte que les résultats des analyses chimiques permettent de donner des indications sur la « probabilité » de dépassements de critères, mais la situation réelle doit être définie pour chaque puits individuellement.

Des dépassements par rapport à des normes pour l'eau potable relatives à la santé ont été observés pour certains composés. Il n'y a pas de problème significatif de qualité relié aux métaux puisque Cd, Pb et Sb n'ont qu'un ou deux dépassements chacun. Par contre, il y a des problématiques de potabilité de l'eau reliées à la présence naturelle d'arsenic (As), de fluorures (F⁻) et de baryum (Ba) dans l'eau souterraine. Les dépassements de la CMA pour l'arsenic affectent 4,2% de l'ensemble des puits. Ces dépassements sont en majorité associés aux aquifères rocheux (10 dépassements) et sont localisés dans une zone géologique spécifique des Appalaches. Les problématiques en fluorures et en baryum affectent respectivement 3,3% et 1,5% des puits étudiés et sont aussi associées majoritairement aux aquifères au roc situés sous la limite marine de la mer de Champlain, particulièrement près du fleuve Saint-Laurent. La présence de fortes concentrations en nitrite-nitrates est généralement associée à l'agriculture mais, malgré l'importance de cette activité en Chaudière-Appalaches, un seul échantillon a présenté des concentrations excédant le critère de potabilité et les concentrations en nitrite-nitrates atteignent rarement des niveaux importants.

Livrable PACES no. 25 : QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE (ESTHÉTIQUE)

Le livrable PACES no. 24 porte sur la qualité de l'eau en lien avec les critères de potabilité tandis que le livrable PACES no. 25 compare la qualité de l'eau avec des objectifs esthétiques. La consommation d'une eau dont la concentration d'un composé chimique dépasse les objectifs esthétiques peut entraîner des désagréments (goût, odeur, couleur) mais n'a pas d'incidence sur la santé.

Le texte explicatif du livrable PACES no. 24 décrit le programme d'échantillonnage de puits et les analyses chimiques disponibles en Chaudière-Appalaches. La comparaison des résultats analytiques avec les objectifs d'ordre esthétique montre des dépassements pour 9 paramètres : chlorures (Cl), sodium (Na), matières dissoutes totales (MDT), dureté, fer (Fe), manganèse (Mn), sulfures (S^{2-}), pH et méthane. Les problématiques reliées aux objectifs d'ordre esthétique sont nombreuses, bien qu'elles n'affectent pas la potabilité de l'eau. Près de la moitié des puits analysés présentent une trop grande concentration en manganèse (Mn). Notons aussi que le pH est soit trop acide ou trop alcalin pour 23% des puits. Les pH trop élevés sont surtout associés aux aquifères granulaires. D'autres critères esthétiques présentent des dépassements : les chlorures et le sodium ont quelques dépassements, surtout en bordure du fleuve; l'eau est souvent dure ou a trop de solides dissous totaux, particulièrement en bordure du fleuve et dans le bassin de la rivière Chaudière; et il y a des dépassements en sulfures et en aluminium par endroits. Au nord-ouest de la région à l'intérieur de la zone prospective pour le gaz de shale, 44 (59%) des 74 échantillons d'eau analysés ont montré des concentrations en méthane quantifiables, dont 11 (15%) à des valeurs excédant le seuil d'alerte de 7 mg/L. Le méthane n'a pas d'incidence sur la santé. Ce méthane est d'origine biogénique prédominante, c'est-à-dire qu'il a été formé en place à faible profondeur.

Livrable PACES no. 26 : UTILISATION DE L'EAU

Les besoins en eau pour différents usages peuvent être comblés par différentes sources d'approvisionnement, selon la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. De façon générale, les utilisateurs s'alimentent en eau de surface ou en eau souterraine par l'intermédiaire des systèmes publics (par exemple des aqueducs) ou de systèmes privés comme des puits au roc. Au Québec, les données sur l'utilisation de l'eau et les sources d'approvisionnement proviennent soit d'organismes publics (ministères provinciaux, municipalités, MRC, régies inter-municipales, etc.) ou d'entreprises privées.

Pour la Chaudière-Appalaches, le tableau 5.3 du rapport résume plusieurs informations sur l'usage de l'eau à l'échelle des MRC et le rapport présente plusieurs cartes donnant un portrait complet de l'utilisation de l'eau. La carte 26A montre la source de l'approvisionnement en eau municipal, qui provient de l'eau souterraine pour 84 municipalités (62%), alors que 14 municipalités (10%) utilisent l'eau de surface ou une source mixte et 38 municipalités (28%) n'ont pas de réseau. La carte 26B illustre l'utilisation totale d'eau par MRC et montre que la consommation totale d'eau est généralement corrélée à la population des MRC, avec des exceptions vers le haut et le bas. Globalement, l'eau souterraine comble un peu plus que 40% de l'utilisation totale d'eau, mais cette proportion est très variable. La carte 26C présente l'utilisation d'eau souterraine par MRC et les proportions des usages résidentiel, agricole et industriel-commercial-institutionnel (ICI). L'approvisionnement par l'eau souterraine est en moyenne de 42%, et varie entre 29% pour la MRC de Bellechasse et 72% pour la MRC de L'Islet. En termes absolus, ce sont les MRC de la Nouvelle-Beauce (8.9 Mm³), de Lotbinière (8.1 Mm³) et de Bellechasse (7.4 Mm³) qui font la plus grande consommation d'eau souterraine. Les trois usages de l'eau souterraine consommée ont souvent des proportions équivalentes. Toutefois, on peut remarquer la faible proportion d'usage ICI pour la MRC de Montmagny (4.7%), tandis que dans la MRC Robert-Cliche cette proportion d'usage ICI est de 53%. C'est la MRC de Bellechasse qui a la plus grande proportion d'usage agricole (46%) de l'eau souterraine, alors que cette proportion n'est que de 13% pour la MRC des Etchemins. La proportion de l'usage résidentiel d'eau souterraine est plus important dans les MRC des Etchemins (69%) et de Beauce-Sartigan (57%). La carte 26D montre le pourcentage de l'utilisation résidentielle de l'eau souterraine par municipalité. Ce sont les municipalités situées au sud-est des MRC de l'Islet, Montmagny et des Etchemins qui ont les plus grandes proportions d'utilisation résidentielle de l'eau souterraine. Au contraire, les municipalités situées dans un axe allant de Lévis à Saint-Georges (mais excluant Saint-Georges) ont plus souvent de faibles proportions d'usage résidentiel de l'eau souterraine. La carte 26E montre la densité des puits par municipalité. Sans surprise, la densité des puits tend à refléter aussi la densité de population. On voit ainsi des axes avec de fortes densités de puits entre Sainte-Croix et Montmagny, en bordure du fleuve Saint-Laurent, entre Lévis et Saint-Georges, en bordure de la vallée de la rivière Chaudière, et aussi entre Saint-Georges et Thetford Mines. La carte 26F présente l'utilisation de l'eau par rapport à la recharge par municipalité pour donner une indication sur les conditions durables de l'exploitation de l'eau souterraine. Cette carte montre que la proportion de la recharge correspondant à l'exploitation de l'eau souterraine est généralement inférieure à 15% de la recharge. Ces proportions d'utilisation de la recharge apparaissent a priori permettre une exploitation soutenable de la ressource en eau souterraine. Il y a toutefois 6 municipalités dont la proportion de l'exploitation dépasse 15%, dont deux municipalités dépassent 25%. Ces seuils d'exploitation indiquent qu'une évaluation plus détaillée de l'approvisionnement en eau souterraine pourrait être prudente.

Livrable PACES no. 27 : EMBLEMES DES STATIONS MÉTÉO, HYDROMÉTRIQUES ET DE SUIVI DE LA NAPPE

Le livrable PACES no. 27 présente la répartition spatiale des stations de mesure permanentes pour la météorologie, l'hydrométrie (débit des principaux cours d'eau) et la piézométrie (niveau de l'eau souterraine).

En Chaudière-Appalaches, le CEHQ a opéré ou opère 32 stations de jaugeage des débits, parmi lesquelles 21 stations sont inactives, incluant 6 qui possèdent un historique de données de 3.5 à 9 ans se terminant après l'année 2000. Des 11 stations encore ouvertes, 7 stations possèdent un historique de mesures d'une durée de plus de 30 ans.

La Chaudière-Appalaches compte 38 stations météorologiques actives, dont 19 stations actives possédant au moins 30 ans de données (depuis 1980). De plus, dix (10) stations sélectionnées en périphérie de la zone d'étude ont servi à générer certains des livrables du projet.

Avant la réalisation du projet PACES en Chaudière-Appalaches, le MDDELCC avait dans son réseau 21 stations de suivi (puits de surveillance) du niveau d'eau dans, ou tout juste en bordure de la région à l'étude. Des forages conventionnels ont permis la mise en place de 8 autres puits d'observation au roc dans le cadre du présent projet. Le MDDELCC a intégré les nouveaux puits d'observation à son réseau de suivi après la fin du projet PACES en avril 2015.

Livrable PACES no. 28A : ZONES POTENTIELLES DE RECHARGE ET DE RÉSURGENCE PRÉFÉRENTIELLES

L'évaluation de la recharge est nécessaire pour définir les ressources en eau souterraine disponibles, puisque les débits qui peuvent être exploités de façon durable dépendent grandement du renouvellement de l'eau souterraine, qui est la recharge. Cependant, la quantité d'eau qui s'infiltré pour recharger les aquifères est un des paramètres hydrogéologiques les plus difficiles à évaluer.

En Chaudière-Appalaches, les zones préférentielles de recharge et de résurgence, présentées sur la carte du livrable no. 28a avec la piézométrie (livrable no. 20) en arrière-plan, ont été définies en utilisant deux types de critères : une recharge importante au-dessus de 250 mm/an et la présence d'un dôme piézométrique hors des zones captives. À l'inverse, les zones de résurgence préférentielles ont été identifiées dans les dépressions de la surface piézométrique et les zones de nappe affleurante hors des zones captives avec une recharge faible (< 50 mm/an). Ces dépressions correspondent souvent à la présence de cours d'eau. La carte 28A montre aussi la nature du lien entre l'aquifère rocheux et les cours d'eau qui a été définie sur la base des conditions de confinement (carte 17) et de l'épaisseur de la couche argileuse (carte 15B). Dans les basses-terres du St-Laurent, de grandes étendues ont une recharge très faible (< 15 mm/an), mais on retrouve tout de même des zones locales de recharge associées à des affleurements du roc où les conditions sont libres. Il y a un contraste marqué entre les parties ouest et est des basses-terres, de part et d'autre de Lévis : à l'ouest on retrouve très peu de zones de résurgence et les liens entre l'aquifère rocheux régional et les cours d'eau sont souvent diffus ou inexistants; à l'est les cours d'eau sont souvent en lien direct avec l'aquifère et représentent des exutoires de l'eau souterraine. Au-delà de la limite marine, à l'intérieur des Appalaches, on retrouve sur les hauts topographiques des zones de recharge importantes favorisées par de faibles épaisseurs de sédiments assez perméables sur le roc et des conditions libres. Par contre, dans les vallées appalachiennes où il y a des accumulations importantes de sédiments, généralement fins, et des conditions semi-captives, la recharge peut être très faible (<15 mm/an). Les vallées appalachiennes représentent toutefois d'importantes zones de résurgence, même si parfois le lien entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux est diffus.

Livrable PACES no. 28B : RECHARGE DISTRIBUÉE

L'évaluation de la recharge est nécessaire pour évaluer les ressources disponibles en eau souterraine, puisque les débits qui peuvent être exploités de façon durable dépendent grandement du renouvellement de l'eau souterraine, qui est la recharge. Cependant, la quantité d'eau qui s'infiltre pour recharger les aquifères est un des paramètres hydrogéologiques les plus difficiles à évaluer.

En Chaudière-Appalaches, la recharge de l'aquifère rocheux régional a été estimée à l'aide du logiciel HELP (*Hydrological Evaluation of Landfill Performance*). Ce logiciel intègre plusieurs données sur le climat, la végétation, l'occupation du territoire et sur les propriétés des sols, des dépôts et du roc. En plus d'estimer la recharge sur l'ensemble du territoire, HELP calcule aussi les autres paramètres du bilan hydrologique, soient l'évapotranspiration des végétaux, le ruissellement de l'eau à la surface du sol et en profondeur. Globalement, avec 166 mm/an en moyenne pour l'ensemble de la Chaudière-Appalaches, la recharge de l'aquifère rocheux régional peut être considérée relativement importante. Toutefois, la répartition spatiale de cette recharge est très variable à l'intérieur même des contextes hydrogéologiques. La recharge moyenne est de 85 mm/an dans les basses-terres, significativement moins que dans les hautes-terres appalachiennes (186 mm/an) et les vallées appalachiennes (192 mm/an). On trouve tout de même localement des zones de recharge dans les basses-terres où le roc est peu profond ou affleurant et où les conditions sont libres. À l'intérieur des Appalaches, au-delà de la limite marine, une recharge importante se produit sur presque tout le territoire, que ce soit dans les hautes-terres ou les vallées, sauf où il y a accumulation de sédiments fins dans les vallées. Le livrable 28A montre où se trouvent les zones de recharge et d'émergence de l'eau souterraine.