

Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Estrie (PACES Estrie)

PORTRAIT DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE EN ESTRIE, QUÉBEC, CANADA (RAPPORT FINAL - VERSION RÉVISÉE)

Mélanie Raynauld, François Huchet, Jean-Marc Ballard, Élise Colléau, Renaud Delisle, Jimmy Mayrand, Raphaël Mathis, Olivier Caron, Harold Vigneault, Roxane Lavoie, Julie Grenier, Virginie Vergnaud, René Lefebvre

Soumis au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines

Projet réalisé par l'INRS en collaboration avec le COGESAF

Rapport de recherche R2091

Mai 2024



© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2024
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-925559-03-0 (version numérique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2025

Équipe de réalisation

INRS – Centre ETE

Personnel régulier :

René Lefebvre, professeur
Mélanie Raynauld, professionnelle de recherche
François Huchet, professionnel de recherche
Jean-Marc Ballard, professionnel de recherche
Harold Vigneault, professionnel de recherche
Jean-Sébastien Gosselin, professionnel de recherche

Étudiants et stagiaires :

Élise Colléau, maîtrise bidualmante, INRS – Université de Rennes 1
Julie Domaine, stagiaire master 2, Université de Rennes 1
Thomas Vincent, stagiaire master 1, Université de Rennes 1
Raphaël Mathis, étudiant à la maîtrise, INRS – Centre ETE
Marie-Pierre Champagne, étudiante à la maîtrise, INRS – Centre ETE
Guillaume Légaré-Couture, étudiant au doctorat, INRS – Centre ETE
Marc Laurencelle, stagiaire postdoctoral, INRS – Centre ETE

UQAM

Olivier Caron, professeur

Université Laval

Roxane Lavoie, professeure
Renaud Delisle, maîtrise en aménagement du territoire
Jimmy Mayrand, maîtrise en aménagement du territoire

OSUR (Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes)

Virginie Vergnaud, ingénieure de recherche

COGESAF

Julie Grenier
Nicolas Bousquet

COBARIC

Yannick Bourque

Commission géologique du Canada

Michel Parent, chercheur

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 de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Québec (MELCCFP). Il peut être reproduit en tout ou en partie à des fins éducationnelles ou non lucratives s'il est cité de façon appropriée.

Ainsi, pour fins de référence, ce document devrait être cité comme suit :

Raynauld, M., Huchet, F., Ballard, J.-M., Colléau, É., Delisle, R., Mayrand, J., Mathis, R., Caron, O., Vigneault, H., Lavoie, R., Grenier, J., Vergnaud, V., Lefebvre, R. (2024). Portrait des ressources en eau souterraine en Estrie, Québec, Canada. Rapport final – Version révisée, Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Estrie (PACES Estrie), projet réalisé par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) en collaboration avec le Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF), rapport de recherche R2091 soumis au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs en mars 2022, version révisée en mai 2024, 195 p. et annexes, DOI : 10.5683/SP3/GEFGVG.

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 (INRS)
Centre Eau Terre Environnement (ETE)
490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9 CANADA
T 418 654-4677

[inrs.ca](https://www.inrs.ca)

RÉSUMÉ

Ce projet s'inscrit dans le cadre des Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) du Québec qui sont sous la responsabilité du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) du Québec. Ces projets visent à faire un portrait de la ressource en eau souterraine du Québec municipalisé, dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité. Entre 2009 et 2015, treize (13) territoires ont été couverts par les différentes universités responsables de projets régionaux. La dernière phase de projets, réalisée entre avril 2018 et mars 2022 a permis de pratiquement finaliser la couverture des régions du Québec municipalisé. Pour cette 4^e phase, l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) était responsable de la réalisation du PACES Estrie.

Le PACES Estrie a été principalement soutenu financièrement par le MELCCFP ainsi que par des contributions monétaires et en nature de la part des partenaires régionaux du projet, soient la ville de Sherbrooke et les cinq (5) municipalités régionales de comté (MRC) comprises dans la région d'étude : Coaticook, Le Granit, Le Haut-Saint-François, Le Val-Saint-François et Memphrémagog. La région d'étude couvre en partie les territoires de deux (2) organismes de bassin versant (OBV) qui sont aussi partenaires de la réalisation du projet, soient le Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF) et le Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC).

Le PACES Estrie a pour objectif général de faire le portrait des ressources régionales en eau souterraine. Le projet a aussi des objectifs spécifiques : 1) accompagner les municipalités de l'Estrie pour la protection de leurs prélèvements d'eau potable, 2) aborder des problématiques régionales d'intérêt particulier pour l'Estrie, notamment le potentiel des aquifères granulaires et la présence d'arsenic et de manganèse affectant la potabilité de l'eau, et 3) assurer le transfert des connaissances aux partenaires régionaux pendant la réalisation du projet.

Les limites de la région d'étude ont été définies de façon à assurer une couverture complète à la fois des MRC de l'Estrie impliquées dans le projet et de la partie amont du bassin versant de la rivière Saint-François qui n'avait pas été couverte par un PACES antérieur. Cette région d'étude représente une superficie de 10 691 km² dont 9 012 km² (84%) n'ont auparavant jamais été couverts par un ancien PACES limitrophe (Montérégie Est, Chaudière-Appalaches et Nicolet-Bas-Saint-François). Selon les données de 2020, la population totale dans les 97 municipalités recoupées au moins en partie par la région d'étude est de près de 330 000 habitants.

Le PACES Estrie a été réalisé en trois phases. La Phase I s'est déroulée d'avril 2018 à septembre 2019 et a impliqué la collecte des données existantes (forages, cartes, rapports, etc.) et l'identification des préoccupations régionales relatives à l'eau souterraine. La Phase II a chevauché un peu la Phase I en débutant au printemps 2019 pour être complétée en juin 2020. Cette 2^e phase a porté sur la réalisation de travaux de caractérisation sur le terrain, notamment l'installation de 10 puits d'observation du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) géré par le MELCCFP, l'échantillonnage de l'eau de 180 puits, et la réalisation d'une enquête de terrain sur les problématiques locales d'approvisionnement en eau auprès de 23 municipalités. Ces travaux ont été complétés par la saisie de données hydrogéologiques à partir de 210 rapports obtenus des municipalités de la région d'étude. De même, un sondage en ligne sur la consommation en eau et les réseaux de distribution a également apporté des informations complémentaires pour 74 des 97 municipalités du territoire. Enfin, la Phase III a couvert la période de juin 2020 à mars 2022 et a impliqué l'analyse et l'interprétation des données disponibles et la production des livrables cartographiques du projet.

La région d'étude est complètement comprise dans la région montagneuse des Appalaches. La topographie de la région d'étude est marquée par trois grandes vallées à des élévations généralement inférieures à 400 m. Ces vallées sont bordées par des hautes-terres qui peuvent atteindre près de 1 200 m d'élévation, particulièrement dans le secteur sud-est. Ainsi, le réseau hydrographique est bien développé et les principaux cours d'eau sont la rivière Saint-François et la rivière Chaudière. Plusieurs lacs importants se trouvent aussi dans la région d'étude (Memphrémagog, Massawippi, Lovering, Magog, Brompton, Aylmer, Saint-François et Mégantic). La région d'étude couvre la majorité du bassin versant de la rivière Saint-François, sauf le Bas-Saint-François, ainsi que la partie amont du bassin versant de la rivière Chaudière. La principale utilisation du territoire est forestière (78,6%), toutefois, l'agriculture qui occupe 17,4% du territoire est très importante dans les MRC de Coaticook et du Val-Saint-François. Les secteurs urbanisés sont relativement restreints (4,0%), mais ils dominent la ville de Sherbrooke et l'axe entre Magog et East Angus passant par Sherbrooke. On trouve aussi de grandes étendues de milieux humides couvrant près de 1500 km², soit près de 14% de la région d'étude.

Géologiquement, l'Estrie appartient à la partie nord des Appalaches dont trois zones sont présentes dans la région : la zone de Humber (externe et interne), la zone de Dunnage, puis la ceinture de Gaspé où se trouve l'intrusion du Mont-Mégantic. Les unités géologiques de la région d'étude comprennent une grande variété de lithologies : schistes, roches volcaniques, roches ultramafiques, shales et ardoises, et roches granitiques. Le grain des structures géologiques appalachiennes montre de fortes orientations du sud-ouest au nord-est. La géologie du Quaternaire dans la région d'étude est constituée d'une succession de dépôts meubles très variés, comprenant notamment des tills qui sont formés de grains de taille très variée allant de l'argile aux blocs, de dépôts glaciolacustres composés de sédiments fins silteux ou argileux et de sédiments fluvioglaciaires constitués de sables et graviers. En surface, la géologie du Quaternaire est dominée par une couverture de till qui tend à être mince sur les hauts topographiques où le roc peut aussi affleurer. L'unité de Quaternaire ancien qui est à la base de la séquence n'est pratiquement visible que dans les coupes naturelles et elle comprend un assemblage complexe de sous-unités incluant des tills, des sédiments silteux et argileux et des sables et graviers.

Le modèle géologique des dépôts meubles de Caron (2013) a été révisé et étendu dans le cadre du PACES Estrie, notamment sur la base d'une révision détaillée de la carte du Quaternaire. Ce modèle représente la distribution spatiale des épaisseurs des unités de dépôts meubles dans la région d'étude. Sur la base de ces unités géologiques, six unités hydrogéologiques (UH) ont été définies pour représenter les aquifères et les aquitards présents dans les dépôts meubles et le roc sous-jacent. L'unité hydrogéologique supérieure (UH1) est constituée de matériaux perméables mais cette unité n'est que localement assez épaisse pour constituer un aquifère. Les sédiments fins silteux et argileux (UH2) représentent un aquitard. Les sédiments fluvioglaciaires constituant notamment les eskers (UH3) ont un potentiel aquifère intéressant mais leur étendue est relativement limitée. Le Till de Lennoxville (UH4) est un autre aquitard qui recouvre pratiquement toute la région d'étude. Le Quaternaire ancien (UH5) à la base de la séquence est une unité plus complexe parce qu'elle contient des sous-unités pouvant constituer des aquitards et des aquifères. Plusieurs puits municipaux exploitent un aquifère dans le Quaternaire ancien. Enfin, le roc fracturé (UH6) est la seule unité constituant un aquifère régional continu. Les conditions de confinement ont été définies pour trois unités aquifères, soient le roc (UH6), le Quaternaire ancien (UH5) et les sédiments fluvioglaciaires (UH3). L'aquifère rocheux régional est généralement en conditions libres, surtout dans les hauts topographiques. Au contraire, le Quaternaire ancien est généralement en conditions semi-captives ou captives. Les conditions dans les sédiments fluvioglaciaires s'avèrent généralement libres.

La région d'étude présente ainsi deux contextes hydrogéologiques distincts, soient les vallées et les hautes-terres. Le contexte des vallées est présent dans les secteurs à plus faible élévation où l'épaisseur des sédiments est supérieure à 10 m et où les dépôts meubles ont un bon potentiel aquifère. Le contexte des hautes-terres est présent lorsque l'épaisseur des dépôts est inférieure à 10 m et alors seulement le roc constitue un aquifère. Les vallées peuvent avoir un bon potentiel aquifère dans le Quaternaire ancien exploité par plusieurs puits municipaux, mais il n'y a que l'aquifère rocheux qui est exploitable dans les hautes-terres. La conductivité hydraulique des aquifères granulaires est bonne alors que celle du roc est généralement faible et ne permet que rarement des débits de puits importants. Les aquifères granulaires et le roc sont en conditions captives dans les vallées alors que les conditions libres dominent dans les hautes-terres.

La recharge de l'aquifère rocheux se fait dans les hautes-terres et il y a peu de recharge dans les vallées. L'écoulement se fait des hautes-terres vers les vallées où l'eau souterraine émerge. Toutefois, les grands cours d'eau ne sont pas directement reliés à l'aquifère rocheux et l'émergence peut se faire en bordure de vallées plutôt que dans les cours d'eau. Les eaux de type « évolué » géochimiquement sont prévalentes dans les vallées. Ces eaux peuvent avoir des temps de résidence (âges) de plusieurs milliers d'années. Ce sont plutôt les eaux de type « recharge » qui dominent dans les hautes-terres. Ces eaux ont des âges modernes de moins de 60 ans. Les eaux évoluées dans les vallées ont des problématiques de dépassement des normes de potabilité pour le manganèse (Mn) et l'arsenic (As). Les eaux de recharge dans les hautes-terres peuvent avoir subi une dégradation anthropique de leur qualité, mais sans qu'il y ait des dépassements de normes de potabilité ou d'objectifs esthétiques. Les dépassements des critères de potabilité (concentrations maximales acceptables CMA) ou esthétiques ont été évalués pour 219 échantillons d'eau souterraine. Ce sont les 26,0% de dépassements de CMA pour le manganèse (Mn) et de 8,2% pour l'arsenic (As) qui représentent les plus importants problèmes de potabilité alors que les dépassements des autres CMA sont relativement peu importants. Les dépassements de critères esthétiques sont surtout reliés au manganèse, au fer ainsi qu'au pH.

Les zones de recharge se retrouvent généralement dans les hauts topographiques hors des vallées, particulièrement où le roc est affleurant. Globalement, la recharge de l'aquifère rocheux est de l'ordre de 200 à 300 mm/an sur la base de bilans hydrologiques basés sur les débits de cours d'eau et du modèle d'infiltration HELP. La recharge est toutefois variable, allant de moins de 50 mm/an dans les secteurs captifs jusqu'à plus de 300 mm/an lorsque le roc est en condition libre. Conséquemment, la vulnérabilité DRASTIC est relativement faible dans les principales vallées, mais des niveaux intermédiaires de vulnérabilité dominent toutefois la région d'étude. Des vulnérabilités plus importantes se trouvent dans des secteurs d'étendue restreinte, sauf dans le bassin de la rivière Chaudière où l'indice DRASTIC est élevé hors de la vallée.

Sur les 97 municipalités comprises dans la région d'étude, 49 possèdent un réseau de distribution d'eau potable alimenté par de l'eau souterraine, 18 réseaux sont alimentés par de l'eau de surface ou de source mixte, et 30 autres n'ont pas de réseau. Globalement, près de 73% de la population de 327 781 personnes est approvisionnée en eau à partir des réseaux municipaux. Toutefois, cette statistique est fortement biaisée par le fort taux de population desservie par la ville de Sherbrooke, alors que le taux est plus faible pour toutes les MRC. Toutefois, dans toutes les municipalités une grande partie de la population s'alimente en eau par des puits privés installés dans le roc. L'usage total de l'eau dans la région d'étude est de 110,2 Mm³/an, dont 25,2 Mm³/an (22,9%) provient de l'eau souterraine. Les prélèvements d'eau de surface sont dominés par les usages industriels, commercial et institutionnel (ICI) qui ne proviennent pas d'un réseau, alors que les usages résidentiels d'eau de surface proviennent tous d'un réseau, à l'opposé des usages agricoles qui ne sont pas alimentés par un réseau. L'approvisionnement hors réseau (privé) représente la majorité des prélèvements d'eau souterraine. Au total, l'usage résidentiel utilise plus de 48% des ressources en eau souterraine et l'usage agricole suit avec 29%.

De nombreux travaux spécifiques au PACES Estrie ont été réalisés afin de soutenir une gestion durable des ressources en eau souterraine. D'abord, des travaux ont été effectués pour aider à comprendre et à résoudre les questions scientifiques reliées aux ressources en eau souterraine dans la région d'étude. Ainsi, des travaux ont été faits afin de mieux définir le potentiel aquifère dans les vallées enfouies de l'Estrie. Ces travaux étaient d'autant plus nécessaires que l'aquifère rocheux ne permet généralement pas d'installer des puits à grand débit. Ces travaux, ainsi que plusieurs autres travaux du projet, ont grandement profité du développement d'un modèle géologique détaillé de la distribution spatiale des épaisseurs des unités géologiques dans la région d'étude. Ces travaux portant sur le potentiel d'exploitation de l'eau souterraine ont été complétés par des travaux visant à mieux définir et comprendre la problématique naturelle de qualité de l'eau souterraine reliée à la présence d'arsenic et de manganèse. De plus, des modélisations numériques ont permis d'avoir à la fois une meilleure compréhension de l'écoulement de l'eau souterraine dans le système aquifère et de son incidence sur l'âge de l'eau souterraine qui est fortement reliée à la présence d'arsenic et de manganèse dans l'eau souterraine. Enfin, des travaux définissant le risque de contamination de quinze (15) puits municipaux sur la base d'analyses chimiques et isotopiques ont permis d'indiquer l'importance relative de la protection des puits municipaux d'approvisionnement en eau.

Comme pour l'ensemble des projets du PACES réalisés entre 2018 et 2022, le PACES Estrie a profité de quatre ateliers de transfert des connaissances du RQES pendant la réalisation du projet. De plus, des travaux spécifiques au PACES Estrie ont été réalisés afin de développer un plan d'actions reliées aux ressources en eau souterraine qui pourra être intégré aux Plans directeurs de l'eau (PDE) des Organismes de bassin versant de la région d'étude (COGESAF et COBARIC). Ces travaux ont permis des échanges importants avec les acteurs de l'eau régionaux. Ces travaux ont été poursuivis afin d'accompagner deux MRC de la région d'étude (Coaticook et Le Val-Saint-François) dans l'amorce de l'intégration de l'eau souterraine dans les schémas d'aménagement et de développement (SAD). Les démarches développées en relation avec les PDE et les SAD pourraient servir d'exemples pour des démarches similaires dans d'autres régions couvertes par un projet PACES.

Plusieurs recommandations sont formulées à la suite de nos travaux. D'abord, par rapport à la problématique de qualité reliée à l'arsenic et au manganèse, nous recommandons de dédier des ressources à la sensibilisation des propriétaires de puits privés et à leur accompagnement pour faciliter l'analyse de l'eau de leur puits. Ensuite, considérant les problèmes reliés à la quantité d'eau souterraine soulevés par les municipalités, nous recommandons que des ressources soient dédiées pour améliorer la résilience des municipalités par rapport à leur approvisionnement en eau, particulièrement dans une perspective de changement climatique. Aussi, tel que réalisé dans le cadre du PACES Estrie, nous considérons que la définition d'actions dans les PDE des OBV est une étape initiale essentielle à la gouvernance et à la protection des eaux souterraines. Cette démarche participative étant reproductible, nous recommandons que des ressources soient dédiées à la réalisation d'une démarche similaire dans toutes les régions couvertes par un PACES. De même, sur la base de nos travaux avec deux MRC afin d'amorcer la considération de la protection de l'eau souterraine dans leur schéma d'aménagement, nous recommandons que des ressources soient dédiées à l'accompagnement des MRC dans l'adaptation de leur schéma et qu'une Orientation gouvernementale en matière d'aménagement du territoire (OGAT) reliée à la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) fournisse aux aménagistes des outils spécifiques pour la protection des eaux souterraines. Enfin, nous recommandons que l'évaluation géochimique du risque de contamination soit étendue à l'ensemble des puits municipaux du Québec et que des ressources permettent d'accompagner les municipalités dans la gestion et la protection de leur approvisionnement en eau souterraine.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) du Québec qui a assumé le principal soutien financier du projet. Nous remercions aussi tous les partenaires régionaux du projet pour leur collaboration à la réalisation du projet ainsi que leurs contributions financières et en ressources humaines :

- La ville de Sherbrooke ;
- Les municipalités régionales de comté (MRC) suivantes : Coaticook, Le Granit, Le Haut-Saint-François, Le Val-Saint-François et Memphrémagog.

Le projet profite aussi de la participation active à la réalisation du projet, notamment en ressources humaines, des organismes de bassins versants (OBV) suivants :

- Le Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF) ;
- Le Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC).

Les auteurs souhaitent aussi remercier les organismes suivants pour leur participation au projet :

- La Direction de santé publique (DSP) de l'Estrie ;
- La Fédération de l'UPA-Estrie (Union des producteurs agricoles) ;
- Le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) ;
- Le bureau régional de l'Estrie du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) ;
- La Direction régionale de l'Estrie du ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH) ;
- Laforest Nova Aqua inc. (LNA) ;
- Bureau Veritas, Laboratoire de services en environnement de Québec (anciennement Maxxam Analytics).

De même, ce projet bénéficie de la collaboration de plusieurs autres organismes, par l'intermédiaire de partage de données ou de connaissances, à savoir :

- 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 ;
- Les municipalités qui ont autorisé l'installation de puits du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) du MELCCFP sur une parcelle de terrain municipale : Canton de Stanstead, Coaticook, Compton, Magog, Nantes, Notre-Dame-des-Bois, Sherbrooke, Stornoway, Val-Joli et Weedon ;
- Les municipalités qui ont participé aux travaux sur la caractérisation géochimique et isotopique de l'eau de puits municipaux : Ascot Corner, Austin, Coaticook, Dudswell, La Patrie, Lac-Drolet, Lambton, Orford, Piopolis, Potton, Richmond, Sainte-Edwidge-de-Clifton, Saint-Herménégilde, Ville de Stanstead et Weedon ;
- Le ministère des Transports du Québec (MTQ) ;
- Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN) ;

- La Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MELCCFP ;

Les auteurs veulent aussi souligner la pleine contribution de l'organisme suivant dans la planification et l'organisation des ateliers de transfert des connaissances :

- Le Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES).

Enfin, nous remercions les résidents de l'Estrie qui ont participé au projet en donnant accès à leur propriété et à leur puits à l'été 2019.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	IV
REMERCIEMENTS	VIII
TABLE DES MATIÈRES	X
LISTE DES TABLEAUX	XII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES ANNEXES ÉLECTRONIQUES	XVII
1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte du projet.....	1
1.2 Objectifs du projet	2
1.3 Étapes de réalisation du projet.....	4
1.4 Équipe de réalisation et partenaires	6
1.5 Contenu et structure du rapport.....	8
1.6 Présentation de la région d'étude	9
2 ACQUISITION DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION	19
2.1 Travaux antérieurs	19
2.2 Compilation de l'information existante	21
2.3 Travaux de caractérisation	28
2.4 Saisie, validation et archivage des données.....	51
3 CONTEXTES GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES	57
3.1 Géologie du socle rocheux.....	57
3.2 Géologie du Quaternaire	60
3.3 Conditions de confinement.....	70
3.4 Contextes hydrostratigraphiques et hydrogéologiques	76
4 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES	77
4.1 Propriétés hydrauliques.....	77
4.2 Piézométrie et écoulement dans l'aquifère rocheux	80
4.3 Bilan hydrologique et recharge.....	81
4.4 Zones de recharge et de résurgence.....	93
4.5 Vulnérabilité des nappes	94
4.6 Géochimie de l'eau souterraine.....	97
4.7 Synthèse des conditions hydrogéologiques.....	109
5 RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE	111
5.1 Sources d'approvisionnement en eau	111
5.2 Usage des ressources en eau.....	113
5.3 Qualité de l'eau souterraine.....	117
5.4 Qualité de l'eau de surface.....	121
5.5 Gestion durable des ressources en eau souterraine.....	132
5.6 Réseau de surveillance et programme de suivi	133
6 TRAVAUX SPÉCIFIQUES	134
6.1 Potentiel aquifère dans les vallées enfouies.....	134

6.2	Modélisation 2D de l'écoulement et de l'âge de l'eau souterraine.....	141
6.3	Présence d'arsenic et de manganèse dans l'eau souterraine.....	149
6.4	Risque de contamination des puits municipaux.....	158
6.5	Démarche d'élaboration du plan d'action sur les eaux souterraines	166
6.6	Considération de l'eau souterraine dans l'aménagement du territoire	173
7	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	180
8	RÉFÉRENCES.....	182

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Phases et calendrier global de réalisation du PACES Estrie	4
Tableau 1.2 : Calendrier de réalisation des activités du volet 2 du PACES Estrie.....	4
Tableau 1.3 : Calendrier de réalisation des activités du volet 1 du PACES Estrie.....	5
Tableau 1.4 : Territoires couverts par les projets PACES dans la région d'étude	9
Tableau 1.5 : Territoires et populations des MRC et des régions administratives dans la région d'étude du PACES Estrie.....	10
Tableau 1.6 : Types et superficies des peuplements forestiers dans la région d'étude	14
Tableau 1.7 : Types et superficies des milieux humides dans la région d'étude	15
Tableau 1.8 : Études pédologiques à la base du livrable n° 11 (IRDA, 2018 a à g).....	17
Tableau 1.9 : Superficie et proportion (%) d'occupation du sol et d'affectation du territoire	18
Tableau 2.1 : Inventaire de l'acquisition des données existantes.....	21
Tableau 2.2 : Contenu des fichiers produits à la suite du traitement.....	24
Tableau 2.3 : Nombre de rapports collectés auprès des municipalités et des partenaires avec données extraites à partir de ces rapports.	25
Tableau 2.4 : Bilan des données acquises et intégrées à la base de données	27
Tableau 2.5 : Enjeux identifiés lors de la sélection des sites et intérêt potentiel de chaque nouveau puits d'observation du RSESQ.	30
Tableau 2.6 : Description des travaux de forages réalisés en 2019 en Estrie	33
Tableau 2.7 : Description des puits d'observation réalisés en 2019 en Estrie puis intégrés au RSESQ.....	33
Tableau 2.8 : Anciens puits du RSESQ présents sur la zone d'étude du PACES Estrie	34
Tableau 2.9 : Avis de résolution et ententes conclues avec les municipalités de l'Estrie pour les travaux de caractérisation géochimique et isotopique des puits municipaux.....	37
Tableau 2.10 : Purges réalisées selon le type de puits échantillonnés en Estrie en 2019.....	39
Tableau 2.11 : Description des puits échantillonnés en Estrie lors de la campagne de terrain de 2019	44
Tableau 2.12 : Description des échantillons, des duplicatas et des blancs analysés en Estrie lors de la campagne de terrain de 2019	44
Tableau 2.13 : Description des analyses effectuées par les divers laboratoires sur les échantillons prélevés en Estrie lors de la campagne de terrain de 2019.....	45
Tableau 2.14 : Description des analyses effectuées par les divers laboratoires sur les duplicatas prélevés en Estrie lors de la campagne de terrain de 2019.....	45
Tableau 2.15 : Taux de participation à l'enquête de terrain	47
Tableau 2.16 : Taux de participation des municipalités à l'enquête en ligne	48
Tableau 2.17 : Données ayant servies à la réalisation des livrables après validation	56

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Couverture des projets de connaissances sur les eaux souterraines réalisés entre 2009 et 2015 (ainsi que le projet de la rivière Châteauguay réalisé de 2003 à 2006) et en voie de réalisation entre 2018 et 2022 (modifiée d'après MELCC, 2020a). ...	1
Figure 1.2 : Territoire couvert par le projet PACES Estrie au regard des limites des organismes de bassins versants (OBV) recoupant la zone cartographiée du projet actuel. ...	11
Figure 1.3 : Région d'étude du PACES Estrie par rapport aux projets PACES antérieurs	12
Figure 2.1 : Schémas de construction des puits conventionnels au roc (Québec, 2014).....	31
Figure 2.2 : Illustrations des travaux de forage pour l'implantation des dix nouveaux puits d'observation intégrés au RSESQ	32
Figure 2.3 : Configuration type pour la mesure du suivi piézométrique dans un puits.....	34
Figure 2.4 : Illustrations de la campagne d'échantillonnage menée en Estrie à l'été 2019.....	40
Figure 2.5 : Production des couches d'information des aires de protection à partir des cartes extraites des rapports des firmes de consultants.	49
Figure 2.6 : Représentation du modèle O&M de la base de données.....	52
Figure 3.1 : Géologie des zones des Appalaches dans le sud du Québec (tiré de Schroetter, 2003, d'après Tremblay et Castonguay, 2002)	57
Figure 3.2 : Géologie des Appalaches et coupes géologiques dans la région d'étude (extrait de Tremblay et al., 2015).....	59
Figure 3.3 : Cadre stratigraphique des sédiments superficiels dans les bassins versants des rivières Chaudière et Saint-François (Caron, 2013; voir aussi Caron et al., 2007)	60
Figure 3.4 : Exemple de révision et de la nouvelle interprétation de la cartographie de la géologie du Quaternaire à l'aide du LiDAR (1) et de l'ancienne interprétation régionale (2) de Shilts (1981)	63
Figure 3.5 : Localisation des quatre coupes dans la région d'étude du PACES Estrie.....	68
Figure 4.1 : Résultats des simulations Monte Carlo calées pour chacune des quatre zones géologiques du territoire à l'étude dans le PACES Estrie : (a) Appalaches domaine externe, (b) Appalaches domaine interne, (c) Appalaches domaine océanique et (d) Terrains siluro-dévonien	78
Figure 4.2 : Stations de jaugeage utilisées pour l'estimation des bilans hydrologiques.....	83
Figure 4.3 : Modèle conceptuel HELP « complet » des couches de matériaux pouvant être retrouvées dans la région d'étude.....	86
Figure 4.4 : Exemples de calibration des débits annuels totaux (bleu) et de base (rouge) mesurés et simulés pour les stations 030284 et 023427 : A et B) variation des débits entre 1980 et 2021; C et D) corrélation entre les débits avec les valeurs des erreurs ..	90
Figure 4.5 : Composantes moyennes du bilan hydrologique pour la région d'étude : A) annuelles, B) mensuelles, et C) globales	91
Figure 4.6 : Poids et définitions des paramètres de la méthode de vulnérabilité DRASTIC (De Chardon, 2009, modifié de R. Franklin & R. Turner)	94

Figure 4.7 : Résultats de l'analyse statistique multivariée : a) dendrogramme présentant les résultats de la CAH définissant les 8 groupes d'eau; b) projection des variables utilisées pour l'ACP selon les 2 premières composantes; et c) distribution des 219 échantillons distingués par leur groupe d'eau selon les 2 premières composantes (tiré de Colléau, 2020)	100
Figure 4.8 : Distribution spatiale des groupes d'eau (tiré de Colléau, 2020)	101
Figure 4.9 : Ions majeurs des groupes d'eau : a) échantillons associés aux groupes dans un diagramme de Piper; b) concentration moyenne des groupes d'eau représentée par un diagramme de Stiff (tiré de Colléau, 2020).....	102
Figure 4.10 : Âges des échantillons des groupes d'eau : a) concentrations en tritium (^3H) et âges radiocarbone (^{14}C); b) proportions des catégories d'âge (tiré de Colléau, 2020)	103
Figure 4.11 : Distribution spatiale des échantillons selon les classes de ^{14}C et ^3H avec les zones d'eaux de recharge et évoluées géochimiquement (tiré de Colléau, 2020)	104
Figure 4.12 : Concentrations relatives des cations (axe X) et des anions (axe Y) pour les échantillons distingués par groupe d'eau (tiré de Colléau, 2020)	106
Figure 4.13 : Modèle conceptuel de l'évolution géochimique des eaux souterraines en Estrie (tiré de Colléau, 2020)	108
Figure 5.1 : Sources des réseaux d'approvisionnement en eau municipaux (gauche) et consommation d'eau résidentielle (droite; voir section 5.2) dans la région d'étude du PACES Estrie	112
Figure 5.2 : Organisation de l'estimation des usages de l'eau en fonction du type d'utilisation et de la provenance de l'eau (modifié de Lefebvre et al., 2015)	113
Figure 5.3 : Usages des prélèvements en eau de surface (gauche) et en eau souterraine (droite) dans la région d'étude	115
Figure 5.4 : Répartition des dépassements des critères de potabilité (tiré de Colléau, 2020) ..	118
Figure 5.5 : Répartition des dépassements de critères esthétiques (tiré de Colléau, 2020)	119
Figure 5.6 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N-(NO_2+NO_3) pour la station R1 dans le bassin de la rivière Richelieu	123
Figure 5.7 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N-(NO_2+NO_3) pour la station CH1 dans le bassin de la rivière Chaudière	123
Figure 5.8 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N-(NO_2+NO_3) pour la station SF9 en amont du bassin de la rivière Saint-François.....	123
Figure 5.9 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N-(NO_2+NO_3) pour des stations à des positions intermédiaires du bassin de la rivière Saint-François.....	124
Figure 5.10 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N-(NO_2+NO_3) pour la station la plus en aval dans le bassin de la rivière Saint-François	125
Figure 5.11 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (P _{tot} dissous) pour la station R1 dans le bassin de la rivière Richelieu	126
Figure 5.12 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (P _{tot} dissous) pour la station CH1 dans le bassin de la rivière Chaudière.....	126

Figure 5.13 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (P _{tot} dissous) pour la station SF9 en amont du bassin de la rivière Saint-François...	126
Figure 5.14 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (P _{tot} dissous) pour des stations à des positions intermédiaires du bassin de la rivière Saint-François	127
Figure 5.15 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (P _{tot} dissous) pour la station la plus en aval dans le bassin de la rivière Saint-François	128
Figure 5.16 : Évolution des IQBP moyens annuels pour la station R1 dans le bassin de la rivière Richelieu.....	129
Figure 5.17 : Évolution des IQBP moyens annuels pour la station CH1 dans le bassin de la rivière Chaudière.....	129
Figure 5.18 : Évolution des IQBP moyens annuels pour la station SF9 en amont du bassin de la rivière Saint-François.....	129
Figure 5.19 : Évolution des IQBP moyens annuels pour des stations à des positions intermédiaires du bassin de la rivière Saint-François	130
Figure 5.20 : Évolution des IQBP moyens annuels pour la station la plus en aval dans le bassin de la rivière Saint-François	131
Figure 6.1 : Distributions de la conductivité hydraulique (<i>K</i>) des principaux hydrofaciès.....	136
Figure 6.2 : Caractéristiques des hydrofaciès perméables (HF3 et HF4) dans les forages ayant atteint le roc où ces hydrofaciès ont été rencontrés : a) épaisseur d'hydrofaciès perméables; b) proportion de l'épaisseur d'hydrofaciès perméables par rapport à l'épaisseur totale de sédiments.....	137
Figure 6.3 : Caractéristiques de l'unité de Quaternaire ancien dans les forages ayant atteint le roc : a) distribution de son épaisseur; b) proportion de son épaisseur par rapport à l'épaisseur totale de sédiments; c) probabilité d'avoir au moins 4 m d'hydrofaciès perméable en fonction de l'épaisseur de Quaternaire ancien.....	138
Figure 6.4 : Cibles d'exploration avec une épaisseur supérieure à 8 m de Quaternaire ancien	139
Figure 6.5 : Localisation des coupes des modèles 2D dans la région d'étude du PACES Estrie	142
Figure 6.6 : Profils <i>K</i> (<i>z</i>) considérés lors des modélisations 2D	144
Figure 6.7 : Résultats des simulations d'écoulement et de transport d'âge des coupes 1 et 2.	145
Figure 6.8 : Résultats des simulations d'écoulement et de transport d'âge des coupes 3 et 4.	146
Figure 6.9 : Concentration en arsenic (A) et en manganèse (B) des groupes d'eau (CMA indiquée par la ligne rouge : As = 0,01 mg/L et Mn = 0,12 mg/L) (tiré de Colléau, 2020).	150
Figure 6.10 : Concentration en arsenic (A) et manganèse (B) selon les conditions de pH et d'Eh (la ligne rouge correspond à la CMA : As = 0,01 mg/L et Mn = 0,12 mg/L) (tiré de Colléau, 2020)	151
Figure 6.11 : Répartition spatiale des concentrations en arsenic avec les zones d'eau de recharge et évoluées (tiré de Colléau, 2020)	152
Figure 6.12 : Répartition spatiale des concentrations en manganèse avec les zones d'eau de recharge et évoluées (tiré de Colléau, 2020)	153

Figure 6.13 : Proportion des espèces d'arsenic déterminées dans 88 échantillons en relation avec les secteurs avec des eaux recharge et évoluées (tiré de Colléau, 2020).....	154
Figure 6.14 : Pourcentage relatif médian des espèces d'arsenic (DMA, MA, As ⁵⁺ et As ³⁺) par rapport à l'arsenic total pour les groupes d'eau (tiré de Colléau, 2020).....	155
Figure 6.15 : Modèle conceptuel des conditions contrôlant la présence d'arsenic et du manganèse en Estrie (tiré de Colléau, 2020)	157
Figure 6.16 : Schéma illustrant la démarche d'élaboration du plan d'action (Delisle, 2022)	167
Figure 6.17 : Schéma du processus de collaboration et des étapes suivies (Mayrand, 2021) .	174

LISTE DES ANNEXES ÉLECTRONIQUES

Le contenu de chacune des annexes électroniques est décrit à la fin du rapport

Annexe 1 : Atlas hydrogéologique

Annexe 2 : Cartes thématiques

Annexe 3 : Protocoles méthodologiques

Annexe 4 : Description détaillée des travaux

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte du projet

Ce rapport final présente les résultats des travaux réalisés d'avril 2018 à mars 2022 dans le cadre du Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Estrie (PACES Estrie). Le Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche (INRS-ETE) a reçu le mandat de réaliser ce projet du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) du Québec.

L'objectif général des PACES est de brosser le portrait de la ressource en eau souterraine du Québec municipalisé dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité. La figure 1.1 présente la couverture spatiale des territoires déjà couverts par les trois premières phases des PACES réalisés entre 2009 et 2015 par différentes universités québécoises (MELCC, 2020a). À cela s'ajoute également le projet de caractérisation hydrogéologique de la rivière Chateauguay initié en 2003 et complété en 2006 (Côté et al., 2006 ; Nastev et Lamontagne, 2010). L'ultime phase de ces projets (2018-2022) va assurer la couverture de pratiquement tout le Québec municipalisé (figure 1.1).

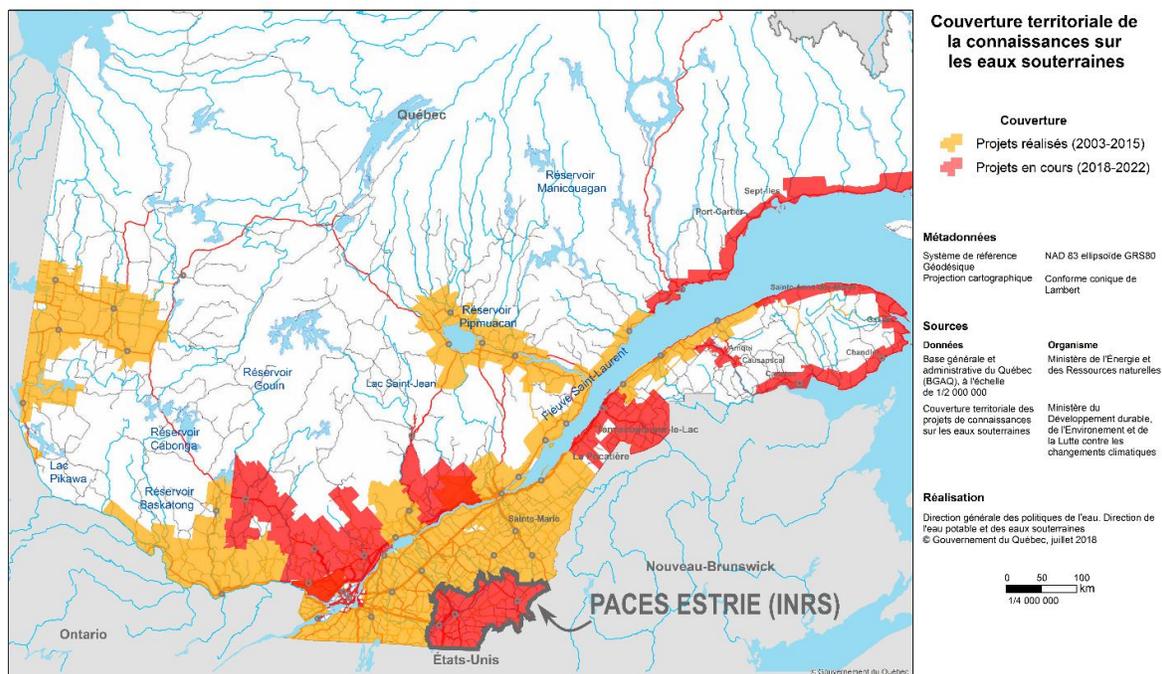


Figure 1.1 : Couverture des projets de connaissances sur les eaux souterraines réalisés entre 2009 et 2015 (ainsi que le projet de la rivière Châteauguay réalisé de 2003 à 2006) et en voie de réalisation entre 2018 et 2022 (modifiée d'après MELCC, 2020a).

Le rapport de Phase I du PACES Estrie (Lefebvre et al., 2019), finalisé en septembre 2019, portait principalement sur la compilation des données existantes et la production des livrables préliminaires ; majoritairement des cartes. La Phase II réalisée de l'automne 2019 à juin 2020 avait surtout impliqué la réalisation et la documentation des résultats de travaux de terrain (Huchet et al., 2020). Le présent rapport final documente l'ensemble des travaux et des livrables du PACES Estrie.

1.2 Objectifs du projet

Ce projet vise à dresser le portrait des ressources en eau souterraine en Estrie afin de pouvoir fournir les informations hydrogéologiques nécessaires afin d'orienter les actions prioritaires pour assurer la protection et l'exploitation durable de ces ressources. Les données existantes et celles générées par ce projet seront principalement utilisées pour aider à comprendre les systèmes aquifères.

Plus spécifiquement, le PACES Estrie devra répondre aux interrogations suivantes identifiées dans le guide des conditions générales des PACES (MDDEP, 2011b) :

- D'où vient l'eau souterraine et où va-t-elle ?
- L'eau souterraine est-elle potable ?
- Quelle est la nature des aquifères qui contiennent l'eau souterraine ?
- Quelles sont les quantités d'eau souterraine exploitables de façon durable ?
- L'eau souterraine est-elle vulnérable (quantité et qualité) face aux activités humaines ?

De plus, le PACES Estrie vise plusieurs objectifs spécifiques :

- 1) Accompagner les municipalités de l'Estrie pour la protection de leur prélèvement d'eau potable selon les exigences du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP ; Québec, 2014).

Cet accompagnement a été amorcé d'abord grâce à une participation aux formations données par le Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES) sur le RPEP et ses exigences. L'INRS a pris part au volet « eau souterraine » de deux ateliers organisés en Estrie en février 2019. Pour les municipalités qui en ont fait la demande, l'INRS a aussi aidé à la définition des travaux requis pour la mise aux normes selon le RPEP à compléter avant le 1^{er} avril 2021. De plus, quinze municipalités de l'Estrie ont accepté de participer à l'échantillonnage de l'eau produite par un de leurs puits d'approvisionnement. Ces analyses géochimiques et isotopiques ont permis de préciser la vulnérabilité et le risque de contamination de ces puits (voir section 6.4). Ces travaux spécifiques sur les approvisionnements municipaux ont permis de bien impliquer les municipalités dans le projet, tout en facilitant l'accès aux données issues des rapports municipaux qui sont nécessaires pour évaluer efficacement le potentiel aquifère de la région d'étude.

- 2) Aborder les problématiques régionales d'intérêt particulier pour l'Estrie relatives à l'eau souterraine.

Les travaux préliminaires (Lefebvre et al., 2019) ont indiqué que la transmissivité de l'aquifère rocheux régional est très limitée. Toutefois, les travaux menés par Caron (2013) sur les dépôts meubles de la région suggèrent la présence d'épaisses accumulations de sédiments pouvant avoir un potentiel aquifère important dans les vallées. En collaboration avec Olivier Caron (professeur-chercheur à l'UQAM), des travaux ont été réalisés afin de mieux préciser ces épaisseurs de sédiments. Sur cette base, une évaluation a été faite du potentiel des aquifères granulaires en Estrie (voir la section 6.1). De plus, les travaux préliminaires effectués lors de la Phase I du projet ont permis d'identifier des problématiques d'ordre qualitatif. En effet, l'accès aux données de qualité des réseaux de distribution des captages municipaux provenant du MDDELCC (2016) et les communications avec la Direction de santé publique de l'Estrie (DSP Estrie) indiquent que

l'arsenic est présent de manière récurrente dans l'eau souterraine de la région, et ce à des concentrations pouvant dépasser la norme de potabilité. Cette problématique est d'ailleurs bien connue dans la région, ce qui a mené à la réalisation d'un pamphlet informatif destiné à la population (CIUSSS Estrie - CHUS, 2017). Ainsi, une attention toute particulière a été portée à l'arsenic (As) afin d'en préciser la distribution spatiale et de comprendre les conditions qui contrôlent sa présence dans l'eau souterraine. De plus, une analyse approfondie de la présence de manganèse (Mn) dans l'eau souterraine en Estrie a été faite en considération de la nouvelle recommandation pour l'eau potable émise en mai 2019 par Santé Canada (2019b). La section 6.3 décrit les travaux spécifiques qui ont été réalisés pour mieux documenter et comprendre les problématiques de qualité de l'eau souterraine reliées à l'arsenic et au manganèse.

- 3) Assurer le transfert des connaissances aux partenaires régionaux et faciliter l'utilisation des résultats du PACES Estrie.

Cet objectif a d'abord été abordé par une participation de l'équipe du PACES Estrie aux activités de transfert du RQES qui ont été développées et mises en œuvre par l'UQTR (Université du Québec à Trois-Rivières). Les quatre ateliers ont été tenus aux dates et endroits suivants : 1^{er} atelier le 2 octobre 2018 à Sherbrooke (RQES, 2018), 2^e atelier en webinaire les 3 et 4 novembre 2020 (RQES, 2020), 3^e atelier en webinaire le 30 novembre et 1^{er} décembre 2021 (RQES, 2021c), et 4^e atelier le 31 mai 2022 au Cégep de Sherbrooke (RQES, 2022). Un atelier de clôture du PACES Estrie a aussi été tenu le 29 juin 2022 à Dudswell afin de présenter les résultats plus en détail. Nous avons aussi dédié des efforts particuliers pour que les résultats du PACES Estrie soient intégrés dans le Plan directeur de l'eau (PDE) des OBV de la région d'étude (COGESAF et COBARIC) avant la fin du projet. Ainsi, un projet de maîtrise a permis de développer une démarche participative pour élaborer un plan d'action sur les eaux souterraines qui pourra être intégré aux PDE des OBV (section 6.5). De plus, un autre projet de maîtrise a impliqué deux MRC de la région (Coaticook et le Val-Saint-François) pour les accompagner dans l'amorce de l'intégration des résultats du PACES Estrie en aménagement du territoire (section 6.6). Tout au long du projet, la communication avec les partenaires régionaux et locaux a été privilégiée, ce qui a facilité le partage des données liées au projet. Ce lien a été fait notamment par l'intermédiaire du site internet du COGESAF (2018).

- 4) Bonifier le Réseau de suivi de l'eau souterraine du Québec (RSESQ).

Grâce au support du MELCC, dix nouveaux puits d'observation ont été implantés en Estrie entre mai et juillet 2019 afin d'améliorer la couverture Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ, 2020) en Estrie. Ces nouveaux puits ont été intégrés aux puits existants du RSESQ qui comportait uniquement cinq puits en service en Estrie (le plus ancien datant de 1969). L'objectif de l'implantation de ces puits est d'abord de permettre le suivi à long terme de l'évolution des niveaux piézométriques. Certains de ces puits pourraient aussi assurer un suivi de la qualité des eaux souterraines dans certains secteurs spécifiques.

1.3 Étapes de réalisation du projet

Le tableau 1.1 donne un aperçu global des phases et du calendrier de réalisation du PACES Estrie. Globalement, la 1^{ère} phase a été dédiée à la collecte des informations existantes, la 2^e phase a impliqué la réalisation d'une caractérisation ciblée sur le terrain, notamment l'échantillonnage de l'eau souterraine à des fins d'analyse chimique, et la 3^e phase a porté sur la production des livrables cartographiques finaux et du rapport de projet. Le rapport de la Phase I a été soumis en septembre 2019 (Lefebvre et al., 2019) et le rapport de la Phase II a été déposé en juin 2020 (Huchet et al., 2020) (ces rapports sont disponibles aux annexes 4L et 4M).

Tableau 1.1 : Phases et calendrier global de réalisation du PACES Estrie

Phase I 2018-2019	Collecte des données existantes (forages, cartes, rapports...), identification des préoccupations régionales
Phase II 2019-2020	Travaux complémentaires de caractérisation sur le terrain (forages, échantillonnage de l'eau souterraine, sondages...)
Phase III 2020-2022	Synthèse des données, production des livrables et transfert aux partenaires (rapport final, cartes et base de données)

Les tableaux 1.2 et 1.3 donnent plus de détails sur les activités qui ont été réalisées à l'intérieur de chaque phase. Les travaux ont été divisés en deux volets comprenant des activités à être réalisées principalement par le COGESAF (tableau 1.2) et par l'INRS (tableau 1.3), mais toujours en collaboration. Les travaux ont été réalisés entre avril 2018 et la fin mars 2022, alors que les livrables du projet ont été soumis au MELCCFP. La transmission des livrables et de la base de données aux partenaires du projet a été faite par la suite en avril 2022. Les versions révisées du rapport, de l'atlas et des cartes ont été transmises en mai 2024.

Tableau 1.2 : Calendrier de réalisation des activités du volet 2 du PACES Estrie

Volets et activités		Phase I	Phase II	Phase III
		2018-2019	2019-2020	2020-2022
Volet 2	Utilisation et gouvernance de la ressource (COGESAF & COBARIC)			
Activité 2.1	Compilation de l'information régionale disponible	X	-	-
Activité 2.2	Identification des problématiques locales	X	-	-
Activité 2.3	Sondage sur l'utilisation des ressources en eau	-	X	X
Activité 2.4	Activités potentiellement polluantes (non réalisé)	-	-	-
Activité 2.5	Gouvernance de la ressource (PDE & SAD)	-	X	X
Activité 2.6	Contribution au rapport final	-	-	X
Activité 2.7	Diffusion & transfert des résultats	X	X	X
Activité 2.8	Supervision & gestion	X	X	X

Tableau 1.3 : Calendrier de réalisation des activités du volet 1 du PACES Estrie

Volets et activités		Phase I	Phase II	Phase III
		2018-2019	2019-2020	2020-2022
Volet 1	Caractérisation et synthèse hydrogéologique (INRS)			
Activité 1.1	Compilation de l'information disponible	X	-	-
Activité 1.2	Base de données	X	-	X
Activité 1.3	Consommation d'eau	X	-	X
Activité 1.4	Météo et débits de cours d'eau	X	-	X
Activité 1.5	Qualité de l'eau des cours d'eau	-	-	X
Activité 1.6	Analyse des hydrogrammes de puits existants	X	-	-
Activité 1.7	Carte d'épaisseur de dépôts	X	-	X
Activité 1.8	Hydrostratigraphie (coll. d'Olivier Caron - UQAM)	X	X	X
Activité 1.9	Données sur les approvisionnements municipaux	X	-	X
Activité 1.10	Transmissivité de l'aquifère rocheux régional	X	-	-
Activité 1.11	Cartes PACES Estrie préliminaires	X	-	-
Activité 1.12	Définition des besoins en données	X	-	-
Activité 1.13	Programme de caractérisation	X	-	-
Activité 1.14	Levés de terrain et interprétation	-	X	-
Activité 1.15	Acquisition des nouveaux hydrogrammes de puits	-	X	X
Activité 1.16	Intégration des nouvelles données (BD)	-	X	X
Activité 1.17	Validation des données de la BD	-	X	X
Activité 1.18	Contribution au rapport final	-	-	X
Activité 1.19	Cartes finales PACES Estrie	-	-	X
Activité 1.20	Pérennité et gestion de la ressource	-	-	X
Activité 1.21	Diffusion & transfert des résultats	X	X	X
Activité 1.22	Supervision & gestion	X	X	X

1.4 Équipe de réalisation et partenaires

Le projet était sous la responsabilité contractuelle de l'INRS avec le MELCCFP. Le COGESAF, en collaboration avec le COBARIC, a assuré les relations avec les partenaires régionaux et l'intégration des résultats dans leurs plans directeurs de l'eau (PDE). La réalisation du projet a aussi été assurée par la collaboration des partenaires régionaux et des collaborateurs de recherche. Les principaux collaborateurs et organismes impliqués dans le projet sont énumérés ci-dessous.

Universités :

- Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement (INRS – ETE) :
 - Chercheurs : René Lefebvre, Geneviève Bordeleau
 - Professionnels : Mélanie Raynauld, François Huchet, Jean-Marc Ballard, Harold Vigneault, Marc Laurencelle et Jean-Sébastien Gosselin
 - Étudiants à la maîtrise dans le cadre du projet : Élise Colléau et Raphaël Mathis
 - Étudiants stagiaires ou ayant contribué aux travaux : Marie-Pierre Champagne, Julie Domaine, Thomas Vincent, Guillaume Légaré-Couture et Sarah Lahrarti
 - Personnel des Laboratoires de services communs : Stéfane Prémont, Stéphane Moise et Julie Perreault
 - Personnel du Laboratoire de cartographie numérique et de photogrammétrie (LCNP) : Marco Boutin
- Université du Québec à Montréal (UQAM) : Olivier Caron (professeur)
- Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) : Julie Ruiz (professeure)
- Université Laval : Roxane Lavoie (professeure), Renaud Delisle (étudiant M.Sc.) et Jimmy Mayrand (étudiant M.Sc.)
- Université de Rennes 1 – Observatoire des sciences de l'univers de Rennes (OSUR) : Virginie Vergnaud, ingénieur de recherche en hydrogéologie
- Université d'Ottawa – André E. Lalonde AMS Laboratory : Ian Clark, Anthony Lapp et Monika Wilk
- Université de Waterloo – Environmental Isotope Laboratory (EIL) : Darlene Bridge, Richard Heemskerk et Reem El Mugammar

Partenaires de réalisation du projet :

- Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF) : Julie Grenier et Nicolas Bousquet
- Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC) : Yannick Bourque

Organismes de recherche :

- Commission géologique du Canada (Ressources naturelles Canada) : Michel Parent

- La Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MELCCFP

Partenaires régionaux :

- Municipalités régionales de comté (MRC) : Coaticook, Le Granit, Le Haut-Saint-François, Memphrémagog, Le Val-Saint-François
- Ville de Sherbrooke
- Fédération de l'Union des producteurs agricoles (UPA) de l'Estrie
- Direction régionale de l'Estrie du ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH)
- Direction régionale de l'Estrie du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)
- Direction régionale de l'Estrie du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP)
- Direction de la santé publique (DSP) de l'Estrie

Partenaires municipaux :

- Municipalités ayant autorisé l'installation de puits du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) du MELCCFP sur une parcelle de terrain municipale : Canton de Stanstead, Coaticook, Compton, Magog, Nantes, Notre-Dame-des-Bois, Sherbrooke, Stornoway, Val-Joli et Weedon
- Municipalités ayant participé aux travaux sur la caractérisation géochimique et isotopique de l'eau de puits municipaux : Ascot Corner, Austin, Coaticook, Dudswell, La Patrie, Lac-Drolet, Lambton, Orford, Piopolis, Potton, Richmond, Sainte-Edwidge-de-Clifton, Saint-Herménégilde, Ville de Stanstead et Weedon

Partenaires privés :

- Bureau Veritas (anciennement Maxxam Analytics) : Diane Goulet et François Aubé
- Laforest Nova Aqua inc. (LNA) : Julie Gauthier et Laurie Tremblay

Autres organismes :

- Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES) : Anne-Marie Decelles et Miryane Ferlatte
- Ministère des Transports du Québec (MTQ)
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN)

1.5 Contenu et structure du rapport

Ce rapport documente les travaux réalisés dans le cadre du projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Estrie (PACES Estrie). Les travaux et les résultats associés sont regroupés dans le rapport en six grandes sections :

- Introduction sur la réalisation du projet et présentation de la région d'étude
- Acquisition des données et caractérisation
- Contextes géologiques et hydrogéologiques
- Conditions hydrogéologiques
- Ressources en eau souterraine
- Travaux spécifiques

En plus du présent rapport, le PACES Estrie implique plusieurs livrables cartographiques, une base de données et un rapport vulgarisé présenté sous la forme d'un atlas hydrogéologique. Cet atlas doit en fait être consulté en même temps que le présent rapport car il contient toutes les cartes produites dans le cadre du PACES Estrie. Ces cartes n'ont pas été reproduites à l'intérieur du présent rapport lui-même car son format ne permet pas de présenter adéquatement les détails cartographiques. L'annexe 1 donne la liste des planches contenues dans l'atlas et qui correspondent à des livrables prévus dans le mandat de réalisation du PACES Estrie.

L'atlas hydrogéologique présente une version de taille réduite des cartes du PACES Estrie qui ont toutes été produites à l'échelle 1/100 000. Les sources des couches cartographiques sont citées dans l'atlas ainsi que directement sur les cartes 1/100 000. Compte tenu de leur échelles différentes, certaines couches géomatiques sont différentes pour les cartes de l'atlas et celles à l'échelle 1/100 000. L'annexe 2 donne la liste des cartes produites à l'échelle 1/100 000. Ces livrables sont disponibles sous forme électronique en format PDF ainsi qu'en format MXD (ArcGIS). Les couches géomatiques sont également disponibles dans une géodatabase ArcGIS. En plus des données cartographiques, une base de données a aussi été développée pour assembler et organiser les informations à la base des travaux et des livrables du PACES Estrie.

Plusieurs livrables du PACES Estrie ont été produits en suivant des protocoles méthodologiques qui avaient été développés dans le cadre des phases précédentes du Programme de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. L'annexe 3 donne la liste des protocoles qui ont été suivis. Plusieurs activités réalisées dans le cadre du PACES Estrie ont impliqué des données ou des procédures qui sont détaillées à l'annexe 4. Ces informations détaillées couvrent les installations de puits d'observation (annexe 4A), les données géochimiques (annexe 4B), l'estimation des propriétés hydrauliques (annexe 4C), la définition de la piézométrie régionale (annexe 4D), l'estimation de la recharge et des zones de recharge (annexe 4E), l'estimation de la vulnérabilité DRASTIC (annexe 4F), l'estimation de l'usage de l'eau à l'échelle municipale (annexe 4G), l'évaluation du potentiel aquifère des vallées enfouies (annexe 4H), l'évaluation géochimique du risque de contamination des puits municipaux (un rapport individuel a été produit pour chacune des 15 municipalités participantes; annexe 4I), la description des champs de la base de données (annexe 4J), les cartes contenues dans les géodatabases (annexe 4K), le rapport de la Phase I (annexe 4L), le rapport de la Phase II (annexe 4M), le modèle quaternaire 3D (annexe 4N), les coupes stratigraphiques (annexe 4O), l'évaluation du confinement (annexe 4P), et la compilation des données de rapport et enquêtes (annexe 4Q).

À part les listes de contenus comprises dans les annexes 1 à 4 à la fin du présent rapport, tous les contenus des annexes sont sous forme électronique. C'est le MELCCFP qui diffuse le rapport et les livrables cartographiques du PACES Estrie. Toutefois, ces documents électroniques ont aussi été versés dans un répertoire Dataverse public de l'INRS pour assurer leur pérennité et leur accessibilité (DOI : 10.5683/SP3/GEFGVG).

1.6 Présentation de la région d'étude

1.6.1 Définition et localisation

Les limites de la région d'étude ont été définies de façon à assurer une couverture complète à la fois des Municipalités régionales de comté (MRC) de l'Estrie et de la partie amont du bassin versant de la rivière Saint-François qui n'avaient pas été couvertes par un projet PACES antérieur. Ainsi, la zone cartographiée du PACES Estrie couvre les sections amonts des Zones de gestion intégrée de l'eau (ZGIE) des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF) et de la rivière Chaudière (COBARIC) (figure 1.2). Cette définition des limites de la région d'étude implique toutefois une certaine superposition avec les territoires des PACES antérieurs en périphérie (tableau 1.4; figure 1.3), soit ceux de la Montérégie Est (Carrier et al., 2013), de Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015), et du bassin de la rivière Nicolet et du Bas-Saint-François (Larocque et al., 2015). Ainsi, ces zones de projets PACES ayant déjà fait l'objet d'une cartographie complète, aucun nouveau travail de terrain n'y a été réalisé, notamment aucun nouvel échantillonnage de l'eau souterraine. Toutefois, les données de ces anciens PACES ont été intégrées à la base de données du PACES Estrie.

Tableau 1.4 : Territoires couverts par les projets PACES dans la région d'étude

PACES	Responsable	Période	Superficie dans la région d'étude (km ²)
Montérégie Est	INRS	2009-2013	784
Chaudière-Appalaches	INRS	2012-2015	774
Nicolet - Bas-Saint-François	UQAM	2012-2015	131
Territoire couvert par les anciens PACES			1 690
Estrie	INRS	2018-2022	9 012
Territoire cartographié par le PACES Estrie			10 701

La région cartographiée représente un territoire de 10 701 km² dont 9 012 km² n'ont jamais été couverts par un PACES antérieur (tableau 1.4). Cette région d'étude couvre la majeure partie de la région administrative de l'Estrie (94 %) ainsi qu'une portion significative de la région de Chaudière-Appalaches, au nord-est, en plus de quelques secteurs du Centre-du-Québec, au nord (tableau 1.5) **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La région d'étude est aussi bordée à l'ouest par la Montérégie, tandis que la frontière internationale avec les États-Unis marque les limites sud et sud-est de la région d'étude.

La zone d'étude couvre en totalité les territoires de la ville de Sherbrooke et de cinq MRC de l'Estrie : Le Granit, Le Haut-Saint-François, Le Val-Saint-François, Coaticook et Memphrémagog. Seule la MRC des Sources de la région administrative de l'Estrie est comprise en partie (16 %) dans les limites de la région d'étude. De même, d'autres MRC sont en partie à l'intérieur des limites de la région d'étude : celles de Beauce-Sartigan et des Appalaches, en Chaudière-Appalaches, et la MRC d'Arthabaska de la région administrative du Centre-du-Québec.

La population combinée des 97 municipalités partiellement ou totalement comprises dans la région d'étude est de près de 330 000 personnes (tableau 5.1 ; MAMH, 2020 ; voir compilation à la section 5.2). Un peu plus de la moitié de la population de la région d'étude (52%) réside dans la ville de Sherbrooke (environ 169 000 habitants) et la majorité de la population se concentre en périphérie de Sherbrooke dans les MRC de Memphrémagog et du Haut-Saint-François. Des zones urbaines (ville de plus de 5 000 habitants) sont aussi distribuées sur l'ensemble du territoire d'étude : Magog (27 200 hab.), Coaticook (8 900 hab.), Lac-Mégantic (5 600 hab.), Cookshire-

Eaton (5 400 hab.) et Windsor (5 400 hab.). Les secteurs les moins densément peuplés concernent les MRC du Granit et du Haut-Saint-François.

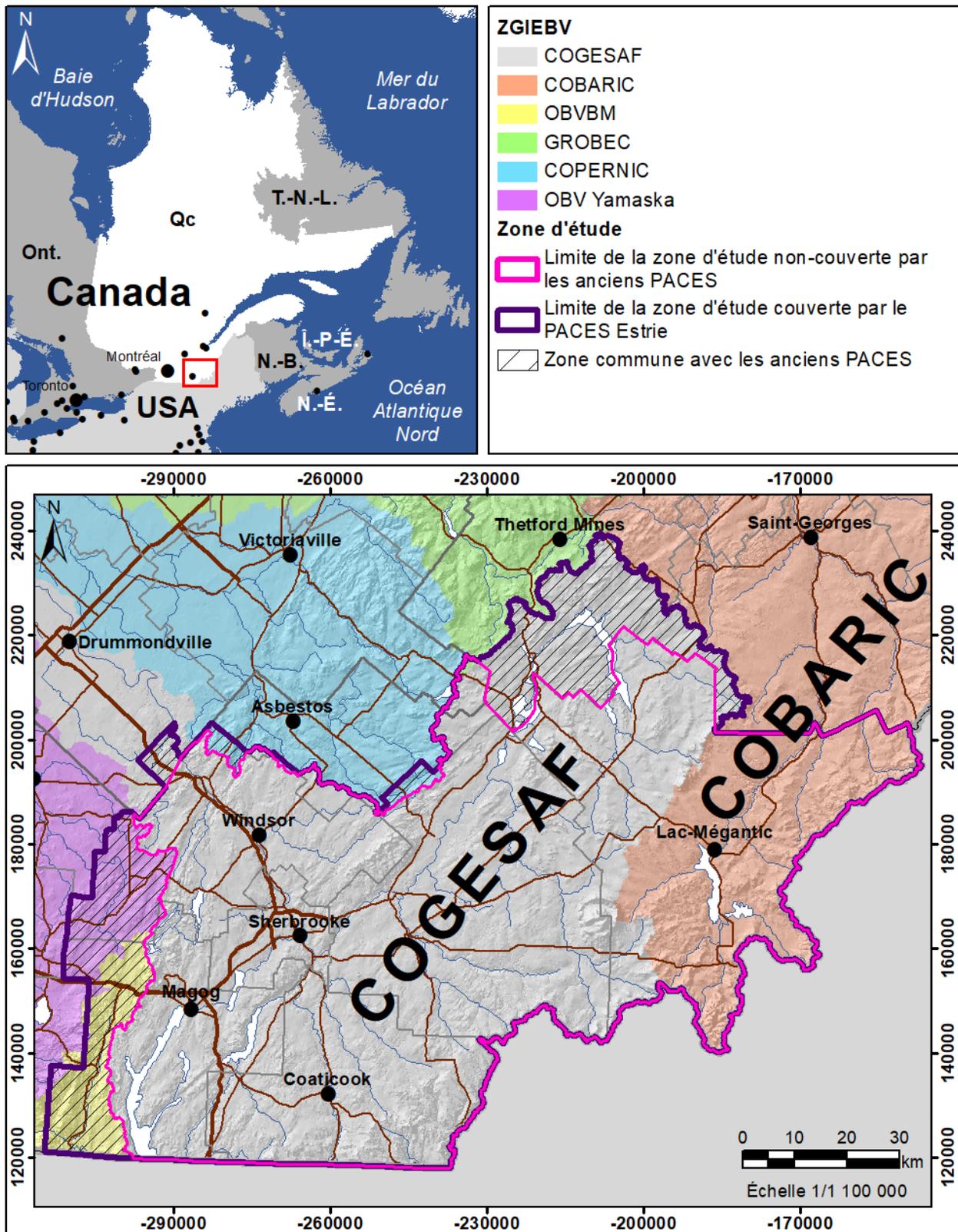
Tableau 1.5 : Territoires et populations des MRC et des régions administratives dans la région d'étude du PACES Estrie

MRC et Région	Valeurs relatives à la région d'étude			
	Superficie (km ²)	Municipalités	Population	Densité (habitant/km ²)
Coaticook	1353	12	18 700	13,8
Le Granit	2829	20	22 168	7,8
Le Haut-Saint-François	2307	14	22 738	9,9
Le Val-Saint-François	1427	18	31 300	21,9
Les Sources	125	4	692	5,5
Memphrémagog	1448	17	51 865	35,8
Ville de Sherbrooke	367	1	169 136	460,9
Estrie	9 855	86	316 599	32,1
Beauce-Sartigan	141	3	642	4,6
Les Appalaches	633	7	10 403	16,4
Chaudière-Appalaches	774	10	11 045	14,3
Arthabaska	61	1	137	2,3
Centre-du-Québec	61	1	137	2,3
Total	10 691^a	97	327 781	30,7

a : la différence avec le 10 701 km² au tableau 1.4 s'explique ainsi : (1) la non prise en compte de deux territoires non organisés (le TNO aquatique de la MRC du Val-Saint-François en Estrie et le TNO aquatique de la MRC de Drummond au Centre-du-Québec) couvrant 12.5 km² sur la région d'étude, (2) l'exclusion de 13 municipalités ayant moins de 1 km² de surface en commun avec la région d'étude et couvrant au total 2.0 km², et (3) quelques simplifications dans le calcul des surfaces municipales (arrondis).

Le bassin versant de la rivière Saint-François s'étend en fait aux États-Unis. Plusieurs des cartes produites dans le cadre du PACES Estrie couvrent cette partie du bassin. C'est notamment le cas du modèle altimétrique numérique (livrable n° 3), de la pente du sol (livrable n° 4), de la géologie du Quaternaire (livrable n° 12), des épaisseurs des dépôts meubles (livrables n° 15A à 15F), de la topographie du roc (livrable n° 16) des conditions de confinement de l'aquifère rocheux (livrable n° 17A), des contextes hydrostratigraphiques (livrable n° 18), de la piézométrie du roc (livrable n° 20), de la vulnérabilité DRASTIC (livrable n° 22) et de la recharge de l'aquifère rocheux (livrable n° 27). Les couches cartographiques numériques de ces cartes dans la géodatabase s'étendent ainsi aux États-Unis, mais les cartes présentées dans l'atlas hydrogéologique ou à l'échelle 1 / 100 000 ne montrent que le territoire situé au Québec.

Pour les fins de l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux, certaines couches géomatiques ont dû être produites afin d'adapter et d'uniformiser les données provenant du Canada et des États-Unis. Des couches géomatiques d'hydrographie, de l'occupation du sol, de la pédologie ont été créées pour couvrir l'ensemble du bassin versant de la rivière Saint-François (Annexe 4E).



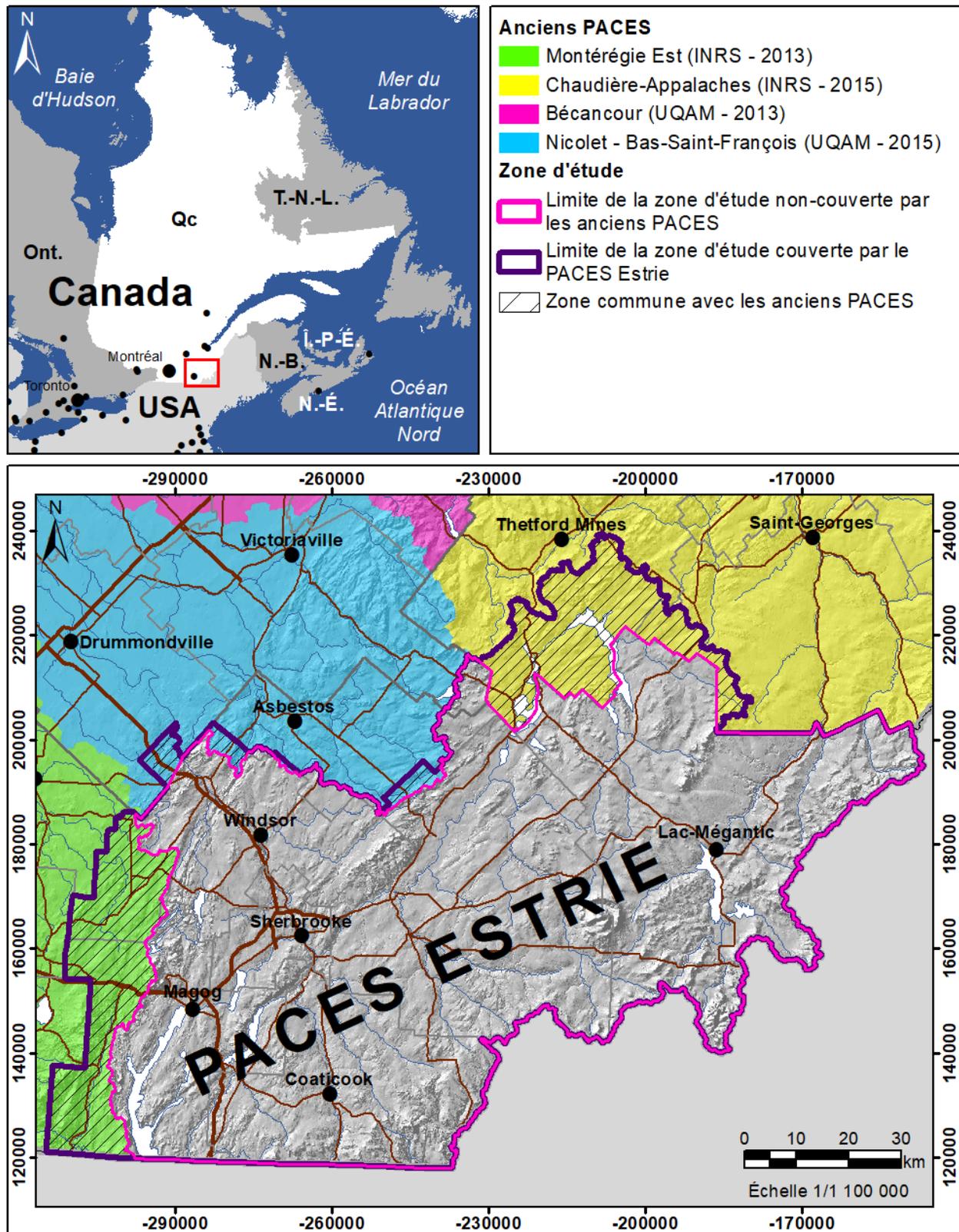


Figure 1.3 : Région d'étude du PACES Estrie par rapport aux projets PACES antérieurs

1.6.2 Découpage administratif et accès

La carte du livrable n° 2 présente les principales routes et les limites administratives de la région d'étude du PACES Estrie. On y voit la ville de Sherbrooke et les limites des municipalités comprises dans les cinq MRC de l'Estrie complètement couvertes par la région d'étude ainsi que les MRC d'autres régions à la périphérie du territoire. Le réseau routier est plus développé dans l'ouest de la région d'étude où les principaux axes routiers convergent vers Sherbrooke. L'autoroute 10 relie Sherbrooke à la Montérégie Est et se rend jusqu'à Montréal. L'autoroute 55 traverse l'Estrie de Drummondville jusqu'à la frontière des États-Unis en passant par Sherbrooke. Les principaux axes routiers du sud-ouest au nord-est sont la route 112 reliant Sherbrooke à Thetford Mines et la 108 entre Sherbrooke et Beauceville. La route 147 relie Sherbrooke vers le sud et atteint les États-Unis en passant par Coaticook. À l'est de l'Estrie, la route 161 relie Lac-Mégantic à Victoriaville vers le nord-ouest.

1.6.3 Description du milieu naturel

1.6.3.1 Topographie et pente du sol

La carte du livrable n° 1 montre les courbes topographiques alors que la carte du livrable n° 3 représente la topographie avec un modèle altimétrique numérique (MAN). La topographie est également représentée sur la carte du livrable n° 3 par le MAN fourni par le MELCCFP. Le MAN est produit par la Direction du Patrimoine écologique et des Parcs (DPEP) du MELCCFP et a été développé à partir de courbes de niveau 1 / 20 000 de la BDTQ (MRN, 2006). Ce MAN a été modifié par la DPEP afin d'en assurer la cohérence avec le réseau hydrographique structuré.

La topographie de la région d'étude est marquée par trois vallées importantes, la première allant de Sherbrooke vers le nord-ouest le long de la rivière Saint-François, tandis que la deuxième vallée va du lac Massawippi, au sud-ouest, jusqu'au lac Aylmer, au nord-est ; cette vallée longe aussi la rivière Saint-François de Lennoxville jusqu'à Weedon. À partir de cette vallée, la topographie s'élève vers le sud-est et est découpée par de nombreux cours d'eau s'écoulant vers le nord-ouest. La troisième vallée importante est associée à la rivière Chaudière et va du lac Mégantic jusqu'à la limite est de la région d'étude. Le bassin de la rivière Saint-François est séparé de celui de la rivière Nicolet par un haut topographique important, tandis qu'un relief assez conséquent entoure le bassin de la rivière Chaudière autour du lac Mégantic. Les vallées appalachiennes incisent les reliefs montagneux et se trouvent à des élévations généralement inférieures à 400 m NMM. Les hautes-terres appalachiennes peuvent atteindre près de 1 200 m NMM d'élévation, particulièrement dans le secteur sud-est où on retrouve les plus hauts sommets, notamment le Mont Mégantic (1 102 m) et le Mont Gosford (1 180 m).

La pente de la surface du sol (livrable n° 4) a été dérivée de la topographie en suivant le protocole de l'annexe 3 (Protocole pour la préparation du livrable 04 – Pente). Les fortes pentes sont associées aux hauts topographiques retrouvés sur la limite sud-est de la région d'étude. Aussi, de fortes pentes sont associées au Mont Mégantic et au Mont Orford. De fortes pentes se trouvent aussi dans la partie ouest de la MRC de Memphrémagog, au nord-ouest d'East Angus et au nord-ouest de Lac-Drolet. On retrouve aussi d'assez fortes pentes en bordure de plusieurs des vallées de la région d'étude. Les hautes terres au sud-est de la vallée de la rivière Saint-François ont des reliefs ondulés mais des pentes modérées.

1.6.3.2 Hydrographie et bassins versants

La carte du livrable n° 5 montre l'hydrographie et la carte du livrable n° 6 montre les bassins versants de la région d'étude. Le réseau hydrographique présenté au livrable n° 5 provient du Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) à l'échelle 1/20 000 (MDDEP, 2011a). Pour les autres cartes, le réseau hydrographique de la Base de données pour l'aménagement du

territoire (BDAT) à l'échelle 1 / 100 000 a été utilisé afin de ne pas surcharger les cartes. Les limites des bassins hydrographiques présentés au livrable n° 6 proviennent du CEHQ (2017). Les grands bassins ainsi que les bassins de niveau 1 et 2 sont indiqués sur la carte du livrable n° 6.

La carte du livrable n° 5 montre que le réseau hydrographique est bien développé dans la région d'étude. Les principaux cours d'eau sont la rivière Saint-François et la rivière Chaudière. Plusieurs lacs importants se trouvent aussi dans la région d'étude : Memphrémagog, Massawippi, Lovering, Magog et Brompton à l'ouest ; Aylmer et Saint-François au nord-est et Mégantic au sud-est.

La région d'étude couvre la majorité du bassin versant de la rivière Saint-François, sauf le Bas-Saint-François en aval de la MRC du Val-Saint-François (livrable n° 6). De plus, la partie amont du bassin versant de la rivière Chaudière, y compris le lac Mégantic, couvre le sud-est du territoire. Des portions d'autres bassins versants sont aussi couverts par la région d'étude. C'est le cas de la section amont du bassin de la rivière Connecticut à l'extrémité sud de la région. Des portions des bassins de la baie Missisquoi (faisant partie du grand bassin de la rivière Richelieu) et de la rivière Yamaska couvrent aussi la partie la plus à l'ouest du territoire.

1.6.3.3 Couverture végétale

Les types de peuplements forestiers sont présentés sur la carte du livrable n° 8 montrant la couverture végétale. Les données sont issues du Système d'information écoforestière (SIEF) du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MFFP, 2018) et sont résumées au tableau 1.6. 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 (33,5 %), suivi des feuillus (25,8 %) et des résineux (13,0 %). Le couvert forestier domine dans les MRC du Granit et du Haut-Saint-François et dans la partie ouest de la MRC Memphrémagog.

Tableau 1.6 : Types et superficies des peuplements forestiers dans la région d'étude

Peuplement	Sous-catégories dominantes	Superficie (km ²)	Proportion (%)
Feuillus (> 75 % de la surface)	Érablière (2206 km ²)	2755	25,8 %
Mixte (25-75 % de résineux)	Bétulaie avec résineux (2709 km ²)	3584	33,5 %
Résineux (> 75 % de la surface)	Pessière (463 km ²), Résineux indifférenciés (326 km ²) et Sapinière (474 km ²)	1390	13,0 %
Non forestier	Total (non forestier)	2970	27,8 %

1.6.3.4 Milieux humides

Le livrable n° 9 montre la localisation et les types de milieux humides et le tableau 1.7 résume l'importance des différents types de milieux humides en termes de proportion de l'ensemble des milieux humides et de couverture de la région d'étude. La cartographie détaillée des milieux humides provient de Canards Illimités Canada (CIC) et MELCC (2020) qui ont couvert la majeure partie de la région d'étude lors de la réalisation de nos travaux, à l'exception essentiellement des MRC du Granit et des Appalaches. À cette source d'information a été ajoutée la cartographie des milieux humides potentiels (MELCC, 2019a) afin de compléter la cartographie des milieux

humides dans les secteurs non couverts par la cartographie détaillée. Les milieux humides potentiels proviennent de l'assemblage de plusieurs sources :

- Unités considérées comme humides de l'Inventaire écoforestier du Québec Méridional (de 2017; <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/inventaire-ecoforestier/>) et du Programme d'inventaire écoforestier nordique (PIEN), telles que décrites à l'annexe 4 du guide « Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional 2015 (GID) » ;
- Milieux humides de la base de données topographique du Québec (BDTQ) ;
- Milieux humides de la base de données topographique produite par Ressources naturelles Canada (CanVec) ;
- Milieux humides de la Cartographie de la végétation nordique ;
- Atlas de conservation des terres humides de la vallée du Saint-Laurent (1993-1994) ;
- Portion fluviale.

Le livrable n° 9 montre qu'il y a de grandes étendues de milieux humides couvrant près de 1500 km², soit près de 14% de la région d'étude. Les milieux humides sont souvent en relation avec une grande partie des cours d'eau ou couvrent des étendues assez importantes dans les vallées. À l'exception des milieux humides potentiels (30,5%), ce sont les marécages (34,4%) et les tourbières boisées (22,0%) qui représentent les plus grandes proportions des milieux humides (tableau 1.7). Les milieux humides (sans classement) sont aussi montrés sur la carte des zones de recharge et d'émergence (livrable n° 27B) afin d'indiquer leur possible relation avec des zones d'émergence de l'eau souterraine.

Tableau 1.7 : Types et superficies des milieux humides dans la région d'étude

Type de cartographie	Type de milieu humide	Superficie (km ²)	Proportion (%)	
			Milieux humides	Région d'étude
Non détaillée	Milieu humide potentiel	454,1	30,5%	4,2%
	Eau peu profonde	22,2	1,5%	0,2%
	Marais	5,4	0,4%	0,1%
	Marécage	527,3	35,4%	4,9%
Détaillée	Prairie humide	34,6	2,3%	0,3%
	Tourbière ombrotrophe (<i>bog</i>)	7	0,5%	0,1%
	Tourbière boisée	326,8	22,0%	3,1%
	Tourbière minérotrophe (<i>fen</i>)	111	7,5%	1,0%
Total	Tous types de milieux humides	1488,4	100,0%	13,9%

1.6.3.5 Pédologie

Le livrable n° 11 présente la carte de la pédologie. Cette carte représente l'assemblage de diverses études pédologiques de comtés publiées entre 1943 et 1998 à des échelles variées (du 1 / 40 000 au 1 / 126 760). L'assemblage des cartes sous forme numérique a été effectué par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et uniformisé à l'échelle

1 / 20 000 en conformité avec le plan géomatique du gouvernement du Québec (PGGQ). Les séries de sols utilisées pour préparer le livrable n° 11 sont détaillées dans les rapports pédologiques indiqués au tableau 1.8 et accessibles sur le site Internet du gouvernement du Canada (<http://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/surveys/pq/index.html>).

Afin de produire la carte de la pédologie, sept études pédologiques ont été compilées. Le niveau de détail varie d'un secteur à l'autre selon l'échelle utilisée initialement pour produire chacune des cartes. Les unités cartographiques se composent souvent d'une seule série de sol ; c'est le cas pour les secteurs couverts par les études n°5, 11 et 18 qui font uniquement état de l'unité de sol dominante. Toutefois, une unité cartographique peut également représenter une combinaison de séries de sols identifiées selon leur dominance respective. Les études n°20, 21, 39 et 58 atteignent ce niveau de détail vertical et fournissent même les proportions relatives de chaque membre de la série de sols (excepté pour l'étude n°21).

L'IRDA fournit également une base de données sur les sols sur son site internet (<https://www.irda.gc.ca/fr/outils-et-services/informations-sur-les-sols/etudes-pedologiques/>) qui donne les informations suivantes : 1) la famille de sols, telles que le nom du sol, la sorte, l'ordre, la classe de drainage, le mode dépôt ou encore la granulométrie, puis 2) des résultats analytiques de certaines propriétés physiques et chimiques de couches de sols issus de l'inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990). Ce rapport donne les pourcentages relatifs de sable, limon et argile, la densité apparente et la conductivité hydraulique de chaque couche de sol. Les données recueillies dans la base de données sur les sols sont cependant incomplètes et les utilisateurs intéressés devront consulter les études pédologiques mentionnées au tableau 1.8 afin d'en extraire les épaisseurs des sols et leur pente dans le but de compléter la base de données finale sur la pédologie de l'Estrie.

Sur la carte du livrable n° 11, plutôt que de représenter chaque série de sols de façon distincte, les unités de sol de la carte pédologique ont été regroupées selon deux paramètres d'intérêt pour l'hydrogéologie : la texture du sol dominant et sa classe de drainage (voir le Protocole pour la préparation du livrable n° 11 à l'annexe 3). La texture du sol a été utilisée pour estimer les propriétés hydrauliques des sols, ce qui a une incidence importante sur la recharge des nappes (voir section 4.3). Cette classification offre ainsi une représentation mieux adaptée aux besoins du projet de caractérisation hydrogéologique et une meilleure lisibilité des données à l'échelle de la carte (1 / 100 000). La carte des sols a servi à l'évaluation de la recharge (livrable n° 27A ; section 4.3) ainsi qu'à l'estimation de la vulnérabilité (livrable n° 22 ; section 4.5).

Ainsi, deux colonnes supplémentaires ont été ajoutées dans la table des unités cartographiques : une première représentant la classe de texture du profil du sol et une deuxième combinant la texture et la classe de drainage du sol. Cette classification des séries de sols est tirée de la légende des sols du Québec dans laquelle chaque série de sols a été manuellement classée en six catégories de texture (argileux, loameux, sableux, graveleux, issu de dépôts de tills et organique) et sept classes de drainage (très rapidement drainé, rapidement drainé, bien drainé, modérément bien drainé, imparfaitement drainé, mal drainé et très mal drainé). La carte du livrable n° 11 de la pédologie montre que les sols dérivés de dépôts de till dominant largement dans la région d'étude, ce qui est cohérent avec la cartographie des dépôts meubles (livrable n° 12 ; section 3.2). On retrouve toutefois dans certaines vallées des sols loameux ou argileux.

Tableau 1.8 : Études pédologiques à la base du livrable n° 11 (IRDA, 2018 a à g)

Étude	Échelle	Année	Comté	MRC couvertes	Feuillet de l'IRDA au 1 / 20 000			
05*	63 360	1959	Bagot	Le Val-Saint-François	31H09101	-	-	-
11	63 360	1947	Shefford Brome Mississquoi	Le Val-Saint-François Memphrémagog	31H01101	31H01202	31H08201	31H09101
					31H01102	31H08101	31H08202	31H09102
					31H01201	31H08102	-	-
18	126 720	1943	Stanstead Richmond Sherbrooke Compton	Coaticook Le Haut-Saint-François Le Val-Saint-François Les Sources Memphrémagog Sherbrooke	31H01101	21E03201	21E05202	21E11102
					31H01102	31H08101	21E06201	31H09201
					21E04101	31H08102	21E06202	31H09202
					21E04102	21E05101	31H09101	21E12201
					21E03101	21E05102	31H09102	21E12202
					31H01201	21E06101	21E12101	21E11201
					31H01202	21E06102	21E12102	21E11202
					21E04201	31H08202	21E11101	31H16102
					21E04202	21E05201	-	-
					20	63 360	1960	Drummond
21E03202	21E07202	21E10201	21E15102					
21	40 000	1996	Frontenac	Les Appalaches Beauce-Sartigan Granit	21E02201	21E11102	21E10202	21E16101
					21E06102	21E10101	21E09201	21E14202
					21E07101	21E10102	21E14101	21E15201
					21E06202	21E11201	21E14102	21L03102
					21E07201	21E11202	21E15101	-
39	50 000	1989	Mégantic	Les Appalaches Arthabaska Granit	21E14201	21E14202	21L03101	21L03102
					21E05202	21E12201	21E13102	21E13202
					21E12102	21E12202	21E14101	21E14201
58	50 000	1998	Wolfe	Le Haut-Saint-François Les Appalaches Les Sources	21E11101	21E11201	21E14102	21E14202

*L'étude du comté de Bagot couvre une très petite portion du territoire du PACES Estrie (0.71 ha).

1.6.4 Utilisation du sol et affectation du territoire

La section 1.6.1 a déjà documenté la répartition de la population dans la région d'étude en soulignant les municipalités les plus peuplées (tableau 1.5). Le milieu naturel a été décrit à la section 1.6.3, notamment la couverture végétale (livrable n° 8) et les milieux humides (livrable n° 9). La présente section décrit plutôt le territoire tel que marqué par les activités anthropiques, soit l'occupation du sol (livrable n° 7) et l'affectation du territoire (livrable n° 10). Chacun de ces livrables est brièvement décrit et résumé au tableau 1.9.

L'occupation du sol en 2018, mise-à-jour en mai 2020 (MELCC, 2020d), est présentée sur la carte du livrable n° 7. Cette carte montre que la principale utilisation du territoire est forestière dans la région d'étude (78,6%), avec plusieurs secteurs constitués aussi de coupes et de régénération. Toutefois, l'agriculture est très importante dans la MRC de Coaticook ainsi que dans la MRC du Val-Saint-François, même si dans l'ensemble de la région d'étude elle n'occupe que 17,4% du

territoire. Les secteurs anthropiques sont relativement restreints globalement (4,0%), mais ils dominent la ville de Sherbrooke et l'axe entre Magog et East Angus passant par Sherbrooke. Tel que mentionné précédemment, plusieurs milieux humides recouvrent le territoire (voir les détails sur le livrable n° 9; section 1.6.3.4) et plusieurs lacs majeurs sont aussi présents dans la région.

Tableau 1.9 : Superficie et proportion (%) d'occupation du sol et d'affectation du territoire

Type d'occupation ou d'affectation	Occupation du sol Livrable n° 7		Affectation du territoire Livrable n° 10	
	Superficie (km ²)	% du territoire	Superficie (km ²)	% du territoire
Anthropique	411,5	4,0	1 560,1	15,1
Agricole	1 793,3	17,4	3 825,4	37,0
Forêt	8 101,0	78,6	4 967,3	48,0
Total¹	10 305,8	100,0	10 352,8	100,0

¹ Superficie totale de la région d'étude du PACES Estrie sans les étendues d'eau, sans les pixels de la catégorie « Aquatique » pour l'occupation du sol et sans les étendues d'eau (polygones hydro du BDAT) pour l'affectation du territoire.

La carte du livrable n° 10 montre l'affectation du territoire dans la région d'étude. Les données d'affectation du territoire proviennent de la mise-à-jour de 2018 du Portrait provincial en aménagement du territoire (PPAT) du ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH). Ces données présentent la vocation du territoire, c'est-à-dire la volonté des autorités qui définissent les grandes orientations relativement à l'utilisation prévue du territoire.

Le tableau 1.9 présente la comparaison entre l'affectation du territoire (livrable n° 10) et l'actuelle utilisation du sol (livrable n° 7). Des différences significatives peuvent être notées, notamment l'affectation du territoire prévue pour les activités anthropiques est de 15,1 % alors que l'occupation actuelle pour ces activités ne représente que 4,0 % du territoire. Les activités agricoles occupent également une superficie moindre (17,4 %) par rapport à l'affectation du territoire prévue (37,0 %). Il y a aussi de grands secteurs à vocation récréative dans la région, mais ils ne sont pas comptabilisés dans le tableau 1.9.

2 ACQUISITION DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION

2.1 Travaux antérieurs

Comme le montre la figure 1.3 présentée précédemment, trois projets PACES ont été réalisés à la périphérie de la région couverte par le PACES Estrie, soient en Montérégie Est (Carrier et al., 2013), en Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015) et dans les bassins de la rivière Nicolet et du Bas-Saint-François (Larocque et al., 2015). Les projets réalisés en Montérégie Est et en Chaudière-Appalaches pourraient servir d'analogues au PACES Estrie parce que ces deux projets ont aussi couvert les Appalaches. Comme nous le verrons plus loin, le potentiel de l'aquifère rocheux fracturé régional est relativement limité en Estrie, tout comme ce potentiel était aussi limité ailleurs dans les Appalaches, tant en Montérégie Est qu'en Chaudière-Appalaches.

McCormack (1979) a réalisé une caractérisation hydrogéologique de tout le bassin versant de la rivière Saint-François. Le rapport documentant les travaux est très succinct, mais les résultats sont synthétisés dans deux cartes, l'une montrant les conditions hydrogéologiques et le potentiel aquifère du roc et des dépôts meubles et l'autre présentant les conditions hydrochimiques de l'eau souterraine échantillonnée dans la région d'étude. Cette caractérisation a intégré tous les levés précédents réalisés par le Service des eaux souterraines du MRN, notamment 325 sondages réalisés dans la région d'étude ainsi que les propriétés hydrauliques dérivées de 16 puits d'essais. L'étude fait aussi l'inventaire des approvisionnements municipaux en eau souterraine de la région. Le rapport documente aussi la chimie de 162 échantillons d'eau souterraine prélevés dans la région ; les conditions géochimiques sont résumées sous forme de diagrammes de Stiff sur la carte hydrochimique et les symboles distinguent six types d'eau souterraine sur la base des proportions d'ions majeurs. Les eaux de type Ca-HCO₃ dominent dans la région et elles ont généralement de plus faibles concentrations dans les hautes terres au sud-est de la région. On retrouve aussi des eaux de type Mg-HCO₃ de l'est du Lac Saint-François jusqu'à l'ouest du Lac Aylmer, au nord-est de la région d'étude, ainsi qu'entre les lacs Massawippi, Magog et Lovering, à l'ouest de la région. Ces eaux semblent associées à des unités géologiques contenant des roches intrusives ou volcaniques mafiques ou ultramafiques. Des eaux de type Mg-HCO₃ avaient aussi été trouvées juste à l'est du bassin de la Saint-François dans le cadre du PACES Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015). Les autres types d'eau se retrouvent ponctuellement dans le bassin ou dans la partie aval du bassin au niveau des basses-terres du Saint-Laurent qui se trouve hors de la région d'étude du PACES Estrie. Toutes les données du rapport et des cartes de McCormack (1979) ont été intégrées dans la base de données du PACES Estrie. Ce portrait historique pourrait servir de référence pour juger de l'évolution des conditions hydrogéologiques et de l'exploitation des ressources en eau souterraine.

Considérant le potentiel aquifère limité de l'aquifère rocheux régional (section 4.1), la définition du potentiel aquifère dans les dépôts meubles revêt une importance encore plus grande en Estrie. Heureusement, les travaux de Caron (2013) offrent déjà un portrait très détaillé du contexte des dépôts meubles en Estrie. En effet, Caron (2013) a fait la cartographie des sédiments superficiels sur les bassins versants des rivières Saint-François et Chaudière, il a défini la séquence de sédiments et relevé plusieurs coupes naturelles puis produit un modèle 3D de la distribution spatiale de l'épaisseur des principales unités de dépôts meubles. Ces travaux montrent que d'épaisses accumulations (> 15 m) de sédiments se retrouvent dans des vallées enfouies sous les lits des rivières Saint-François et Chaudière ainsi que sous plusieurs de leurs affluents. La séquence de sédiments superficiels définie par Caron (2013) montre qu'il pourrait y avoir un potentiel aquifère intéressant dans la séquence post-glaciaire holocène, notamment dans les sédiments fluvioglaciaires pouvant se retrouver sous des silts et argiles glaciaires et au-dessus du till de Lennoxville dans les vallées enfouies. Il pourrait aussi y avoir un potentiel aquifère dans les sédiments anciens pré-holocènes, mais les données disponibles assurent moins de contrôle

sur la nature et l'épaisseur de ces sédiments en Estrie. Des travaux spécifiques ont été réalisés pour mieux définir le potentiel aquifère des sédiments superficiels à l'aide des données disponibles sur les captages municipaux (section 6.1). Ces travaux ont profité de la collaboration d'Olivier Caron, chercheur à l'UQAM, et de Michel Parent, chercheur à la CGC.

Un rapport du MDDELCC (2016) sur la qualité de l'eau des approvisionnements en eau municipaux avait mis en évidence la problématique de l'arsenic en Estrie. La Direction de Santé publique de l'Estrie a d'ailleurs déjà reconnu ce problème et réalisé des activités de sensibilisation auprès des municipalités en 2010 et en 2014 (Boivin, 2015). Cette problématique mérite une attention particulière pour en documenter l'importance et en comprendre les causes (section 6.3). Les travaux sur cette problématique pourront bénéficier de la bonne documentation des conditions géologiques de l'Estrie (Slivitzky et St-Julien, 1988) qui a un long historique d'exploitation minière (Gauthier et al., 1989 et 1994) (voir aussi la section 3.1). Récemment, une étude a aussi été réalisée sur la présence de contaminants d'origine anthropique et émergents dans les approvisionnements en eau de l'Estrie (Husk et al., 2019). Cette étude a caractérisé ces contaminants dans les approvisionnements municipaux à partir d'eau de surface et d'eau souterraine ainsi que dans des puits résidentiels.

Le PACES Estrie a aussi profité de la réalisation du projet RADEAU 1 (Ageco, 2019) qui a fait l'estimation de l'usage de l'eau, particulièrement à des fins agricoles, ainsi que des conflits d'usage potentiels en relation avec l'impact des changements climatiques (CC). Les résultats de ce projet ont été considérés lors de l'estimation des usages de l'eau dans la région d'étude (section 5.2). L'INRS collabore d'ailleurs au projet RADEAU 2 en faisant l'estimation de la recharge avec HELP pour la région des Laurentides et Laval (Raynauld et al., 2018). Ces travaux ont mené au développement d'un outil nommé *pyHELP* qui facilite l'application de HELP (Gosselin et al., 2020). Cet outil a aussi été appliqué dans le cadre du PACES Estrie pour faire l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux (section 4.3). Enfin, les projets réalisés pour le MELCCFP dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques (PACC) sur le sud du Québec (PSyRESQ) par l'UQAM, l'Université Laval, la CGC et l'INRS couvrent l'Estrie et ont ainsi produit des résultats complémentaires à ceux produits par le PACES Estrie (Gosselin et al., 2021; Larocque et al., 2021).

2.2 Compilation de l'information existante

2.2.1 Acquisition de données existantes

La collecte des informations existantes est une étape particulièrement importante puisqu'elle constitue la base des connaissances hydrogéologiques et géologiques du territoire étudié dans le cadre d'une caractérisation hydrogéologique régionale. Cette activité a été réalisée entre mai 2018 et la fin de 2019. Cette activité comprend les étapes suivantes : 1) acquisition de bases de données existantes, 2) collecte de données géomatiques existantes et 3) saisie de données à partir de documents existants.

Le tableau 2.1 présente l'inventaire de l'acquisition des données existantes. Les données acquises couvrent tous les thèmes des livrables à produire dans le cadre du PACES Estrie. Toutefois, contrairement aux projets antérieurs, il n'y avait plus d'exigence de production d'un livrable sur les activités potentiellement polluantes et les données acquises sur ce sujet n'ont finalement pas été utilisées. Toutes les autres données ont été exploitées pour la production des différents livrables. Les sections sur les thèmes des livrables ou les annexes électroniques donnent plus de détails sur l'extraction, la vérification et le traitement des données spécifiques à la production des livrables du PACES Estrie. L'atlas hydrogéologique du PACES Estrie compile aussi les sources des couches représentées sur les livrables cartographiques (Raynauld et al., 2024) et ces informations sont aussi contenues dans les métadonnées de la Géodatabase.

Tableau 2.1 : Inventaire de l'acquisition des données existantes

Thèmes	Description des jeux de données	Source ¹	Format
Activités potentiellement polluantes (pas utilisé)	Codes d'utilisation de bien-fonds (CUBF)	MAMOT	Géodatabase
	Répertoire des terrains contaminés	MELCC	Excel
	Répertoire des dépôts de sols et de résidus industriels	MELCC	Excel
Affectation du territoire	Portrait provincial d'aménagement du territoire (PPAT)	MAMOT	Géodatabase
	Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA)	MERN	Géodatabase
	Utilisation du territoire (2015 et 2016)	MELCC	Géodatabase
	Utilisation du territoire du Vermont	U.S. Geological Survey	DBF
Climat	Données climatiques quotidiennes à maillage de 10 km au Québec	MELCC-Service Info-Climat	Fichier NetCDF
	Localisation des stations météorologiques	MELCC-DSEE	Excel
	Humidité relative	Copernicus Climate Change Service (2022)	Grille GRIB
Géologie	Géologie du Quaternaire (révisée dans le cadre du projet)	MERN-SIGEOM	Géodatabase
	Géologie du Quaternaire du Vermont	U.S. Geological Survey	Shapefile
	Affleurements de compilation	MERN-SIGEOM	Shapefile
	Compilation de données géologiques (zones géologiques, linéaments)	MERN-SIGEOM	Géodatabase
	Compilation de données géologiques (provinces et zones géologiques, failles)	MERN-SIGEOM	Géodatabase
	Compilation de données géologiques (zones géologiques et linéaments)	MERN-SIGPEG	Shapefile

Thèmes	Description des jeux de données	Source ¹	Format
Hydrogéologie	Forages diamant	MERN-SIGPEG	Shapefile
	Localisation des puits du réseau de suivi (RSESQ)	MELCC	Excel, Access, PDF
	Prélèvements municipaux et privés (Catégories 1, 2 et 3) (localisation des prélèvements et volume d'eau capté)	MELCC	Excel
	Inventaire des grands préleveurs (localisation des prélèvements et volume d'eau capté)	MELCC	Excel
	Localisation des puits (SIH) et niveaux d'eau souterraine	MELCC-SIH	Access
	Localisation des puits et niveaux d'eau souterraine	Vermont Agency of Natural Resources	Shapefile
	Localisation des forages pétroliers et miniers	MERN	Géodatabase
	Localisation des forages géotechniques (MTQ)	MTQ	Excel, Shapefile
	Données des travaux de McCormack	MERN	Rapport
	Rapports d'études hydrogéologiques municipaux	Municipalités, MRC, Direction régionale du MELCC	Rapport
Hydrographie	Localisation des barrages (avec capacité)	MELCC-CEHQ	Géodatabase
	Cadre de référence hydrographique du Québec (CRHQ)	MELCC-DPEP	Géodatabase
	Base de données topographiques du Québec (BDTQ)	MERN	Géodatabase
	Base de données pour l'aménagement du territoire du Québec (BDAT)	MERN	Arc Info
	Région hydrographique (unités de découpage hydrographique (UDH))	MERN	Shapefile
	Carte des régions hydrographiques (bassins hydrographiques multiéchelles)	MELCC-CEHQ	Shapefile, Géodatabase
	Carte des limites de bassins versants (ZGIEBV)	MELCC	Shapefile
	Milieux humides potentiels Milieux humides détaillés		
Hydrométrie	Localisation des stations hydrométriques	MELCC-CEHQ	Excel
	Suivi hydrologique de différentes stations hydrométriques	MELCC-CEHQ	Texte
	Années de début et fin des données aux stations hydrométriques	MELCC-CEHQ	Texte
	Débits de base journaliers aux stations sélectionnées	MELCC-CEHQ	Texte
Occupation du sol	Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD)	FADQ	Shapefile
	Occupation du sol	MAPAQ	Grid
Pédologie	Information pédologique	IRDA (MAPAQ)	Arc Info, Shapefile
	Information pédologique	USDA	Arc Info, Shapefile
Photos aériennes	Orthophotos	MERN	TIF

Thèmes	Description des jeux de données	Source ¹	Format
Qualité de l'eau	Carte de la qualité de l'eau de surface des tronçons (BQMA)	MELCC	Excel
	Banque de données géochimiques du Québec (BADGEQ)	MERN	Access
Routes, limites municipales et toponymie	Base de données topographiques du Québec (BDTQ)	MERN	Shapefile
	Base de données pour l'aménagement du territoire du Québec (BDAT)	MERN	Arc Info
	Base de données géographiques et administratives (BDGA), échelle 1/1000000	MRNF (2008)	Géodatabase
	Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA)	MERN (2017)	Shapefile
	Adresse Québec	À vérifier	Géodatabase
Topographie	Modèle numérique altimétrique (MNA)	MERN	TIF
	Levés LiDAR	MERN	Fichier TIF et LAS
	SRTMGL1: NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second V003	NASA	Fichier HGT
Végétation	Système d'information écoforestière (SIEF)	MFFP	Shapefile
	Indice de surface foliaire <i>Leaf Area Index (LAI)</i> ³	RNCAN	Grille
	Période de croissance de l'Atlas agroclimatique du Québec	AgCan, 2016	Grille

1 : Les acronymes de certains ministères ont changé depuis l'obtention des données mais ils n'ont pas été modifiés dans le tableau. MAMOT = MAMH, MELCC = MELCCFP, MERN = MRNF, MTQ = MTMD.

2 : <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/ecv-for-climate-change?tab=overview>

3 : <https://open.canada.ca/data/fr/data-set/37745ea7-d0cf-4ef6-b6b8-1cb3a7fce0b8>

Les levés Lidar et les orthophotographies peuvent avoir plusieurs applications dans le cadre du PACES Estrie, notamment pour préciser la cartographie des formations superficielles (section 3.2). Les données Lidar obtenues du MERN et traitées couvrent tout le territoire du PACES Estrie. Les données laser contenues dans les fichiers en format LAS ont été livrées par le MERN dans deux formats de livraison différents : 1) l'ancien format de livraison contenant les données brutes (DB), les retours au sol (DS) et les données « épurées » (DE), et 2) le nouveau format de livraison, où tous les points sont classifiés (DC). Afin de pouvoir créer un modèle numérique de terrain (MNT) uniforme à l'échelle régionale, et considérant que peu d'information est disponible sur le processus de classification des points lasers, il a été jugé pertinent de traiter à nouveau les données laser brutes afin d'identifier les retours au sol. Dans la littérature, l'algorithme du *Simple Morphological Filter* (SMRF) de Pingel et al. (2013) est généralement reconnu comme le filtre le plus efficace et exact pour classier correctement des retours laser discrets au sol dans un contexte topographique de vallée. Cet algorithme a donc été choisi pour le traitement des données brutes. Le script, implanté dans la *Point Data Abstraction Library* (PDAL, 2018) sous le nom de *Simple Morphological Filter* (SMRF), est exécuté en ligne de commande dans le langage C++, et répété automatiquement pour toutes les tuiles laser avec un *pipeline* (exécution répétée) JSON.

Les tuiles laser classifiées par SMRF sont exportées dans de nouvelles tuiles laser en format compressé LAZ. Un second algorithme, *Points2Grid*¹, est ensuite utilisé pour passer du format

¹ Points2Grid: A Local Gridding Method for DEM Generation from Lidar Point Cloud Data. URL : <https://github.com/CRREL/points2grid/>

de nuage de points classifié à un format matriciel standard, utilisable dans un système SIG conventionnel. Cet algorithme transforme de manière simple et élégante les retours au sol identifiés précédemment en une grille à l'aide d'une méthode d'interpolation utilisant un rayon de recherche et le principe des plus proches voisins. La version la plus à jour du code est maintenue par le *US Army Corps Cold Regions Research and Engineering Lab (CRREL)*. L'outil permet ainsi de créer une grille par tuile laser. Une mosaïque de ces grilles peut être compilée dans QGIS.

Les statistiques des tuiles des deux régions montrent qu'en moyenne, environ 2.5 à 3 retours laser par m² ont été enregistrés au total durant le levé. À la suite de la classification pour isoler les retours au sol, la moyenne descend à environ 1.05 à 1.2 retours au sol par m² (l'objectif de la mission était de récolter au moins 1 point au sol par m²). Cette résolution permet de créer un MNT régional doté d'une résolution spatiale de 1 m x 1 m avec une précision d'environ 15 cm. Le tableau 2.2 présente le contenu des différents fichiers produits à la suite du traitement.

Tableau 2.2 : Contenu des fichiers produits à la suite du traitement

Nom du fichier TIF	Contenu
DTM_1m	Modèle numérique de terrain, résolution de 1 m, 32 bit
DTM_1m_HS_A315_H35	Relief ombré, azimuth de 315°, angle d'incidence de 35°, 32 bit
dtm_1m_HS_A315_H35_8bit	Relief ombré, azimuth de 315°, angle d'incidence de 35°, 8 bit
dtm_1m_MULTI-HS_D8_H35	Relief ombré multidirectionnel, angle d'incidence de 35°, 32 bit
dtm_1m_MULTI-HS_D8_H35_RGB	Relief ombré multidirectionnel, angle d'incidence de 35°, RGB

Une fois la mosaïque du MNT régional compilée, des dérivées typiquement utilisées pour l'interprétation de la géologie sont créées. Une analyse de composante principale (PCA) est effectuée sur le MNT régional afin d'identifier les directions d'illumination (azimuts) qui sont le plus responsables de la variabilité du terrain. Des modèles de relief ombragés (*hillshades*) sont créés avec un angle d'indice et un azimuth approprié pour la région à l'étude afin de mettre en évidence la variabilité du terrain. Un modèle de relief ombragé à illuminations multiples (dans les canaux RGB) peut ensuite être créé en utilisant les directions identifiées dans l'analyse de PCA. L'outil *Relief Visualization Toolbox (RVT)* de Kokalj et al. (2013) est utilisé pour créer ces dérivés.

2.2.2 Acquisition de données à partir des documents existants

En plus de la collecte de données à partir de couches d'informations géomatiques ou de bases de données existantes, un travail d'acquisition, de compilation et d'intégration des données extraites des documents a été amorcé au début de projet et s'est poursuivi en 2019-2020. Cette tâche a été facilitée par la participation active du MELCCFP, du COGESAF, des municipalités et des MRC de l'Estrie. En amont de la réception des rapports, une autorisation écrite d'accès aux rapports hydrogéologiques devait être obtenue auprès du propriétaire des données afin de pouvoir les utiliser dans le cadre du projet actuel. En contrepartie, l'INRS s'est engagée à transmettre les rapports numérisés et la base de données au MELCCFP ainsi qu'aux partenaires officiels du PACES Estrie. Des détails sur la saisie des données à partir des rapports sont fournis dans le rapport d'étape de la Phase II du PACES Estrie (Huchet et al., 2020). Ces rapports d'étape et leurs annexes électroniques sont disponibles aux annexes 4L et 4M.

Au 1^{er} avril 2022, 210 documents issus pour l'essentiel de rapports hydrogéologiques rédigés par des firmes de consultants, et donc jugés fiables, avaient été recueillis, numérisés et traités pour en extraire les informations pertinentes au projet. Les renseignements extraits comprennent 89 données géochimiques issues de résultats d'analyse à la suite de l'échantillonnage de points de

captage en eau souterraine, 664 descriptions stratigraphiques effectuées lors de travaux de forage, 19 mesures du niveau de nappe, 40 données hydrauliques déduites de l'analyse d'essais de pompage et aussi les limites des aires de protection de 79 approvisionnements en eau potable. Au total, 449 puits ainsi que 264 sondages et quatre sources ont complété la base de données du projet (tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Nombre de rapports collectés auprès des municipalités et des partenaires avec données extraites à partir de ces rapports.

MRC	Rapport	Données ponctuelles			Types de données ¹				
		Puits	Source	Trou	Géoch.	Strati.	Piézo.	Hydrau.	Aires
Le Granit	60	65	0	53	31	101	0	14	30
Les Sources	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Le Haut-St-François	31	121	0	75	6	193	0	7	10
Le Val-St-François	14	43	0	31	5	72	0	2	3
Sherbrooke	26	31	0	47	0	78	0	0	0
Coaticook	32	88	4	30	38	97	1	7	22
Memphrémagog	38	92	0	28	5	114	15	7	10
Beauce-Sartigan	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Les Appalaches	7	9	0	0	4	9	3	3	4
Arthabaska	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PACES Estrie	210	449	4	264	89	664	19	40	79

1 : Géoch. (Géochimie), Strati. (Stratigraphie), Piézo. (Piézométrie), Hydrau. (propriétés hydrauliques).

Dans le tableau 2.3, les données ponctuelles sont réparties en trois catégories, soit les puits d'approvisionnement (Puits), les points d'émergence de l'eau souterraine (Source) et les forages qui ne sont pas aménagés, communément appelés « sondages » (Trou). La somme des données ponctuelles pour chaque région est également indiquée (Total). Les types de données comprennent des résultats d'analyses géochimiques (Géoch.), des descriptions stratigraphiques établies à partir de travaux de forage (Strati.), des valeurs de profondeur du niveau de nappe permettant de définir la piézométrie (Piézo.), des propriétés hydrauliques de la formation géologique aquifère issues de l'interprétation d'essais de pompages (Hydrau.), et des délimitations d'aires de protection et d'alimentation (Aires) (détails à l'annexe 4Q).

2.2.3 Bilan des données acquises

Afin d'intégrer l'ensemble des données collectées pendant le projet, une base de données a été créée sur une nouvelle structure basée sur les standards de l'OGC (*Open Geospatial Consortium*) qui diffère de celle des PACES Chaudière-Appalaches et Montérégie Est dont l'INRS a eu la responsabilité par le passé (section 2.4). Les données collectées peuvent être issues d'informations existantes extraites de plusieurs sources. Les informations provenant des rapports des firmes de consultants en hydrogéologie viennent également s'ajouter à cette base de données. De plus, les nouvelles données acquises sur le terrain dans le cadre du PACES Estrie y sont aussi ajoutées. La base de données du PACES Estrie contient 109 219 données ponctuelles (tableau 2.4). L'intégralité de ces données ponctuelles a été extraite des bases de données ministérielles, de rapports ou d'études antérieurs sur un territoire couvrant l'Estrie et une zone tampon de 10 km autour de la région d'étude.

Les informations intégrées à cette base de données à référence spatiale peuvent être de natures diverses : géochimiques (résultats d'analyse), géologiques (affleurements), stratigraphiques

(descriptions de forage), hydrauliques (essais de pompage) ou encore piézométriques (niveaux de nappe). Plusieurs vérifications sont nécessaires avant d'intégrer de nouvelles données à cette base de données. Ainsi, un exercice de validation a été réalisé en se référant au protocole de vérification de la fiabilité et de la validation des forages développé par l'UQAC dans le cadre des PACES (Lambert et al., 2010; annexe 3). Le but est ici de sélectionner les données les plus pertinentes pour la production des différents livrables du projet. De plus, afin de fournir une indication concernant la qualité des livrables produits, le niveau d'exactitude des données intégrées a aussi été estimé en leur attribuant des cotes de fiabilité. L'une des étapes de ce protocole consiste notamment à identifier les doublons et sélectionner les forages les plus pertinents (ex. : certains points d'échantillonnage de la Banque de Données Géochimique du Québec, BADGEQ) peuvent être également retrouvés dans le Système d'information hydrogéologique (SIH), c'est aussi le cas pour plusieurs puits échantillonnés lors des travaux de l'été 2019 qui se retrouvent dans le SIH.

Tableau 2.4 : Bilan des données acquises et intégrées à la base de données

Description de la source des données	Organisme ou auteur	Nombre de données
Les affleurements (pas de titre officiel)	Caron, O.	43245
Système d'information hydrogéologique (SIH)	MELCCFP	41075
Banque de Données Géochimique du Québec (BADGEQ)	MERN	12712
Water well database	Maine Geological Survey	9742
Système d'information géominière (SIGEOM)	MERN	1564
Base de données du PACES Montérégie Est (base de données de terrain)	INRS-ETE	343
Rapports de firmes de consultants en hydrogéologie	Municipalités et partenaires	213
Base de données du PACES Chaudière-Appalaches (base de données de terrain)	INRS-ETE	107
Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du RCES Forage Allen II - Note technique no. 1	AGEOS	54
Étude hydrogéologique du bassin versant de la Yamaska	MERN	48
Cartographie hydrogéologique du bassin de la rivière Chaudière, Secteur Basse- Chaudière (Rapport final)	Tecsult Inc.	40
Banque de données géotechniques	MTQ	29
Liste d'études et de forages géothermiques	CCÉG	24
Évaluation hydrogéologique préliminaire Projet d'implantation d'un LES sur la propriété de la MRC à St-Joachim-de-Shefford	H.G.E Hydro Conseil Inc.	14
Étude hydrogéologique du bassin versant de la Richelieu (programme de connaissances intégrées)	McCormack, R.	6
Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ)	MELCCFP	3
Total		109219

2.3 Travaux de caractérisation

L'une des activités principales de la seconde phase du projet (année financière 2019-2020) était la réalisation d'une campagne de travaux de terrain (documenté dans le rapport de la Phase II qui est disponible à l'annexe 4M). Les activités reliées à cette campagne comprenaient :

- Des forages conventionnels réalisés par une compagnie de forage spécialisée sous la supervision du MELCCFP afin d'installer 10 nouveaux puits d'observation intégrés au réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) dans le but de suivre, en continu et sur le long terme, les variations des niveaux d'eau souterraine et d'offrir la possibilité de vérifier l'état qualitatif de la nappe de façon ponctuelle ;
- La mise en place, par les techniciens du MELCCFP, de capteurs de pression dans ces nouveaux puits d'observation afin de suivre les fluctuations du niveau d'eau ;
- Une importante campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine impliquant l'analyse de 198 échantillons (incluant les doublons) de 180 sites différents : 151 puits privés, 14 puits du RSESQ (dont les 10 nouveaux puits d'observation) et 15 approvisionnements municipaux. Ces échantillons ont tous été analysés pour définir la composition chimique générale de l'eau souterraine. Pour certains échantillons avec des concentrations suffisantes, des analyses plus poussées ont été effectuées afin de différencier les différentes espèces d'arsenic (DMA, MA, As³⁺ et As⁵⁺). Pour d'autres, des analyses ont été faites afin de définir les compositions en isotopes (¹⁸O, ²H, ³H et ¹⁴C), en gaz nobles (He, Ne) ou encore la présence de traceurs environnementaux récents (CFC et SF₆) ;
- Une enquête sur les problématiques locales des approvisionnements municipaux auprès de 23 municipalités impliquées dans le projet, soit par la présence d'un des nouveaux puits du RSESQ ou par l'échantillonnage de l'un de leur approvisionnement en eau.

Ces quatre activités de terrain sont décrites plus en détail dans la présente section. Chaque sous-section couvre en premier lieu l'objectif de ces travaux avant d'aborder la méthodologie employée pour finalement proposer une synthèse des travaux réalisés accompagnée, dans certains cas, par un exemple de résultats.

2.3.1 *Implantation de puits d'observation par forages conventionnels*

2.3.1.1 Objectifs

Le but initial de ces forages conventionnels au roc était de bonifier le réseau de puits d'observation du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) en offrant alors la possibilité au MELCCFP de suivre de façon continue les fluctuations de la nappe en Estrie et de pouvoir mesurer ponctuellement la qualité des eaux souterraines de l'aquifère régional fracturé comme ce fut le cas dans le cadre de la campagne d'échantillonnage de 2019. Les travaux de forages eux-mêmes permettent d'obtenir des informations essentielles comme la confirmation de la profondeur du roc (épaisseur de dépôts meubles) ou encore la description des unités traversées, complétant alors la base de données du projet actuel et permettant aussi d'améliorer le niveau de précision du modèle géologique quaternaire (section 3.2).

2.3.1.2 Méthodologie employée

En conformité avec le budget dédié par le MELCCFP à la réalisation de forages dans les régions de nouveaux PACES, il a été décidé d'implanter 10 nouveaux puits d'observation en Estrie (Lefebvre et al., 2019). L'emplacement de ces nouveaux puits répondait à plusieurs critères :

- Hormis la MRC du Haut-Saint-François qui disposait déjà de trois puits du RSESQ avant ces travaux, chaque MRC devait avoir au moins un puits d'observation sur son territoire ;
- En Estrie, le choix des municipalités cibles s'est porté sur des considérations locales reliées à l'eau. Ces enjeux (qualité, quantité, recharge et stratigraphie) ont été étudiés grâce aux informations préliminaires recueillies en amont du projet (Lefebvre et al., 2019; annexe 4L). Ces enjeux sont détaillés dans le tableau 2.5 et tiennent compte (1) de la pression sur la ressource en eau souterraine (usage de l'eau), (2) de la présence de secteurs agricoles pouvant impacter les eaux souterraines, (3) de la topographie en lien avec les secteurs de recharge présumés et les zones d'émergence et (4) de l'épaisseur supposée des successions quaternaires, ce qui devrait permettre d'obtenir une bonne description des unités traversées par les forages planifiés ;
- Les lots municipaux ont été privilégiés pour l'implantation des puits, ce qui a permis d'impliquer les acteurs locaux dès les prémices du projet en obtenant, lorsque nécessaire, les autorisations adéquates (avis de résolution) pour les travaux de forage. Ceci assure alors une longévité à ces puits d'observation qui ne seront pas comblés au terme du projet mais intégrés au RSESQ alors que les 10 municipalités concernées autorisent l'accès régulier aux techniciens du MELCCFP pour la relève des sondes pressiométriques ;
- Les secteurs anthropisés ont été évités tandis que les zones boisées ou agricoles ont été priorisées pour le choix des parcelles municipales retenues. De même, l'emplacement final des puits considérait une distance de séparation minimale de 1 km avec tout puits municipal et de 100 m avec tout puits privé afin que les niveaux d'eau enregistrés ne soient pas influencés par des opérations de pompage ; ceci dans le but de pouvoir éventuellement estimer la recharge à l'aide des niveaux d'eau enregistrés, notamment avec un outil tel que GWHAT (Gosselin, 2016) ;
- Grâce aux informations issues de photos aériennes et aux prises de vue depuis la rue, l'accessibilité des différents sites avait été évaluée en amont puis validée lors d'une visite de terrain en avril 2019 en compagnie d'un employé municipal.

Après cette visite au printemps 2019, les municipalités ont été invitées à autoriser le MELCCFP à installer un puits d'observation sur les parcelles identifiées et donc à accorder un accès temporaire à la compagnie de forage pour les travaux puis un accès à long terme au personnel du MELCCFP pour y installer des équipements de suivi des niveaux de nappe et effectuer des relevés réguliers.

2.3.1.3 Description des travaux

En amont de la validation des sites d'implantation définitifs, un appel d'offres avait été émis en mars 2019 par le MELCCFP pour la réalisation de 31 forages et l'aménagement de puits d'observation sur 25 sites différents pour l'ensemble des PACES. Pour l'Estrie, cet appel d'offres concernait initialement la réalisation de 10 forages au roc sur 10 sites différents. Finalement, c'est le Groupe Puitbec, établi à Victoriaville, qui a été retenu pour ce contrat.

Pour le site de Coaticook, un ancien puits d'alimentation en eau a été réutilisé à des fins de puits d'observation. Puisqu'aucun rapport de forage n'a été trouvé dans les archives pour ce puits, il a fallu préciser certaines données afin d'établir une description approximative du puits.

Tableau 2.5 : Enjeux identifiés lors de la sélection des sites et intérêt potentiel de chaque nouveau puits d'observation du RSESQ.

Municipalité	Enjeux				Intérêt				ID Puits PACES
	Usage de l'eau	Occupation du sol	Topographie	Géologie	Quantité	Qualité	Recharge	Stratigraphie	
Canton de Stanstead	Résidences en bordure des lacs (puits privés)	Secteur agricole	Haut topographique avec roc affleurant (recharge directe)	-	X	X	X	-	PO-01
Coaticook	Proche d'un puits municipal	Secteur agricole important	Limite de partage d'un BV de niveau 3	Épaisseur de dépôts meubles importante	-	X	X	X	PO-02
Compton	-	Secteur agricole important	Transition vers un haut topographique (recharge)	-	-	X	X	-	PO-03
Magog	Nombreux puits privés proches des lacs	Boisé	Haut topographique local avec roc en sous-surface (recharge quasi-directe)	-	X	-	X	-	PO-04
Nantes	-	Boisé	Transition vers un haut topographique local (recharge locale)	-	-	-	X	-	PO-05
Notre-Dame-des-Bois	Proche d'un puits municipal et d'un fort développement résidentiel (nombreux puits privés)	Boisé	Haut topographique avec roc en sous-surface (recharge quasi-directe)	-	X	-	X	-	PO-06
Sherbrooke	Zone résidentielle (puits privés)	Variée (agricole, boisé et urbain)	Haut topographique avec roc en sous-surface (recharge quasi-directe) et limite de partage d'un BV de niveau 2	-	X	-	X	-	PO-07
Stornoway	Présence de puits privés dans le village	Généralement boisé	-	Épaisseur de dépôts meubles importante	X	-	X	X	PO-08
Val-Joli	Quelques puits privés le long de la rivière	À l'aval de Sherbrooke (zone urbaine) et d'un secteur agricole	Vallée de la rivière Saint-François (zone d'émergence)	Épaisseur de dépôts meubles importante et variabilité supposée importante des unités	-	X	-	X	PO-09
Weedon	Proche d'un puits municipal	-	Transition vers un haut topographique avec roc en sous-surface (recharge quasi-directe)	-	-	-	X	-	PO-10

Les travaux de forages se sont déroulés du 15 au 24 mai 2019 hormis pour le site de Stornoway où la foreuse est intervenue le 6 juillet 2019 (tableau 2.6). Pour ce site, des travaux d'aménagement avaient été finalisés le 6 juin 2019 afin de faciliter l'accès à la foreuse (figure 2.2). Tous ces forages destructifs ont été réalisés à l'aide de foreuses sur camion de type Foremost à double tête de rotation (figure 2.2). Quatre de ces forages ont été faits par le Groupe Puitbec et cinq par son sous-contractant : l'entreprise Géopros Lapointe Inc., basée à Sherbrooke.

Sous la supervision du MELCCFP, les foreurs devaient respecter une pénétration dans le roc d'au moins 15 m afin d'offrir une amplitude suffisante pour la mesure des battements de nappe et de permettre la mesure de la qualité de l'eau souterraine représentative de la partie supérieure du roc. Ainsi, pour les neuf forages, un total de 335,27 m de matériaux a été traversé dont 263,95 m de roc, soit près de 30 m par forage en moyenne.

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 (annexe 4A). Par la suite, les neuf nouveaux forages ont été aménagés en puits d'observation selon les spécifications indiquées dans l'appel d'offre (tableau 2.7). En effet, les caractéristiques de construction d'un puits conventionnels au roc doivent répondre aux exigences du RPEP (Québec, 2014) afin de réduire les risques de contamination de l'aquifère capté (figure 2.1).

Finalement, ces 10 nouveaux puits d'observation viennent compléter le Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) géré par le MELCCFP. Comme la nouvelle région d'étude disposait seulement de dix puits de suivi de nappe dont cinq sur le territoire non-couvert par les anciens PACES (tableau 2.8), cela vient alors bonifier de manière significative la couverture du réseau. Les descriptions stratigraphiques de ces anciens puits sont également disponibles à l'annexe 2 du rapport de la Phase II (Huchet et al., 2020).

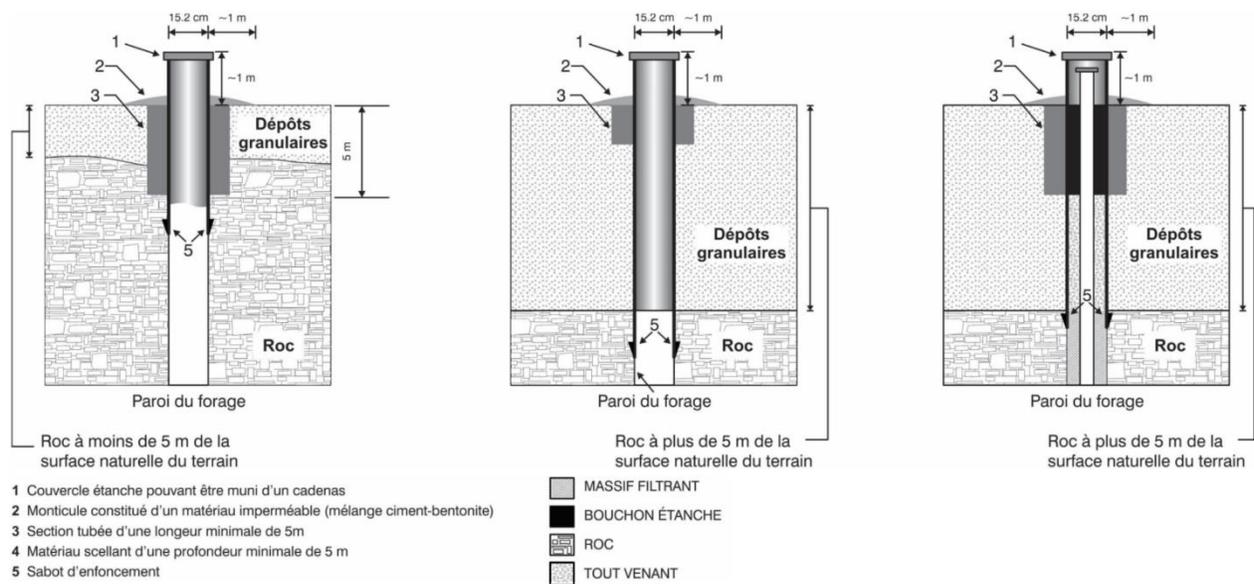


Figure 2.1 : Schémas de construction des puits conventionnels au roc (Québec, 2014)



Figure 2.2 : Illustrations des travaux de forage pour l'implantation des dix nouveaux puits d'observation intégrés au RSESQ

Tableau 2.6 : Description des travaux de forages réalisés en 2019 en Estrie

Municipalité	ID Puits RSESQ	ID Puits PACES	Date de forage	Compagnie de forage	Méthode	Prof. du forage (m)	Aquifère
Weedon	03020004	PO-10	15 mai 2019	Groupe Puitbec	Rotation	24,38	Roc
Stornoway ^a	03020005	PO-08	3 juillet 2019	Groupe Puitbec	Rotation	60,96	Roc
Nantes	03020006	PO-05	16 mai 2019	Groupe Puitbec	Rotation	24,38	Roc
Notre-Dame-des-Bois	03020007	PO-06	17 mai 2019	Groupe Puitbec	Rotation	48,77	Roc
Coaticook ^b	03020008	PO-02	-	-	-	70,15 ^c	Roc
Compton	03020009	PO-03	21 mai 2019	Géopros Lapointe Inc. (pour Puitbec)	Rotation	30,48	Roc
Canton de Stanstead	03020010	PO-01	24 mai 2019	Géopros Lapointe Inc. (pour Puitbec)	Rotation	30,48	Roc
Magog	03020011	PO-04	23 mai 2019	Géopros Lapointe Inc. (pour Puitbec)	Rotation	36,58	Roc
Sherbrooke	03020012	PO-07	22 mai 2019	Géopros Lapointe Inc. (pour Puitbec)	Rotation	24,38	Roc
Val-Joli	03020013	PO-09	23 mai 2019	Géopros Lapointe Inc. (pour Puitbec)	Rotation	54,86	Roc

a : le terrain a nécessité des travaux d'aménagement en amont ;

b : il s'agit d'un ancien puits d'alimentation réutilisé à des fins de suivi de nappe dans le cadre du projet ;

c : la profondeur est ici approximative.

Tableau 2.7 : Description des puits d'observation réalisés en 2019 en Estrie puis intégrés au RSESQ

ID Puits RSESQ	ID Puits PACES	Tubage de protection			Cimentation		
		Type	Diamètre (mm)	Hauteur de la margelle (m)	Base (m)	Type	Base (m)
03020004	PO-10	Acier	152	-0,98	5,18	Bentonite	5,18
03020005	PO-08	Acier	152	-0,99	27,05	-	-
03020006	PO-05	Acier	152	-0,99	8,33	Bentonite	5,18
03020007	PO-06	Acier	152	-0,92	28,96	-	-
03020008	PO-02	Acier	152	-1,17	7,69 ^a	-	-
03020009	PO-03	Acier	152	-0,68	11,51	-	-
03020010	PO-01	Acier	152	-0,69	5,41	Bentonite	5,33
03020011	PO-04	Acier	152	-0,93	10,97	-	-
03020012	PO-07	Acier	152	-0,75	5,61	Bentonite	5,49
03020013	PO-09	Acier	152	-1,01	17,88	-	-

a : la base du tubage de protection est approximative.

Tableau 2.8 : Anciens puits du RSESQ présents sur la zone d'étude du PACES Estrie

Zone non couverte par les anciens PACES			Zone commune avec les anciens PACES		
Municipalité	ID Puits RSESQ	Aquifère	Municipalité	ID Puits RSESQ	Aquifère
Orford	03020001	Roc	Disraeli	03020002	Granulaire
Dudswell	03027032	Roc	Ulverton	03027021	Granulaire
Saint-Isidore-de-Clifton	03027061	Granulaire	Valcourt	03030010	Roc
Saint-Isidore-de-Clifton	03027062	Granulaire	Potton	03040014	Roc
Cookshire-Eaton	03027091	Granulaire	Eastman	03040015	Roc

2.3.2 Installation de capteurs de pression

2.3.2.1 Objectifs

La pose de capteurs de pression dans des puits sert à enregistrer les fluctuations de la nappe de façon régulière et continue. À court terme (au moins sur une année hydrologique complète), ces données peuvent être utilisées pour estimer la recharge des aquifères tandis qu'un suivi sur le long terme (une dizaine d'années au moins) peut permettre d'estimer l'impact des changements climatiques ou des activités anthropiques sur le taux de renouvellement des ressources en eau souterraine.

2.3.2.2 Méthodologie employée

Chaque puits de suivi a été équipé d'un capteur de pression (*logger*) installé à une profondeur suffisante sous le niveau de nappe afin d'éviter d'être dénoyé en période d'étiage. Afin de s'affranchir de tout dénoyage imprévu lié au rabattement annuel présumé de la nappe, les puits d'observation recoupent le roc sur 30 m en moyenne.

Il est également nécessaire d'enregistrer des mesures de la pression atmosphérique à l'aide d'une sonde barométrique (*barologger*) généralement installée dans la tête du puits. Cette mesure de la pression au sol est déduite de la pression totale mesurée par le capteur de pression et permet alors d'obtenir la pression exercée par la colonne d'eau (figure 2.3).

Mesure du niveau piézométrique

$$Z_{\text{nappe}} = Z_{\text{sonde}} + h_{\text{eau}} = Z_{\text{sonde}} + (h_{\text{tot}} - h_{\text{air}})$$

où

Z_{nappe} : profondeur de la nappe (m/sol)

Z_{sonde} : profondeur de la sonde (m/sol)

h_{eau} : pression de la colonne d'eau (m)

h_{tot} : pression totale (air + eau) (m)

h_{air} : pression atmosphérique (m)

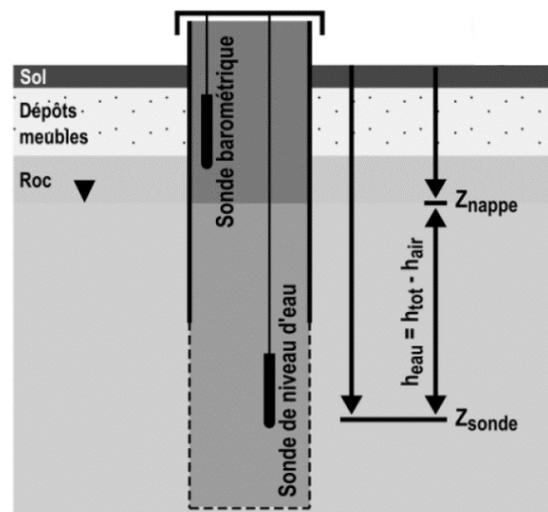


Figure 2.3 : Configuration type pour la mesure du suivi piézométrique dans un puits

Habituellement, les enregistrements dans les puits du RSESQ sont programmés à un intervalle de 6 heures ; un pas de temps suffisant pour capter les fluctuations quotidiennes de la nappe dues aux changements de pression atmosphérique (cas d'une nappe captive) ou à l'infiltration des précipitations (cas d'une nappe libre). Les techniciens du MELCCFP prennent en charge la relève des sondes des puits du RSESQ deux fois par année : au printemps (de la fin avril à la fin juin) et à l'automne (de la fin septembre à la fin novembre).

2.3.2.3 Description des travaux

Peu de temps après la finalisation des travaux de forages, les 10 nouveaux puits du réseau de suivi de l'Estrie ont été équipés de capteurs de pression Edge LT M10 de la compagnie Solinst® qui supportent une colonne d'eau de 10 m maximum. Les données collectées seront compensées par quatre sondes barométriques Solinst Edge LT M1.5® installées dans la tête de quatre puits de suivi et situées à une distance raisonnable des puits proches.

Afin de répondre aux exigences d'un projet réalisé par l'INRS sur le RSESQ (Gosselin et al., 2020), pour notamment déterminer les conditions de confinement sur chaque puits grâce à la fonction de réponse barométrique (*Barometric Response Function – BRF*), l'intervalle d'enregistrement a été programmé aux 15 minutes et ce pendant une année minimum. Par la suite, toutes les sondes ont été programmées pour des mesures aux 6 heures.

La tournée de l'automne 2019, menée par le MELCCFP, a permis de s'assurer du bon fonctionnement des sondes avant la recharge printanière. Après quelques années d'acquisition de données, ces mesures du niveau de nappe pourront éventuellement permettre (1) de déterminer les conditions de confinement dans l'environnement proche du puits, (2) d'estimer le taux de recharge de l'aquifère rocheux ainsi que (3) de vérifier l'éventuelle influence de pompages locaux sur les niveaux d'eau.

2.3.3 Échantillonnage de l'eau souterraine

2.3.3.1 Objectifs

L'objectif d'une campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine dans des puits, qu'ils soient au roc ou dans les dépôts granulaires, est d'établir un portrait de la géochimie (section 4.6) et de la qualité (section 5.3) de l'eau souterraine dans la région d'étude. À la suite de l'interprétation des résultats d'analyse, il est alors possible d'améliorer la compréhension du système d'écoulement régional et d'identifier les mécanismes (naturels ou anthropiques) contrôlant la géochimie des eaux souterraines. De plus, dans le cadre du PACES Estrie, des travaux spécifiques ont été réalisés pour mieux comprendre la problématique de la contamination naturelle de l'eau souterraine par l'arsenic et le manganèse (section 6.3) ainsi que pour évaluer le risque de contamination des puits municipaux (section 6.4). Le temps de résidence (âge) de l'eau souterraine défini grâce aux données géochimiques a aussi servi de vérification aux travaux de modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine afin de mieux comprendre le fonctionnement du système aquifère régional (section 6.2).

2.3.3.2 Méthodologie employée

Dans le but de sélectionner les sites d'échantillonnage, une grille a été créée au printemps 2019 afin d'assurer une couverture spatiale adéquate du territoire non couvert par les anciens PACES (voir l'annexe 1.2 du rapport de la Phase II à l'annexe 4M; Huchet et al., 2020). Sur cette grille de 191 mailles de 7x7 km, l'échantillonnage de 175 sites était initialement planifié considérant les contraintes de temps et budgétaires.

Les travaux initiaux ayant révélé la présence récurrente d'arsenic dans les eaux souterraines sur certains secteurs de l'Estrie, il était prévu de doubler les sites d'échantillonnage sur les 26 mailles localisées dans ces secteurs. De plus, l'établissement de cette grille a permis d'identifier 42 mailles où aucun échantillonnage n'a été envisagé. Ces dernières correspondaient soit (1) à des zones avec une faible densité de résidences individuelles (moins de cinq puits du SIH dans la maille), (2) à des sites déjà échantillonnés lors des PACES antérieurs ou encore (3) à l'existence de puits municipaux avec des données de géochimie fiables et sans traitement provenant de données sur le réseau de distribution ou de rapports de firmes de consultants. Pour les 123 mailles restantes, il a donc été planifié d'échantillonner un seul site. Le choix de ces mailles considérait plusieurs éléments : (1) une densité importante de résidences individuelles (plus de cinq puits privés par maille dans le SIH), (2) la présence d'un puits du RSESQ qu'il soit ancien ou nouveau, (2) l'existence d'un site de prélèvement (captage) municipal d'une municipalité volontaire et (4) l'emplacement initialement prévu de plusieurs coupes géochimiques régionales le long desquelles des données géochimiques doivent être acquises.

La grille d'échantillonnage a permis d'engager une large campagne de recherche de volontaires pour l'échantillonnage gratuit de leur puits résidentiel avant les travaux de terrain. Cette stratégie visait (1) à réduire le temps de recherche de puits privés sur le terrain en établissant une planification de visites et (2) à obtenir des informations sur les puits privés, lorsque les propriétaires des puits en avaient connaissance. Cette étape a consisté à diffuser un premier courriel d'information par l'intermédiaire des partenaires régionaux, des personnes-ressources présentes à l'atelier du 1^{er} d'octobre 2018 et des municipalités déjà contactées pour l'implantation des puits d'observation. À ce courriel était également joint le dépliant explicatif du PACES Estrie. Les deux OBV partenaires du projet ont également diffusé un feuillet explicatif aux municipalités de leur territoire. Lorsqu'un propriétaire de puits se portait volontaire, un deuxième courriel lui était alors adressé afin d'obtenir, si possible, des informations sur le puits comme sa profondeur et celle du tubage, l'aquifère capté ou encore son année de construction afin de pouvoir relier le puits à la base de données du SIH. Lorsqu'un volontaire était sélectionné, il lui était alors demandé si un système de traitement était en place et s'il y avait la possibilité de contourner ce traitement afin de pouvoir échantillonner les eaux brutes du puits. Cette stratégie s'est révélée efficace puisqu'elle a permis d'obtenir les réponses de 141 propriétaires de puits privés dont 16 ont finalement été retenus pour la campagne d'échantillonnage car dans l'une des mailles d'intérêt.

Un travail similaire avait été fait au printemps 2019 afin de recueillir l'approbation de municipalités pour le programme de caractérisation géochimique et isotopique des puits municipaux. Ainsi, avec l'aide des partenaires régionaux, et notamment le travail du COGESAF et du COBARIC, un feuillet explicatif du projet a pu être transmis aux municipalités de l'Estrie. Finalement, 15 municipalités se sont portées volontaires pour que l'INRS procède à l'échantillonnage de leur captage d'eau souterraine en septembre 2019. Pour cinq d'entre-elles, une résolution avait été approuvée par le conseil municipal préalablement à la visite de terrain (tableau 2.9).

La campagne d'échantillonnage s'est déroulée en plusieurs phases. La première, et principale, concernait l'échantillonnage des puits privés avec deux équipes d'échantillonnage (A et B) de deux personnes. La veille de chaque journée de travail, un inventaire des mailles restantes à échantillonner était établi grâce à une mise en commun des sites échantillonnés dans une couche d'information sous QGIS®. Ce travail a été facilité par l'emploi de tablettes tactiles robustes de terrain permettant de visualiser l'avancement des travaux de façon quotidienne et de mieux coordonner les équipes sur le terrain. Ainsi, chaque équipe se voyait attribuer quotidiennement quatre mailles dont trois à visiter pour répondre aux échéances du projet et une autre en plus afin d'atteindre plus rapidement les objectifs, lorsque faisable.

Tableau 2.9 : Avis de résolution et ententes conclues avec les municipalités de l'Estrie pour les travaux de caractérisation géochimique et isotopique des puits municipaux

Municipalités	Résolution	Date de la résolution	ID Puits MELCCFP	ID Puits Municipalité
Ascot Corner	Validé par courriel	-	X0008600-1	3/73
Austin	Pas nécessaire	-	X2102789-1	Municipal
Coaticook	Pas nécessaire	-	X0008193-2	4/94 - Puits 4
Dudswell	Validé par téléphone	-	X0009364-4	B1/PR-1-03
La Patrie	Oui	10 sept. 2019	X2088194-5	3 - Profond
Lac-Drolet	Pas nécessaire	-	X0009592-7	PU-7
Lambton	Oui	14 mai 2019	X2010122-6	P-12
Orford	Validé par courriel	-	X2134686-5	OR/PE-1-01 - Villas
Piopolis	Aucune	-	X2080353	9/75
Potton	Oui	2 juil. 2019	X0008502	PE-2-94
Richmond	Validé par courriel	-	X0008569	RD/PE-1-15 - 3
Sainte-Edwidge-de-Clifton	Aucune	-	X0009282-7	PE-07
Saint-Herménégilde	Oui	3 juin 2019	X0010539-3	SH/FE-2-99
Ville de Stanstead	Pas nécessaire	-	X0008478-4	PE-1 - 1 (IWC)
Weedon	Oui	5 nov. 2018	90012451-2	WD/PE-1-06

Pour chaque maille à visiter, les puits des résidents volontaires étaient privilégiés et ces derniers étaient avisés à l'avance du passage de l'équipe d'échantillonnage. Quand aucun puits de volontaire n'était recensé dans les mailles, une liste de puits présents dans le SIH était alors élaborée afin d'y programmer une visite. Les puits référencés dans le système d'information hydrogéologique (SIH) disposent en effet d'information utiles à l'interprétation des données telles que le nom du propriétaire initial, l'adresse de l'habitation, les données de construction du puits (diamètre, profondeur, tubage, etc.) ainsi que le détail de la stratigraphie ou encore les données hydrauliques reliées à un éventuel essai de pompage (débit et niveau d'eau). En dernier recours, les résidences sélectionnées étaient déterminées directement sur le terrain selon leur position par rapport aux sites échantillonnés dans les mailles adjacentes.

La procédure engagée sur le terrain consistait à se présenter directement chez les propriétaires sans rendez-vous préalable et d'exposer brièvement le PACES Estrie et ses implications grâce au dépliant explicatif dans le but d'obtenir son autorisation afin de pouvoir se connecter sur un robinet « eau brute », soit non traitée. Malgré une forte implication des résidents de l'Estrie, cette méthode s'est parfois révélée infructueuse (ex. : propriétaire absent ou non disponible, présence d'un système de traitement ou encore refus) ; dans ces quelques cas, un puits voisin était alors sélectionné pour l'échantillonnage. En plus du dépliant transmis au résident, le protocole ainsi que la durée de l'intervention étaient expliqués au propriétaire. Après son accord, une série de questions était alors posée afin de recueillir des renseignements relatifs au puits lui-même mais également à la consommation du ménage et à sa perception de la qualité de l'eau au robinet. Cette fiche, organisée en cinq encarts, est disponible à l'annexe 4.1 du rapport de la Phase II (Huchet et al., 2020; annexe 4M). Cette fiche devait aussi permettre de contacter ultérieurement chaque résident pour lui communiquer gratuitement les résultats d'analyse par voie postale en guise de remerciement et pour l'informer de la qualité de l'eau captée par rapport aux normes.

L'utilisation de deux tablettes de terrain (une pour chaque équipe) permettait, pour chaque site choisi, de visualiser son rattachement éventuel à un puits du SIH mais également de prendre des photographies permettant d'illustrer les travaux d'échantillonnage. De plus, une procédure spécifique a été préparée en ce sens afin de remplir une couche d'information sur chaque site échantillonné grâce au logiciel QField® installé dans chacune des tablettes (voir l'annexe 4.2 du rapport de la Phase II ; Huchet et al., 2020; annexe 4M). Cette procédure a ainsi permis aux deux équipes de visualiser leur avancement de façon quotidienne et de s'assurer d'avoir bien complété les mailles d'un secteur avant de le quitter pour un autre.

Chaque matin, le matériel était vérifié puis chargé dans les deux véhicules utilitaires. La vérification comprenait notamment la calibration des trois sondes multi-paramètres Hanna HI9829®. La troisième sonde, conservée au camp de base de l'équipe (Orford puis Lac-Mégantic), servait de sonde de rechange, dans le cas d'une panne potentielle des deux autres sondes. La procédure comprenait également la distribution des flaconnages nécessaires à la journée d'échantillonnage de chaque équipe. Cela pouvait également inclure des bouteilles pour prélever des duplicatas ou encore le chargement des bouteilles de contrôle (blancs de transport ou de terrain). Afin de parer à tout bris éventuel, un ensemble de bouteilles supplémentaires était fourni à chaque équipe ; les équipes partaient donc chaque jour avec un nombre de flaconnage suffisant pour effectuer cinq échantillonnages bien qu'un rythme moyen de trois à quatre échantillons quotidiens par équipe a permis de répondre aux objectifs du projet.

Les équipes disposaient de glacières et de pains de glace afin de maintenir les échantillons au frais avant leur stockage dans un réfrigérateur pendant la semaine d'échantillonnage. Ceci a permis de respecter les recommandations du laboratoire Bureau Veritas de Québec à savoir le maintien d'une température inférieure à 10 °C. Chaque fin de semaine, les bouteilles étaient alors transmises aux divers laboratoires d'analyse géochimique de Québec (Bureau Veritas et INRS) ou stockées dans la chambre frigorifique du LISTE (Laboratoires pour l'innovation scientifique technologique de l'environnement) de l'INRS à Québec pour être envoyées ultérieurement aux autres laboratoires à l'extérieur de la province pour les analyses isotopiques (Plateforme CONDANTE Eau de l'OSUR à l'université de Rennes 1, Environmental Isotope Laboratory de l'université de Waterloo et André E. Lalonde AMS Laboratory de l'université d'Ottawa).

Chaque échantillon était prélevé conformément au protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine élaboré par l'UQAT (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue) en 2010 dans le cadre des PACES (annexe 3). L'eau des puits privés a généralement été prélevée directement au robinet fileté extérieur des résidences, tout en s'assurant qu'aucun système de traitement n'était présent. Dans certains cas, il a fallu déconnecter ou contourner le traitement en place pour pouvoir prélever les eaux brutes du puits. L'eau souterraine issue des puits d'observation du RSESQ, dont ceux forés en 2019, a été prélevée à l'aide d'une pompe. Comme ces puits de suivi conventionnels ont un diamètre de 152 mm, une pompe électrique submersible Grundfos Redi-Flo2® de 1.8" (46 mm) de diamètre a été utilisée pour les purger puis les échantillonner (figure 2.4). Quant aux puits municipaux, la connexion était généralement facilitée par la présence de robinets d'échantillonnage de l'eau brute ou de raccords adéquats.

Tel que recommandé dans le protocole d'échantillonnage (annexe 3), une purge des puits était nécessaire avant chaque prise d'échantillon. Cette étape essentielle permet de vidanger l'eau stagnante présente surtout dans les puits non pompés (puits d'observation) en renouvelant l'eau du puits afin de prélever des échantillons d'eau brute représentative de la formation géologique. Pour ce faire, l'eau de la purge était suivie au moyen d'une sonde multi-paramètres Hanna HI9829® (figure 2.4). Les paramètres suivants étaient mesurés en continu : pH, potentiel d'oxydoréduction (mV), oxygène dissous (% et mg/L), conductivité électrique spécifique ($\mu\text{S}/\text{cm}$), solides dissous totaux (mg/L) et température (°C). L'échantillon était prélevé uniquement lorsque

la sonde confirmait une stabilité pour l'intégralité des paramètres pendant au moins cinq minutes. Pour les puits régulièrement pompés comme les puits domestiques ou municipaux, une purge d'une durée de 10 à 35 minutes a suffi pour atteindre la stabilisation des paramètres (tableau 2.10). Quant aux puits d'observation, ils ont nécessité des purges plus importantes (volume moyen purgé de 169 L), notamment pour développer les puits récemment forés afin d'éliminer les particules fines (tableau 2.10).

Tableau 2.10 : Purges réalisées selon le type de puits échantillonnés en Estrie en 2019

Type de puits	Durée (s)			Débit (L/s)			Volume (L)		
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
Domestiques	600	2100	1087	0,013	0,440	0,070	12	290	69
De suivi	900	2100	1183	0,055	0,200	0,155	66	250	169
Municipaux	840	1920	1216	0,028	0,143	0,071	34	172	83
Total	600	2100	1105	0,013	0,440	0,077	12	290	78

Le prélèvement des échantillons a été réalisé à l'aide de gants en latex sans poudre. À la suite du remplissage des flacons, ces derniers étaient identifiés par des étiquettes comprenant les informations suivantes : identifiant de l'échantillon, date de prélèvement, nom du projet, nom et numéro de téléphone du responsable du projet (figure 2.4). La nomenclature des échantillons a été réalisée de façon séquentielle. Les échantillons provenant de puits d'alimentation domestiques portent les identifiants « Estrie-001 » à « Estrie-085 » pour l'équipe A et « Estrie-200 » à « Estrie-280 » pour l'équipe B. Les échantillons prélevés par l'équipe C dans les puits d'observation, nommés PO-01 à PO-10 pour les fins du projet, portent les identifiants « Estrie-300 » à « Estrie-314 ». Finalement, les échantillons d'eau souterraine issus des puits municipaux ont été identifiés « Estrie-400 » à « Estrie-409 » pour l'équipe A et « Estrie-500 » à « Estrie-506 » pour l'équipe B.

Chaque échantillon prélevé était composé d'un ensemble de bouteilles qui lui est propre selon sa position sur le territoire d'étude et le type de puits analysé. L'annexe 6.1 du rapport de la Phase II (Huchet et al., 2020; annexe 4M) documente le type de bouteille utilisée selon le paramètre visé par l'analyse ainsi que le laboratoire engagé pour effectuer l'analyse. Y sont également indiquées les spécifications et indications éventuelles à prévoir lors de la prise de l'échantillon sur le terrain. Certaines bouteilles contenant des agents conservateurs nécessitaient un remplissage particulier sans débordement. Pour d'autres, une filtration était nécessaire pour collecter seulement les composés dissous dans l'eau. Quant aux bouteilles destinées aux analyses isotopiques ou à la datation des eaux souterraines, elles étaient remplies en les immergeant entièrement sous l'eau à l'aide d'une chaudière pour éviter les échanges avec l'air (annexe 3).

Le mémoire de maîtrise de Colléau (2020) décrit en détail toutes les méthodes analytiques utilisées sur les échantillons d'eau souterraine prélevés. Les paramètres géochimiques de base (métaux dissous, azote ammoniacal, alcalinité totale en CaCO₃, fluorures, anions, phosphore total inorganique et sulfures totaux) ont été analysés par le laboratoire Bureau Veritas de Québec à chaque semaine, tout au long de la campagne de terrain. Pour ce faire, les glacières étaient déposées tous les vendredis au local du laboratoire et les flacons de la semaine suivante y étaient alors récupérés. La coordination avec le gestionnaire de projet du laboratoire a permis d'obtenir suffisamment de flacons pour prélever des duplicatas et produire des blancs de transport et de terrain pour au moins 5 à 10 % du total des échantillons, tel que recommandé par le protocole d'échantillonnage (annexe 3). Les bouteilles fournies par ce laboratoire ont été remplies systématiquement sur chaque puits échantillonné.



Figure 2.4 : Illustrations de la campagne d'échantillonnage menée en Estrie à l'été 2019

Le laboratoire interne de l'INRS a également été sollicité pour l'analyse du carbone total dissous (organique COD et inorganique CID) ainsi que pour l'azote total dissous (NT). Sur le terrain, le remplissage de ces flacons a nécessité l'emploi de filtres 45 µm. De même, l'équipe de chimistes du laboratoire d'analyse de l'INRS a épaulé l'équipe du projet PACES pour les travaux spécifiques de spéciation de l'arsenic. En effet, l'arsenic ayant été identifié comme une problématique importante en Estrie, il a été décidé de suivre une procédure de séparation des espèces d'arsenic détaillée dans Watts et al. (2010), tel qu'utilisée par Bondu (2017) de l'UQAT pour ses travaux sur l'arsenic réalisés en Abitibi-Témiscamingue. La procédure implique d'abord le pré-conditionnement des cartouches utilisées pour capter les diverses formes d'arsenic, suivi d'un travail de filtration in situ (figure 2.4) puis d'une procédure d'élution en laboratoire. Les trois étapes de ce protocole sont détaillées dans l'annexe 5.2 du rapport de la Phase II (Huchet et al., 2020; annexe 4M). Les flacons destinés à l'analyse des paramètres dissous (COD, CID et NT) ainsi que les cartouches et bouteilles destinées à l'analyse des espèces d'arsenic ont tous été remplis sur le terrain. Toutefois, comme la concentration en arsenic total dissous était aussi un résultat du laboratoire Bureau Veritas, seuls les échantillons les plus concentrés ($[As] \geq 0,001 \text{ mg/L}$) ont finalement été utilisés pour la spéciation. Les volumes précis injectés à travers les filtres n'ayant pas été notés sur le terrain, la procédure permet de déterminer les proportions des différentes formes d'arsenic mais pas la concentration totale exacte en arsenic, celle-ci étant plutôt obtenue de l'analyse faite au laboratoire Bureau Veritas.

Les bouteilles prévues pour les isotopes stables de l'eau ($\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$), la datation par les isotopes du carbone ($\delta^{13}\text{C}$ et ^{14}C) ou par le tritium (^3H) ont été remplies de façon systématique sur chaque site de prélèvement puis conservées dans une chambre frigorifique au LISTE de l'INRS. Lors du remplissage des bouteilles pour les analyses isotopiques ou la datation des eaux souterraines, ces dernières étaient totalement immergées dans une chaudière afin de réduire les échanges avec l'air ambiant et d'éviter la présence de bulles (figure 2.4) en suivant les recommandations du protocole (annexe 3). Le laboratoire retenu pour l'analyse des isotopes stables de l'eau et du carbone est l'EIL (Environmental Isotope Laboratory) de l'université de Waterloo, en Ontario. Tandis que le laboratoire André E. Lalonde AMS de l'université d'Ottawa a été engagé pour la datation des eaux récentes grâce au tritium. Toutes ces analyses ont été faites sur les échantillons prélevés sur les puits municipaux et sur quelques puits privés ou de suivi situés le long des coupes régionales initialement prévues, même si le tracé de ces coupes a été révisé par la suite. En revanche, une sélection a été faite pour les autres puits à l'automne 2019 afin d'envoyer uniquement les échantillons couvrant la plus large gamme de contextes. Une phase de traitement des résultats géochimiques du laboratoire Bureau Veritas a en effet permis de classer les eaux de l'Estrie en différents groupes (section 4.6). Le choix des échantillons à envoyer aux laboratoires s'est finalement basée sur plusieurs critères. Tout d'abord, l'échantillon devait avoir un bilan ionique équilibré. Ensuite, les échantillons choisis devaient appartenir à divers groupes d'eau (eau jeune, évoluée ou anthropisée) et contextes (zone de recharge ou de résurgence). Finalement, l'ensemble des échantillons retenus devait assurer une bonne couverture spatiale assez uniforme de la région d'étude.

Le laboratoire de l'université d'Ottawa a également été sollicité pour fournir le matériel nécessaire au prélèvement et la conservation d'échantillons d'eau dans des tubes de cuivre pour les analyses isotopiques de l'hélium (He) et du néon (Ne). La procédure particulière appliquée sur le terrain pour ce type de prélèvement est décrite dans l'annexe 5.3 du rapport de la Phase II (Huchet et al., 2020; annexe 4M) et illustrée sur la figure 2.4. Cette procédure a seulement été appliquée sur quelques sites d'échantillonnage sélectionnés à l'avance dont l'ensemble des puits municipaux, quelques puits de suivi situés le long des coupes régionales ainsi que plusieurs puits privés localisés le long de ces mêmes coupes. Toutefois, des problèmes analytiques n'ont pas permis d'obtenir des résultats valides et d'avoir une datation tritium-hélium.

Une dernière gamme d'analyses spécifiques a été confiée au laboratoire de la plateforme CONDATE Eau de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR) à l'université de Rennes 1 en France. Les chlorofluorocarbones (CFCs) et l'hexafluorure de soufre (SF₆), utilisés ici comme indicateurs d'eaux récentes (Ayraud, 2005), ont été prélevés dans des ampoules en acier inoxydable (figure 2.4) en se fiant au protocole détaillé fourni par le laboratoire (annexe 3). Quant aux gaz dissous (He, Ne, H₂, Ar, O₂, N₂, CH₄, CO₂, N₂O et H₂S), ils ont été analysés à partir de bouteilles remplies sur le terrain en les immergeant totalement dans une chaudière pour éviter les échanges avec l'air ambiant (annexe 3). Seuls les puits municipaux ainsi que les quelques puits privés ou de suivi situés le long des coupes régionales ont été concernés par ce type de prélèvement et d'analyse.

Finalement, après réception des résultats d'analyse pour les paramètres géochimiques de base, une lettre a été envoyée à tous les résidents participants à l'automne 2019. Si aucun dépassement des normes de potabilité n'avait été identifié par le laboratoire Bureau Veritas, un modèle de lettre générique était alors transmis aux résidents concernés (annexe 7.1 du rapport de la Phase II; Huchet et al., 2020; annexe 4M). Si l'analyse révélait un dépassement de norme de potabilité, alors une lettre spécifique était communiquée au résident concerné. Selon la nature du dépassement, divers modèles de lettres ont été rédigés avec l'aide du personnel de la DSP de l'Estrie (annexes 7.2 à 7.6 du rapport de la Phase II; annexe 4M). Un avis de prévention pour la présence de composés azotés (nitrites-nitrates) a également été émis pour quelques résidences lorsque la concentration approchait la norme de potabilité (annexe 7.7 du rapport de la Phase II; annexe 4M).

2.3.3.3 Description des travaux

La campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine s'est déroulée de juillet à septembre 2019 sur tout le territoire du PACES Estrie. Selon la période, deux à trois équipes d'échantillonnage de deux personnes ont été présentes au même moment sur le terrain. Les mois de juillet et août ont été dédiés à l'échantillonnage des 151 puits résidentiels tandis que quelques jours ont suffi pour prélever les 14 puits du RSESQ pendant le mois d'août. Plus tard, en septembre, deux équipes ont pris en charge le prélèvement des échantillons provenant de 15 puits municipaux (tableau 2.11) servant à l'évaluation du risque de contamination de ces puits (section 6.4).

Ainsi, un total de 180 puits a été échantillonné durant l'été 2019. Comme les puits domestiques représentaient la grande majorité des sites échantillonnés, l'aquifère de roc fracturé est le plus représenté : 163 puits au roc contre 17 forés dans les dépôts granulaires. La stratégie de recherche de puits domestiques a permis d'échantillonner plus de 58 % de puits inscrits dans le SIH dont les caractéristiques ont été extraites pour les fins du projet (tableau 2.11).

Les analyses effectuées sur les eaux souterraines prélevées à partir des 180 puits échantillonnés ont été complétées par le prélèvement de 18 duplicatas, portant ainsi à 198 le nombre total d'échantillons prélevés (tableau 2.12). L'emplacement choisi pour effectuer le prélèvement d'un duplicata a été guidé par les buts suivants : (1) obtenir une répartition optimale sur la région d'étude, (2) être représentatif de chaque type de puits (privés, RSESQ et municipaux) et (3) avoir quelques analyses isotopiques également dupliquées. Conformément aux recommandations du protocole d'échantillonnage (annexe 3), 10% de duplicatas ont été échantillonnés. De même, 5% de blancs de transport et plus de 5% de blancs de terrain ont été transportés lors des travaux de terrain puis analysés en laboratoire par la suite (tableau 2.12).

Les paramètres géochimiques de base, le carbone et l'azote total dissous ont été analysés pour l'intégralité des 180 puits échantillonnés (tableau 2.13). Quant au choix des bouteilles à conserver pour séparer les espèces d'arsenic, il a été fait à partir des résultats analytiques du laboratoire Bureau Veritas. Seuls les 88 échantillons avec au moins 0,001 mg/L d'arsenic total dissous ont été analysés par le laboratoire de l'INRS. L'ensemble des analyses permettant de déterminer l'origine des eaux souterraines et de les dater a été réalisé pour les 15 puits municipaux sans exception (tableau 2.13). Afin de respecter l'enveloppe budgétaire analytique, une sélection a été faite sur le reste des puits (domestiques ou de suivi) pour ces analyses spécifiques. Ainsi, 38 échantillons issus de puits privés et 7 provenant de puits d'observation ont été retenus pour l'analyse des isotopes de l'eau et du carbone par le laboratoire de l'université de Waterloo. Les mêmes échantillons ont été transmis au laboratoire de l'université d'Ottawa pour l'analyse du tritium (tableau 2.13). Pour les derniers paramètres ayant nécessité des manipulations plus poussées sur le terrain (remplissage des tubes de cuivre et des ampoules métalliques), seuls quelques échantillons avaient été prélevés directement sur le terrain. Ainsi, le laboratoire AES AMS d'Ottawa a procédé à l'analyse de 7 des 8 échantillons issus des puits domestiques ainsi que de 4 échantillons prélevés sur les puits du RSESQ dans le but de déterminer les teneurs en gaz nobles (tableau 2.13). Finalement, afin de déterminer la présence d'indicateurs d'eau jeune, le laboratoire de l'OSUR de Rennes a également analysé les 8 échantillons prélevés sur les puits privés et les 4 autres issus des puits de suivi.

En parallèle à l'échantillonnage des eaux souterraines, un important travail de contrôle de la qualité de l'échantillonnage a été fait en utilisant plus de 10 % de blancs (de terrain et de transport). De même, afin de répondre aux exigences du protocole d'échantillonnage (annexe 3), 18 duplicatas (soit 10 % du total des échantillons) ont été transmis aux divers laboratoires (tableau 2.14). À noter que les résultats reçus confirment la précision des analyses.

Après la réception de tous les résultats analytiques des paramètres de base, 151 courriers ont été envoyés aux résidents le 15 octobre 2019. Aucun dépassement de norme de potabilité n'a été identifié pour 107 puits privés bien que pour trois d'entre eux un avis de prévention a été émis car la teneur en nitrites-nitrates s'approchait de la norme sanitaire. Des avis de dépassements ont été transmis à 44 résidents où les puits visités affichaient des non-conformités qui pouvaient concerner les paramètres suivants : l'arsenic, le manganèse, les nitrites-nitrates ou l'uranium.

Sur la base des résultats analytiques obtenus de la campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine, la section 4.6 décrit la géochimie de l'eau souterraine en Estrie, incluant la définition de groupes d'eau aux compositions distinctes, le temps de résidence de l'eau souterraine et les processus géochimiques responsables de l'évolution de l'eau souterraine. Ces résultats sont résumés sous la forme d'un modèle conceptuel de l'évolution géochimique de l'eau souterraine dans la région d'étude. La section 5.3 décrit la qualité de l'eau souterraine dans la région d'étude et relève les composés chimiques dont les concentrations dépassent les concentrations maximales acceptables (CMA) pour la potabilité de l'eau ou les objectifs esthétiques (OE). Ce sont les dépassements des CMA pour le manganèse et l'arsenic qui représentent les plus importants problèmes de qualité de l'eau souterraine dans la région d'étude, ce qui fait que des travaux spécifiques ont été réalisés afin de mieux comprendre ces problèmes (section 6.3). Enfin, les analyses plus détaillées, incluant la datation de l'eau souterraine, ont servies à définir le risque de contamination de 15 puits municipaux dans la région d'étude (section 6.4).

Tableau 2.11 : Description des puits échantillonnés en Estrie lors de la campagne de terrain de 2019

Étape	Type de puits	Équipe	Période	Identification des échantillons	Sites échantillonnés	Type d'aquifère capté		Puits référencés dans une BD
						Fracturé	Granulaire	
1	Domestiques	A	3 juil. - 21 août	Estrie-001 à Estrie-085	75	71	4	42 ^a
		B	3 juil. - 22 août	Estrie-200 à Estrie-280	76	71	5	46 ^a
		Nombre total (puits domestiques)				151	142 (94,0 %)	9 (6,0 %)
2	De suivi	C	12 août - 14 août	Estrie-300 à Estrie-314	14	12	2	14 ^b
		Nombre total (puits d'observation)				14	12 (85,7 %)	2 (14,3 %)
3	Municipaux	A	16 sept. - 19 sept.	Estrie-400 à Estrie-409	9	4	5	9 ^c
		B	17 sept. - 19 sept.	Estrie-500 à Estrie-506	6	5	1	6 ^c
		Nombre total (puits municipaux)				15	9 (60,0 %)	6 (40,0 %)
Nombre total (ensemble des puits)					180	163 (90,3 %)	17 (9,4 %)	117 (65,0 %)

a : pour les puits domestiques, la base de données correspond au puits déclarés dans le SIH ;

b : pour les puits d'observation, la base de données correspond au RSESQ ;

c : pour les puits municipaux, la base de données correspond aux puits identifiés dans le répertoire des installations municipales de production d'eau potable du MELCCFP.

Tableau 2.12 : Description des échantillons, des duplicatas et des blancs analysés en Estrie lors de la campagne de terrain de 2019

Type de puits	Analyses			Blancs		
	Échantillons	Duplicatas	Total	De terrain	De transport	Total
Domestiques	151	15	166	7	8	15
De suivi	14	1	15	1	1	2
Municipaux	15	2	17	1	1	2
Total	180	18 (10,0 %) ^a	198	9 (5,0 %) ^a	10 (5,6 %) ^a	19 (10,6 %) ^a

a : le ratio calculé ici correspond au nombre de blancs ou de duplicatas par rapport au nombre d'échantillons prélevés.

Tableau 2.13 : Description des analyses effectuées par les divers laboratoires sur les échantillons prélevés en Estrie lors de la campagne de terrain de 2019

Type de puits	BV Labs - Québec	INRS - Québec		EIL - Waterloo		AES AMS Lab. - Ottawa	CONDATE Eau - Rennes	
	Géochimie de base	Carbone et azote total dissous	Spéciation de l'arsenic	Isotopes de l'eau	Isotopes du carbone	Tritium	Isotopes de l'hélium et du néon ^a	CFC/SF ₆ et gaz dissous
Domestiques	151	151	78	38	38	38	7 ^b	8
De suivi	14	14	3	7	7	7	4	4
Municipaux	15	15	7	15	15	15	15	15
Total	180	180	88	60	60	60	26	27

a : les résultats d'analyses sur les isotopes de l'hélium et du néon faites à partir des tubes de cuivres scellés ne sont finalement pas exploitables ;

b : les tubes de cuivre avaient été échantillonnés pour 8 puits privés mais l'un d'eux n'a pas pu être analysé par le laboratoire.

Tableau 2.14 : Description des analyses effectuées par les divers laboratoires sur les duplicatas prélevés en Estrie lors de la campagne de terrain de 2019

Type de puits	BV Labs - Québec	INRS - Québec		EIL - Waterloo		AES AMS Lab. - Ottawa	CONDATE Eau - Rennes	
	Géochimie de base ^a	Carbone et azote total dissous ^a	Spéciation de l'arsenic ^a	Isotopes de l'eau ^a	Isotopes du carbone ^a	Tritium ^a	Isotopes de l'hélium et du néon ^a	CFC/SF ₆ et gaz dissous ^a
Domestiques	15 (9,9 %)	15 (9,9 %)	9 (11,5 %)	1 (2,6 %)	1 (2,6 %)	1 (2,6 %)	1 (14,3 %)	1 (12,5 %)
De suivi	1 (7,1 %)	1 (7,1 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)
Municipaux	2 (13,3 %)	2 (13,3 %)	2 (28,6 %)	2 (13,3 %)	2 (13,3 %)	2 (13,3 %)	2 (13,3 %)	2 (13,3 %)
Total	18 (10,0 %)	18 (10,0 %)	11 (12,5 %)	3 (5,0 %)	3 (5,0 %)	3 (5,0 %)	3 (11,5 %)	3 (11,1 %)

a : les pourcentages représentent le ratio de duplicatas par rapport au nombre d'échantillons prélevés.

2.3.4 Enquête de terrain sur les approvisionnements municipaux

2.3.4.1 Objectifs

Cette étude de caractérisation hydrogéologique régionale vise, entre autres, à apporter des éléments de réponse à propos de problématiques liées à la ressource en eau souterraine de l'Estrie. Ainsi, un questionnaire d'enquête a été soumis à plusieurs municipalités afin d'obtenir des précisions sur d'éventuels problèmes de qualité ou de quantité rencontrés pour leurs prélèvements en eau souterraine.

Les nouvelles connaissances acquises avec ce sondage ont permis notamment de cibler les municipalités pouvant être concernées par des manques d'eau récurrents, ce qui a orienté les travaux de recherche liés au potentiel aquifère dans les vallées enfouies (section 6.1). De même, puisque l'arsenic et le manganèse sont des problématiques régionales (section 6.3), cette enquête a aussi permis de vérifier les municipalités affectées et les infrastructures de traitement mises en place sur les captages concernés ainsi que l'existence éventuelle d'autres problématiques d'ordre qualitatif.

Cette enquête vient aussi suppléer les travaux liés à une meilleure gouvernance des eaux souterraines de la région d'étude (sections 6.5 et 6.6) et les réponses reçues offrent des données complémentaires utiles à la production de la fiche d'évaluation de la vulnérabilité des captages municipaux (section 6.4 et les rapports individuels des municipalités en annexe 4I).

2.3.4.2 Méthodologie employée

Le questionnaire a été structuré de telle sorte qu'il devait permettre de recueillir des précisions sur les problématiques d'approvisionnement en eau rencontrées par les municipalités en interrogeant directement la personne-ressource lors de l'intervention des équipes de l'INRS (voir l'annexe 8.1 du rapport de la Phase II ; Huchet et al., 2020; annexe 4M). Le questionnaire avait été prérempli à l'avance selon les informations disponibles dans la base de données des approvisionnements en eau municipaux du MELCCFP, ce qui a grandement facilité les échanges et la prise d'informations. Une vérification des données collectées via des échanges de courriels avec les municipalités a ensuite été faite afin de s'assurer de la validité de ces informations.

En plus des informations générales collectées pour chaque municipalité, cette enquête s'articulait essentiellement autour de trois points :

- La production et la distribution en eau potable en identifiant la ou les installations de distribution et le nombre d'habitants desservis puis en décrivant le point de production (nom, volume produit, catégorie, type d'aquifère capté) et si ce dernier est toujours actif ou abandonné ;
- L'existence de problèmes qualitatifs actuels ou anciens en indiquant si ces derniers ont nécessité des interventions humaines comme des avis d'ébullition ou encore la mise en place d'un traitement temporaire ou permanent ;
- La présence de problèmes quantitatifs actuels ou passés en indiquant toute information pertinente comme la fréquence de nettoyage du prélèvement, l'implantation de compteurs d'eau ou encore l'application de restrictions d'usage visant les résidents.

2.3.4.3 Description des travaux

Dans un premier temps, cette enquête a été soumise aux 15 municipalités visitées lors de la campagne d'échantillonnage des puits municipaux de septembre 2019. Par la suite, cette enquête a aussi été proposée aux municipalités impliquées dans le projet par la mise en place d'un puits d'observation. Finalement, les 23 municipalités directement impliquées dans le PACES Estrie ont répondu à cette enquête (tableau 2.15). Le détail des municipalités participantes est disponible à l'annexe 8.3 du rapport de la Phase II (Huchet et al., 2020; annexe 4M).

Tableau 2.15 : Taux de participation à l'enquête de terrain

MRC	Nombre total de municipalités ciblées	Réponses reçues	
		Nombre	%
Le Granit	6	6	100
Les Sources	0	0	-
Le Haut-Saint-François	4	4	100
Le Val-Saint-François	2	2	100
Sherbrooke	1	1	100
Coaticook	4	4	100
Memphrémagog	6	6	100
Beauce-Sartigan	0	0	-
Les Appalaches	0	0	-
Arthabaska	0	0	-
PACES Estrie	23	23	100

Les villes de Sherbrooke et de Magog s'approvisionnent en eau potable à partir de points de prélèvement en eau de surface tandis que les résidents de Stornoway s'alimentent en eau directement via des puits domestiques. Quant à la municipalité de Val-Joli, les résidences isolées sont connectées à des puits individuels et quelques secteurs sont alimentés en eau potable via un aqueduc de la ville voisine de Windsor qui dispose d'une prise d'eau de surface.

2.3.5 Enquête en ligne sur les approvisionnements municipaux

Afin de préciser certains renseignements sur l'utilisation de l'eau souterraine dans la région d'étude, un sondage, élaboré par le COGESAF avec l'aide de l'INRS, a été mis en ligne en août 2018 sur le site de l'OBV : <http://cogesaf.qc.ca/sondage-municipal-paces-estrie/>. L'objectif du sondage était de recueillir des informations sur la consommation de l'eau par les municipalités et les industries ; une donnée cruciale dans toute étude de caractérisation hydrogéologique régionale. De plus, le sondage a permis de comparer les informations sur la consommation de l'eau provenant du répertoire des réseaux municipaux de distribution en eau potable du MELCCFP et du rapport annuel de l'usage de l'eau du ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH) (voir la section 5.2 sur l'estimation de l'utilisation d'eau).

La structure et le contenu de ce questionnaire sont disponibles en annexe 8.2 du rapport de la Phase II (Huchet et al., 2020; annexe 4M). En plus des informations générales collectées pour chaque municipalité, le questionnaire visait l'obtention de précisions sur :

- L'existence de problèmes liés à la qualité ou la quantité d'eau de l'approvisionnement en eau potable et la présence potentielle de conflits d'usage ;

- Le(s) réseau(x) de distribution en eau potable et notamment le volume annuel d'eau distribué aux résidents ainsi que le nombre de personnes desservies par le(s) réseau(x) au sein de la municipalité, que l'eau soit d'origine souterraine ou non ;
- La présence d'un ou plusieurs grands utilisateurs sur le territoire municipal et les données liées à ce(s) prélèvement(s) comme l'estimation annuelle d'eau consommée.

Puisque ce sondage a été mis en ligne rapidement au début du projet, il était également demandé aux municipalités si elles étaient intéressées par l'implantation d'un puits d'observation, par l'échantillonnage et l'analyse de l'eau de l'un de leur point de prélèvement en eau souterraine et aussi par le partage éventuel de rapports ou de données d'ordre hydrogéologique. Cette enquête a donc permis d'impliquer les acteurs locaux dès les prémices du PACES Estrie. Finalement, 76% des municipalités de la région d'étude du PACES Estrie ont répondu au sondage (tableau 2.16). Ces municipalités représentent 82% du territoire et 93% de la population. La section 5.1.2 fait un résumé des problématiques d'approvisionnement sur la base des enquêtes de terrain (section 2.3.4) et en ligne auprès des municipalités.

Tableau 2.16 : Taux de participation des municipalités à l'enquête en ligne

Réponses	Nombre		Superficie		Population	
	Nb.	%	km ²	%	Hab.	%
Oui	74	76	8 758	82	301 474	93
Non	23	24	1 925	18	22 559	7
Total	97	100	10 683	100	324 033	100

2.3.6 Délimitation des aires de protection

Afin de répondre aux exigences du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP), les municipalités du Québec disposant d'un prélèvement d'eau de catégorie 1, c'est-à-dire desservant plus de 500 personnes et au moins une résidence, devaient soumettre un rapport d'évaluation de la vulnérabilité de leur source d'approvisionnement au MELCCFP avant le 1^{er} avril 2021, mais certains rapports ont été soumis jusqu'au 1^{er} avril 2022. Cette analyse devait suivre les directives du guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec (MELCC, 2018a). Pour les captages d'eau souterraine, cette démarche peut exiger la révision des aires de protection en suivant la démarche du guide de détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC (MELCC, 2019b).

Afin d'accompagner les municipalités dans la protection de leurs sources d'eau potable, une évaluation du risque de contamination des captages municipaux a été faite sur la base des analyses chimiques et isotopiques de l'eau des puits échantillonnés (section 6.4 et annexe 4I). Puisque l'aire d'alimentation d'un captage définit le territoire au sein duquel les eaux souterraines seront éventuellement captées par ce point de prélèvement, elle correspond aussi à son aire de protection éloignée. Cette dernière intègre les aires de protection intermédiaires (virologique et bactériologique) ainsi que l'aire de protection immédiate au sein desquelles des restrictions peuvent être imposées. Il est donc primordial de les définir avec précision afin de protéger au mieux la ressource en eau.

Le MELCCFP référence ces aires de protection au sein d'une base de données mise-à-jour progressivement à chaque nouvelle demande d'autorisation. De plus, les aires révisées n'ont été intégrées à cette base de données qu'à partir de la date butoir du 1^{er} avril 2021. Par conséquent, après réception de cette couche d'information, la majorité des aires délimitées dans les rapports de consultants n'apparaissent pas dans le fichier dont la dernière mise à jour date de novembre

2015. Pour la région d'étude, la base de données fournie par le MELCCFP en mars 2020 contenait initialement 143 aires de protection associées à 53 points de captages d'eau souterraine et extraites de rapports hydrogéologiques soumis entre 2001 et 2014. Aucune aire de protection immédiate n'est délimitée dans cette couche d'information. Néanmoins, la majorité des approvisionnements répertoriés possèdent les limites de leurs trois autres aires de protection : virologique, bactériologie et éloignée. Six puits ont uniquement la délimitation de leur aire d'alimentation (éloignée) tandis que pour un puits, l'aire éloignée est manquante, et pour un autre l'aire bactériologique est absente. De même, cette base de données recense également quatre puits (associés à huit aires de protection) desservant la ville de Stanstead et localisés aux États-Unis bien que ces puits ne semblent plus être en fonction présentement.

Pour l'Estrie, il est donc apparu nécessaire de mettre à jour et de compléter cette couche d'information en débutant par un travail de délimitation de ces aires de protection à partir de la numérisation et de la géolocalisation de cartes issues des rapports de consultants. Ce travail a concerné la délimitation des aires de protection des captages d'eau souterraine pour 14 des 15 municipalités échantillonnées en septembre 2019 (la municipalité d'Austin étant la seule à ne pas disposer de rapport hydrogéologique, son puits étant de catégorie 3). Pour ces 14 municipalités, la couche du MELCCFP recensait 27 aires associées à 15 puits. Finalement, deux fichiers distincts ont été produits : un premier sous forme d'entités ponctuelles comprenant les 42 puits identifiés dans les rapports municipaux puis un deuxième, de type polygone, incluant les limites des 103 aires de protection extraites des rapports des firmes de consultants (figure 2.5).

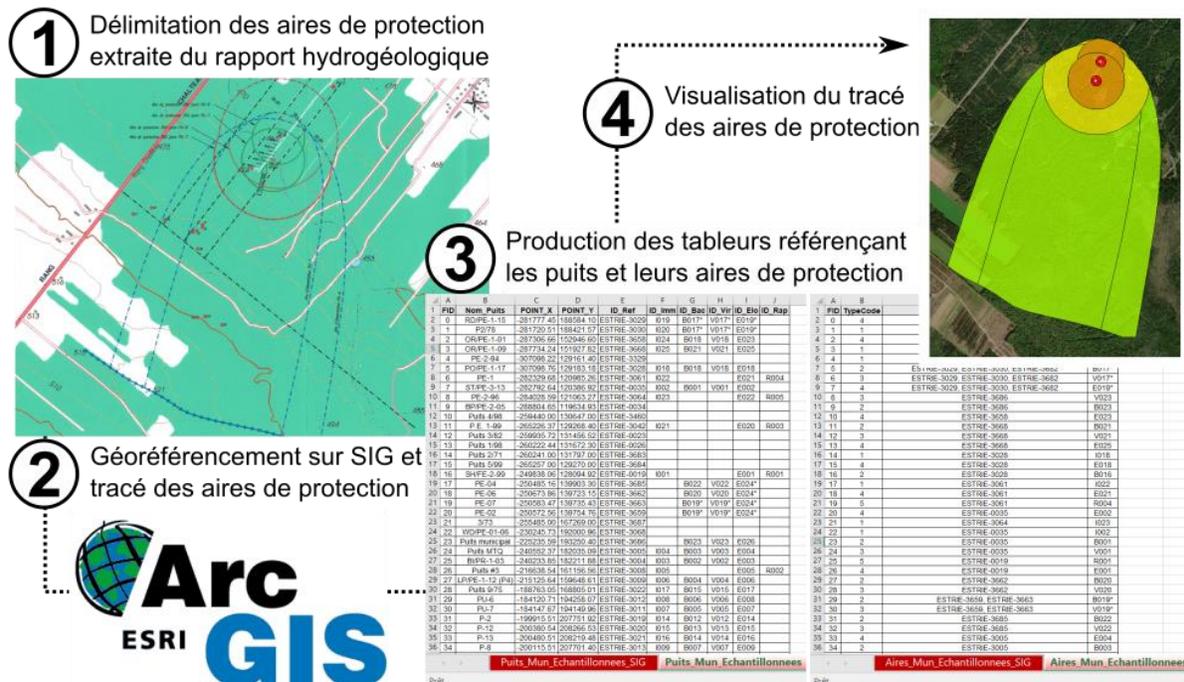


Figure 2.5 : Production des couches d'information des aires de protection à partir des cartes extraites des rapports des firmes de consultants.

Ces aires de protection concernent 31 des 42 puits identifiés dans les rapports. Sur les 11 puits restants, la base de données du MELCCFP comprenait la délimitation des aires de protection pour 10 puits. À noter qu'une aire de protection peut être parfois associée à plusieurs puits. De même, certains rapports ne distinguaient pas l'aire virologique de l'aire bactériologique ; dans ce cas, le rapport indiquait l'aire de protection comme étant dite « rapprochée » (cela n'a concerné que cinq puits au total). Cette couche d'information contient également la délimitation des aires de

protection immédiate des puits, lorsqu'elle était clairement définie dans le rapport. La couche d'information produite vient alors compléter en partie la base de données du ministère. Les aires numérisées sont compilées à l'annexe 4Q.

Ce travail a notamment permis de vérifier la présence de quelques incohérences dans plusieurs rapports de consultants (ex. : aires d'alimentation recoupant un cours d'eau) ou encore que certaines aires avaient été définies selon d'anciens règlements en vigueur lors de la demande d'autorisation. La révision la plus récente des aires de protection, dans le cadre du RPEP, devrait avoir permis de corriger ce point et de compiler l'information selon la même nomenclature. De même, cette activité a aussi mis en évidence l'existence de lacunes dans la couche d'information du MELCCFP (ex. : absence de la plupart des aires ou délimitation imprécise des aires). Ce dernier point a notamment été mis en avant par le MELCCFP lui-même puisque le technicien en charge de la numérisation des aires ne dispose pas du rapport hydrogéologique complet, mais seulement d'une figure sans coordonnées et donc difficile à positionner spatialement. Les nouvelles données produites dans le cadre du RPEP ont été produites trop tardivement pour être exploitées dans le cadre du PACES Estrie.

2.4 Saisie, validation et archivage des données

2.4.1 Développement de la base de données

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, étudiants et stagiaires. Bien que l'utilisation des chiffriers électroniques (ex. : Excel) ou de logiciel SIG (ex. : ArcMap) permette de partager, traiter et mettre en graphique ou en carte les données, il faut un moyen efficace d'avoir une vue d'ensemble de toutes les données, de vérifier leur intégrité et de les transmettre. Ceci s'avère compliqué, voire impossible, lorsque ces données sont répertoriées uniquement dans les différents fichiers des applications utilisées pour exploiter ces données. Il est donc nécessaire d'utiliser un système de gestion de bases de données, tel que PostgreSQL, pour le stockage logique des données, mais aussi de s'assurer de l'utilisation de règles de validation communes et du respect des protocoles communs pour la saisie, le formatage et la sauvegarde périodique des données.

Pour le PACES Estrie, un nouveau modèle de base de données a été utilisé, tout en gardant certains aspects de l'ancien modèle utilisé pour les projets PACES antérieurs, ainsi que certaines librairies. L'historique du développement des anciens modèles de base de données a été documenté dans le rapport du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013) et du PACES Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015). Le modèle actuel est une adaptation du standard « Mesures et Observations » (O&M) de l'OGC (*Open Geospatial Consortium*) implémenté par Xavier Malet à la Commission géologique du Canada (Malet, 2017). L'OGC est un consortium international d'universités, d'agences gouvernementales, de centres de recherche et d'entreprises déterminés à concevoir des standards pour les données géospatiales. Ces standards permettent une plus grande facilité à trouver, accéder, et rendre interopérables et réutilisables les données géoscientifiques. Ce modèle est une amélioration significative de l'ancien modèle, car il permet une généralisation des tables de la base de données, leur conférant une plus grande souplesse, ce qui implique une diminution du nombre de tables et un enrichissement des types de données pouvant y être intégrées.

2.4.2 Structure de la base de données

Selon Cox (2013), la norme O&M « définit un schéma conceptuel pour les observations et pour les caractéristiques impliquées dans l'échantillonnage lors de la réalisation d'observations. Ceux-ci fournissent des modèles pour l'échange d'informations décrivant les actes d'observation et leurs résultats [selon une certaine procédure], à la fois au sein et entre différentes communautés scientifiques et techniques ». Dans le modèle d'O&M, il y a trois catégories d'informations :

- L'entité d'échantillonnage (puits, rivières, affleurements, lignes sismiques), nommée en anglais « *sampling feature* », qui peut être de type spatial ou non ;
- L'observation, réalisée sur cette entité, qui peut être *in situ* (niveau d'eau, levé géophysique, etc.) ou *ex situ* (échantillon d'eau ou de sol, etc.) et dans ce dernier cas nous parlons de « spécimen » ;
- Les résultats sont obtenus à partir des mesures d'observations effectuées sur les entités ou les spécimens.

Avec ce modèle, le type de donnée n'est plus rattaché à une table spécifique, mais à une librairie, ce qui vient fixer le nombre de tables nécessaires pour caractériser une panoplie d'entités, d'observations et des résultats qui en découlent. Ainsi, toutes les entités d'échantillonnage deviennent sujettes à observation avec des résultats associés. Par exemple, la construction de puits est intégrée à la table des résultats d'intervalles tout comme la stratigraphie.

La base de données a été implantée avec cinq schémas différents où l'on retrouve les différentes tables. Quatre des cinq schémas sont présentés à la figure 2.6. Les cinq schémas sont :

- **Entité et observation** : contient les tables reliées aux sources d'échantillonnage (tables *entite_echant*, *observations* ainsi que les tables de *position*) ;
- **Processus** : explique les processus reliés à la prise d'observations et d'échantillons ;
- **Résultats** : contient les différentes tables de résultats ;
- **Librairies** : contient toutes les librairies qui permettent de décrire les différentes entités, observations, calculs et résultats. Ces librairies sont aussi un moyen d'uniformiser le lexique scientifique relié ici à l'hydrogéologie ;
- **Metadata** : contient les tables de métadonnées permettant d'informer sur les données.

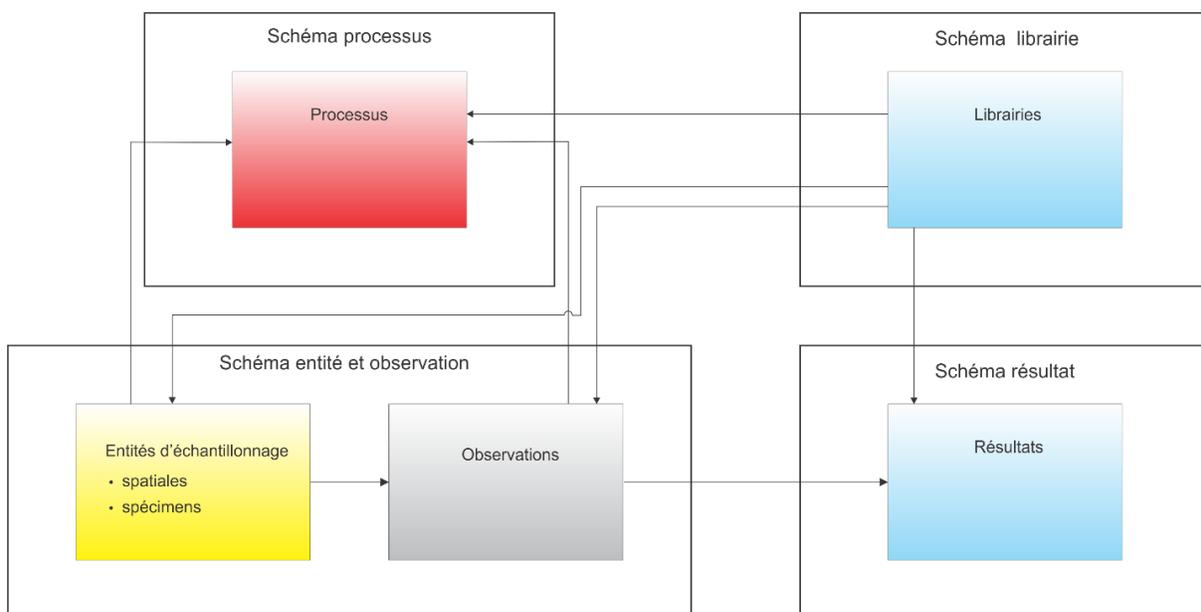


Figure 2.6 : Représentation du modèle O&M de la base de données

2.4.3 Vérification et validation des données

2.4.3.1 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). Une validation est donc requise car les résultats des interpolations et calculs statistiques qui servent à la réalisation directe ou indirecte des livrables et même à 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 primordiale pour rendre une base de données la plus fiable possible afin de permettre la production de 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 (BD),

l'exercice principal de validation des données colligées a été réalisé après la collecte et l'intégration des données dans cette BD. Afin d'orienter et d'harmoniser l'exercice de vérification et de validation des données, le protocole PACES (annexe 3) a été utilisé avec quelques modifications pour atteindre des objectifs de validation qui correspondaient mieux aux données disponibles pour la région d'étude et aux traitements qui devaient être appliqués aux données.

2.4.3.2 Procédure de validation des données

Cette phase de 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 assure une grande flexibilité au niveau de la validation tout en évitant une manipulation inutile des données comme 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 », en raison de leur nature, de l'absence d'information nécessaire à la validation et à la préparation des livrables ou parce qu'ils provenaient de projets PACES antérieurs ayant déjà appliqué un processus de validation similaire. Ainsi, des 72 059 objets présents dans la base de données, 28 973 ont été considérés pour cette étape de validation.

Les 4 étapes de validation, numérotées A à D, 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 du roc. Un point en commun des diverses étapes de validation est le rayon de recherche pour la comparaison des objets entre eux. À l'aide de quelques tests comparatifs et de 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 se fait en comparant deux objets à la fois, l'objet à valider et un des autres objets présents. Les cotes de validité 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.

Étape de validation A. L'étape de validation VT1 vise à relever les erreurs sur la profondeur du forage d'un objet (puits ou forage). Si une profondeur est nulle, négative ou aberrante pour un contexte donné ; elle est identifiée comme telle dans la BD. 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, 89 objets n'ont pas passé cette étape de validation. Encore une fois, certains objets ont été exclus du fait de leur nature.

Étape de validation B. La seconde étape de validation, nommée VD1, vise à vérifier la présence de doublons. Cette étape requiert des informations sur la profondeur, 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 est 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 de données du CCEG ;
5. Base de données du MELCCFP (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, 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 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, 2ca 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 prenne en compte ces objets. Au total, 2 932 objets ont reçu les cotes 4, 5 ou 6 et ceux-ci ont été exclus du reste de la validation ainsi que pour la réalisation des livrables.

Étape de validation C. L'étape de validation VT3 servait à vérifier la cohérence entre le niveau d'eau statique (en tant que profondeur par rapport à la surface) et la profondeur totale d'un puits. Une différence de ± 1 m est acceptée. Les cotes pour cette validation sont :

1. Niveau statique < Profondeur totale du puits ;
2. Niveau statique < Profondeur totale du puits (après correction) ;
3. Niveau statique disponible, mais profondeur non disponible ;
4. Niveau statique > Profondeur totale du puits ;
5. n/a (aucune donnée sur le niveau d'eau).

Il y avait 5 objets 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 ou vulnérabilité).

Étape de validation D. L'étape de validation VT4 a pour but de détecter les erreurs flagrantes sur le niveau d'eau statique (en tant que profondeur par rapport à la surface) 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 73 objets qui ont obtenu la cote 4 et plus. De ce nombre 1 897 objets avaient obtenu la cote 5, car le niveau dynamique ou le niveau d'eau statique n'était pas disponible pour ces objets.

Le tableau 2.17 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'objets présents dans la BD et le pourcentage des différentes données ayant servi à la réalisation des livrables selon leur provenance. À noter qu'en plus des étapes de validation décrites précédemment, la sélection finale des données indiquées au tableau 2.17 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 2.17 : Données ayant servies à la réalisation des livrables après validation

ID ⁽¹⁾	Livable	Nb objets utilisés	SIH (%)	USA ⁽⁵⁾ (%)	Études antérieures (%) ⁽²⁾	INRS (%)	S. 3D ⁽⁶⁾ (%)	MERN ⁽³⁾ (%)
14	Coupes stratigraphiques	10	-	-	100	-	-	-
15a	Épaisseur totale des dépôts	62 316	27	-	0,83	0,02	69	3,15
15b	Épaisseur de sédiments sableux superficiels (UH1)	62 316	27	-	0,83	0,02	69	3,15
15c	Épaisseur de sédiments argileux (UH2)	62 316	27	-	0,83	0,02	69	3,15
16	Topographie du roc	62 316	27	-	0,83	0,02	69	3,15
17	Conditions de confinement	62 316	27	-	0,83	0,02	69	3,15
18	Épaisseur et limites des aquifères régionaux	62 316	27	-	0,83	0,02	69	3,15
20	Piézométrie du roc	22 995	58	42	0,08	0,04		-
21	Paramètres hydrogéologiques	17 604	100	-	-	-	-	-
24 ⁽⁴⁾	Qualité eau souterraine Critères de potabilité	208	-	-	-	100	-	-
25 ⁽⁴⁾	Qualité eau souterraine Critères esthétiques	208	-	-	-	100	-	-

(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 ou autres) ;

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

(4) : les données de qualité d'eau souterraine utilisées pour ces livrables ont été collectées dans le cadre du PACES Estrie mais la plupart des puits dans lesquels les échantillons ont été collectés étaient des puits existants documentés dans le SIH ;

(5) : Agency of Natural Resources, Department of Environmental Conservation, Vermont USA ;

(6) : thèse de doctorat d'Olivier Caron (2013).

3 CONTEXTES GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES

3.1 Géologie du socle rocheux

La région d'étude du PACES Estrie est entièrement comprise dans la province géologique des Appalaches décrite par plusieurs travaux antérieurs (St-Julien et Hubert, 1975; Tremblay et Castonguay, 2002; Schroetter, 2003; De Souza, 2012; Perrot, 2019). L'Estrie appartient à la partie nord des Appalaches qui a été séparée en cinq zones, dont trois sont présentes dans la région d'étude (figure 3.1).

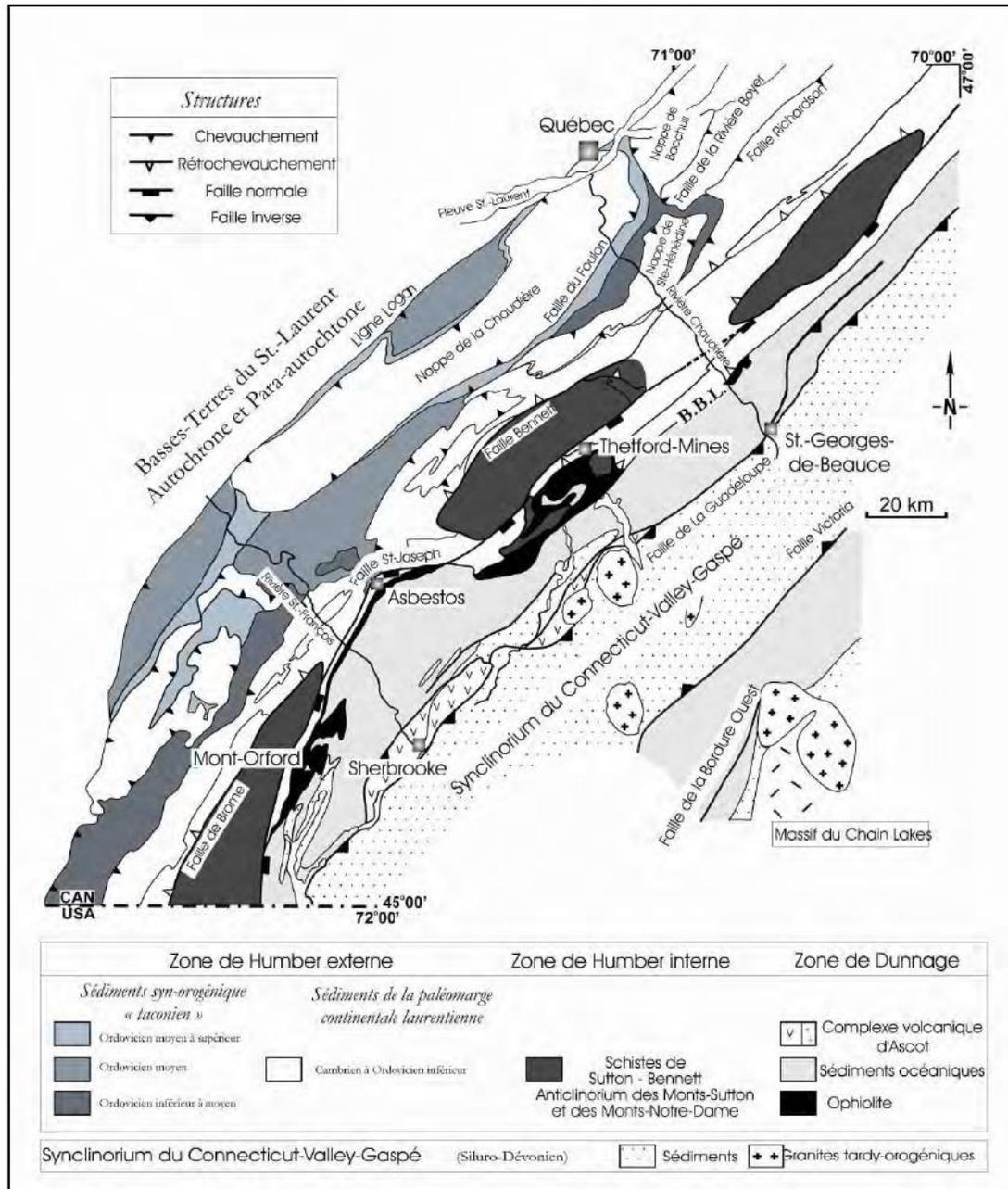


Figure 3.1 : Géologie des zones des Appalaches dans le sud du Québec (tiré de Schroetter, 2003, d'après Tremblay et Castonguay, 2002)

Dans la région d'étude, on retrouve ainsi, du nord-ouest au sud-est, la zone de Humber (externe et interne), la zone de Dunnage, puis la ceinture de Gaspé au sein de laquelle se trouve l'intrusion d'âge Crétacé du Mont-Mégantic. La ceinture de Gaspé est aussi nommée le synclinorium de Connecticut-Valley-Gaspé. Ces trois sous-provinces géologiques sont limitées par des failles d'importance régionale : la ligne Baie-Verte-Brompton et la faille de La Guadeloupe.

La carte du livrable n° 13 montre la géologie du socle rocheux qui a été extraite à partir du portail du SIGEOM (Système d'information géominère) du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN, 2018). Pour la région de l'Estrie, les données proviennent d'une compilation géologique réalisée par le MERN à une échelle de 1 / 250 000 (Slivitzky et St-Julien, 1988). Cette carte présente deux niveaux de détails : 1) les unités géologiques différenciées selon leur âge et les lithologies associées ainsi que 2) les grands ensembles géologiques du domaine appalachien (zones), appelés « sous-provinces géologiques ». Les unités géologiques de la région d'étude comprennent une grande variété de lithologies : schistes, roches volcaniques, roches ultramafiques, shales et ardoises, roches granitiques. Tremblay et al. (2015) ont produit une nouvelle carte de la géologie des Appalaches du Québec, mais à un niveau de détail qui va au-delà des besoins du PACES Estrie.

La zone de Humber contient des lithologies typiques d'une marge continentale passive, tels que des carbonates, des grès et des shales. La zone de Dunnage est constituée de roches volcaniques et sédimentaires qui sont les restes d'un bassin océanique marginal de l'Ordovicien. Le contact entre les zones de Humber et de Dunnage définit la ligne Baie Verte-Brompton (BBL). Durant le Silurien et le Dévonien inférieur, le bassin sédimentaire constitué de conglomérats, grès, et calcaires de la Ceinture de Gaspé a recouvert en partie les roches sous-jacentes (Tremblay et Castonguay, 2002). Des intrusions granitiques du Dévonien Moyen recoupent la Ceinture de Gaspé et la zone de Dunnage. Au Crétacé, une intrusion magmatique alcaline apparentée aux collines Montérégiennes s'est mise en place, formant aujourd'hui le Mont Mégantic.

La figure 3.2 montre une partie de la carte produite par Tremblay et al. (2015) et la coupe géologique illustre la structure complexe des Appalaches en profondeur. Il faut d'abord noter que la coupe va en profondeur jusqu'à 7,5 km, ce qui est bien au-delà de la profondeur des ressources en eau souterraine. La partie CD de la coupe atteint juste la limite ouest de la région d'étude du PACES Estrie. La partie EF de la coupe est décalée vers le nord et elle est au centre de la région d'étude qu'elle traverse de l'ouest jusqu'à l'est. Les coupes montrent bien que les zones des Appalaches sont délimitées par des failles majeures. Ainsi, la zone de Humber externe est délimitée par la ligne de Logan, au nord-ouest, et la faille de Brome, au sud-est. Cette zone est à peine présente dans la région d'étude dans la partie nord-ouest de la MRC du Val-Saint-François. La zone de Humber interne est limitée au sud-est par la faille Saint-Joseph et cette zone occupe la marge ouest de la région d'étude. La zone de Dunnage est limitée au sud-est par la faille de la Guadeloupe et occupe la portion nord-ouest de la région d'étude, de la limite sud-ouest à la limite nord-est de la région. Enfin, la ceinture de Gaspé occupe la majeure partie de la région d'étude au sud-est de la région.

Comme on le voit aux figures 3.1 et 3.2 ainsi que sur la carte du livrable n° 13, Caron (2013) souligne que le grain tectonique appalachien est de forte orientation du sud-ouest au nord-est. Cette orientation est conforme à celles des zones et unités géologiques ainsi qu'à celle des grandes failles majeures. Caron (2013) mentionne que cette orientation est visible de l'échelle de l'affleurement jusqu'à l'échelle régionale. Cette orientation a aussi une expression géomorphologique dans les grandes vallées de la région, soit de l'ouest du lac Massawippi jusqu'au lac Aylmer dans la vallée de la rivière Saint-François ainsi que pour le tronçon de la vallée de la rivière Chaudière allant du lac Mégantic à la limite nord-est de la région d'étude.

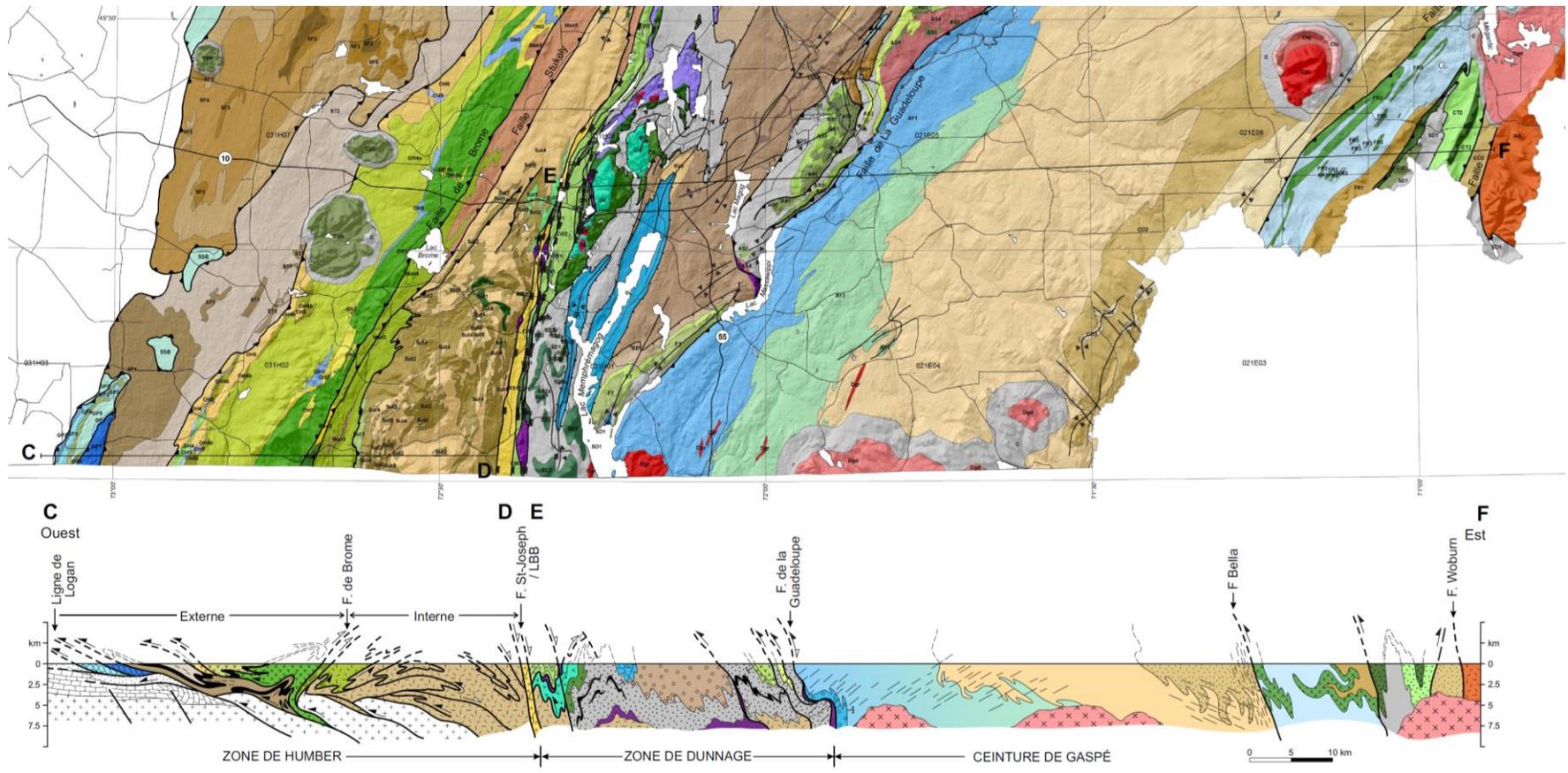


Figure 3.2 : Géologie des Appalaches et coupes géologiques dans la région d'étude (extrait de Tremblay et al., 2015)

3.2 Géologie du Quaternaire

3.2.1 Stratigraphie quaternaire et événements glaciaires

Les travaux de Caron (2013) ont notamment permis de définir les principaux événements reliés à la paléogéographie de l'Estrie où la complexité de la séquence stratigraphique des dépôts meubles reflète des conditions uniques d'englaciation et de déglaciation. Ainsi, la géologie du Quaternaire dans la région d'étude est constituée d'une succession de tills, de dépôts glaciolacustres et de sédiments alluviaux. La figure 3.3 montre la séquence et l'architecture des sédiments alors que le tableau 3.1 résume les unités lithostratigraphiques, les événements reliés à leur formation et la nature des sédiments qui composent ces unités. La séquence stratigraphique glaciaire comprend ainsi trois tills et les accumulations de sédiments peuvent dépasser 80 m, notamment dans les vallées enfouies. L'unité de base est représentée par le Till de Johnville, d'âge pré-Sangamonien, et de composition dite laurentidienne (Parent, 1987a et 1987b; Lamothe et al., 1992). L'unité glaciaire suivante est le Till de Chaudière, qui date du début de la glaciation wisconsinienne. Ce till est « Appalachien », ayant une composition lithologique essentiellement locale. Le Till de Lennoxville est le till de surface et il recouvre l'ensemble de la région.

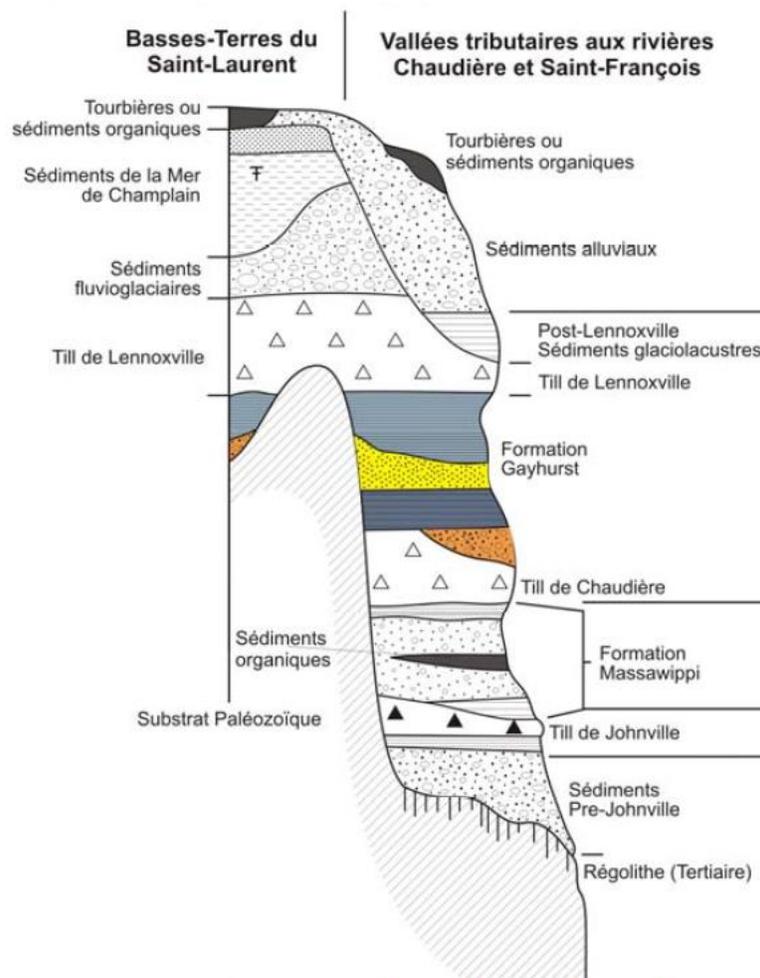


Figure 3.3 : Cadre stratigraphique des sédiments superficiels dans les bassins versants des rivières Chaudière et Saint-François (Caron, 2013; voir aussi Caron et al., 2007)

Tableau 3.1 : Sédiments du Quaternaire dans les Appalaches (modifié de Caron, 2013, d'après Parent, 1987a et 1987b, et Lamothe et al., 1992)

Âge	Formation	Événements glaciaires	Caractéristiques du sédiment
WISCONSINIEN	Till de Lennoxville Lentille de Drolet	Écoulement glaciaire vers le Sud-Est à Sud-Sud-Est; Lentille de Drolet déposée par un lobe précoce.	Till compact silto-argileux gris-olive.
	Formation de Gayhurst	Basses-Terres du Saint-Laurent couvertes de glace et bloquant le drainage durant 3000 à 4000 ans; sédiments de la Formation de Gayhurst déposés dans des lacs.	Sédiments glaciolacustres; silt, sable, gravier interstratifié ; silt et argile rythmé.
	Till de Chaudière	Écoulement glaciaire vers l'Ouest-Sud-Ouest ou Sud-Ouest; le glacier Chaudière a retraité jusqu'à la limite Basses-Terres du Saint-Laurent-Appalaches.	Till compact silto-argileux gris-olive, contient peu de roches ultramafiques.
SANGAMONIEN	Formation de Massawippi	Sédiments fluviaux et lacustres d'un intervalle non glaciaire.	Sédiments rythmés, débris organiques fins, sédiments fluviaux et morceaux de bois.
ILLINOIEN	Till de Johnville	Écoulement glaciaire vers le Sud-Est	Till compact graveleux, couleur grise, matrice sans carbonate et pyrite; partie supérieure oxydée.
PRE-ILLINOIEN	Sédiments Pré-Johnville	Sédiments fluviaux et lacustres d'un intervalle non glaciaire.	Graviers fluviaux localement oxydés
PALÉOZOÏQUE	Roche en place		

Les avancées et retraits du glacier dans la région provoquent la création de lacs glaciaires, ce qui explique la présence de sédiments laminés glaciolacustres (varves et rythmites) au sommet et à la base de chaque unité de till. Le retour à des conditions normales de drainage, probablement au cours du dernier interglaciaire, est représenté par les sédiments fluviaux, lacustres et organiques de la Formation de Massawippi. La déglaciation finale, vers ± 14 ka B.P., dans le nord de la Nouvelle-Angleterre et dans le sud du Québec s'est effectuée localement vers le nord-est puis, régionalement, vers le nord-ouest, en suivant approximativement les structures des Appalaches. Le retrait des glaces a permis la mise en place de sédiments glaciolacustres. Cependant, le retrait de l'inlandsis a été ponctué de pauses sporadiques bien marquées ou de récurrences mineures, édifiant des moraines tardiglaciaires régionales.

La déglaciation a ainsi fortement marqué l'évolution du paysage physique régional. Les sédiments de surface et les formes associées reflètent la persistance de conditions glaciolacustres au tardiglaciaire. Le retrait du front glaciaire s'est fait essentiellement à contre-pente, amenant la formation de lacs proglaciaires dont les élévations se sont progressivement abaissées à mesure que le front libérait les exutoires les plus bas des bassins versants de la rivière Saint-François. Il y a environ 11 000 ans, le retrait des glaces a permis l'invasion de l'océan Atlantique dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. La Mer de Champlain s'étendait jusqu'à des altitudes d'environ 190 m dans le piémont appalachien. Enfin, progressivement, le réseau fluvial actuel s'est mis en place lors de l'Holocène.

3.2.2 Cartographie des sédiments du Quaternaire

Dans le cadre du PACES Estrie, la carte de la géologie des formations superficielles déjà disponible a été révisée par Olivier Caron de l'UQAM sur la base du modèle numérique d'élévation obtenu de levés LiDAR couvrant la région d'étude. Cette carte constitue le livrable PACES n° 12 disponible à l'échelle 1/100 000 ainsi que présenté dans l'atlas hydrogéologique.

La carte ayant servi de base à la production de la nouvelle carte de la géologie des formations superficielles avait été obtenue du portail du SIGEOM (Système d'information géominière) du MERN. Comme le montre le tableau 3.2, pour l'Estrie, cette carte résultait de plusieurs sources, mais essentiellement des travaux de Caron (2013) qui avait couvert les bassins versants des rivières Saint-François et Chaudière à l'échelle 1/50 000. À l'ouest de la région d'étude, le secteur avait déjà été cartographié lors du PACES Montérégie Est en 2013 par Dubé-Loubert et al. (2013), aussi à l'échelle 1/50 000. Quelques portions au nord de la région d'étude ont été cartographiées durant le PACES Nicolet-Bas-Saint-François par Lamothe et Saint-Jacques (2014), toujours à l'échelle 1/50 000.

Les feuillets SNRC couverts par ces diverses études sont indiqués au tableau 3.2. Le format de présentation du livrable n° 12 suit la classification du SIGEOM basée sur la représentation officielle définie par le MERN (2014). Les dépôts sont ainsi classés selon leur zone morphosédimentaire. La carte du livrable n° 12 ne présente pas les sites d'observation (sections ou affleurements) utilisés pour la définition des différentes unités quaternaires.

Tableau 3.2 : Études à l'origine de la cartographie des formations superficielles

Étude	Échelle	Année	Bassins couverts	Feuillelet SNRC au 1 : 50 000				
PACES Nicolet-Bas-Saint-François	50 000	2015	Rivières Nicolet et Saint-François	<i>31H01</i>	<i>31H08</i>	<i>31H09</i>	-	-
Thèse de Caron (2013)	50 000	2013	Rivières Chaudière et Saint-François	<i>31H01</i>	<i>31H08</i>	<i>31H09</i>	<i>31H16</i>	<i>21E04</i>
				<i>21E05</i>	<i>21E12</i>	<i>21E13</i>	<i>21E03</i>	<i>21E06</i>
				<i>21E11</i>	<i>21E14</i>	<i>21L03</i>	<i>21E02</i>	<i>21E07</i>
				<i>21E10</i>	<i>21E15</i>	<i>21E09</i>	<i>21E16</i>	-
PACES Montérégie Est	50 000	2013	Rivières Richelieu, Yamaska et baie Mississquoi	<i>31H01</i>	<i>31H08</i>	<i>31H09</i>	-	-

**En italique sont indiqués les feuillets couverts seulement en partie par l'étude.*

Un important travail de révision cartographiques des sédiments du Quaternaire a été réalisé grâce à l'utilisation notamment d'une nouvelle couverture LiDAR pour la zone d'étude. Le LiDAR a une précision au mètre en surface et de 0,15 mètre en élévation (Z). Pour générer le modèle numérique d'élévation (MNE) à partir des données brutes, un important travail de traitement a été nécessaire. Il a été nécessaire en premier lieu de discerner l'élévation du sol de celle de la canopée. Des analyses de composante principale (PCA) sont utilisées sur le MNE afin de déterminer les axes principaux (orientations cardinales) responsables des variations topographiques. Pour générer les images utilisées pour l'interprétation cartographique, des matrices d'ombrage (*hillshade*) à haute résolution spatiale ont été créées en utilisant une

illumination artificielle orientée perpendiculairement aux directions identifiées par les PCA. Ces images, complétées par des observations au sol, ont permis de cartographier les formations superficielles du secteur d'étude avec une précision impossible à atteindre avec les techniques traditionnelles de photo-interprétation (figure 3.4). La révision de la carte de la géologie du Quaternaire sur la base du LiDAR a d'ailleurs notamment permis de préciser la position des contacts entre les unités. Une attention particulière a été portée sur les vallées fluviales et les sédiments fluvioglaciaires.

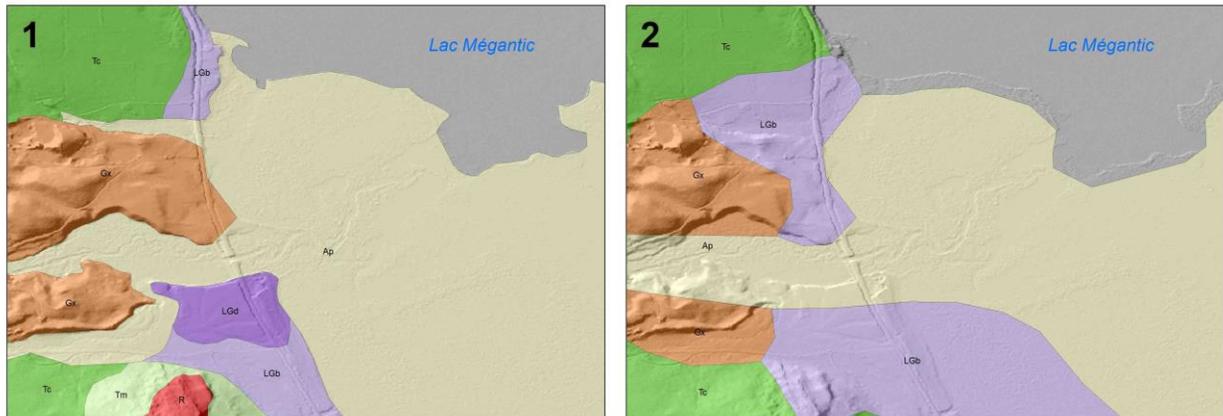


Figure 3.4 : Exemple de révision et de la nouvelle interprétation de la cartographie de la géologie du Quaternaire à l'aide du LiDAR (1) et de l'ancienne interprétation régionale (2) de Shilts (1981)

La carte du livrable n° 12 montre que la géologie du Quaternaire est dominée par une couverture de till qui tend à être mince sur les hauts topographiques où on a aussi du roc affleurant. Le till est plus continu hors des hauts topographiques.

Les sédiments fluvioglaciaires sont assez répandus dans la région d'étude et peuvent atteindre des épaisseurs de 40 m. Ils sont subdivisés en deux unités selon leur mode de mise en place. Lorsque le corps sédimentaire est déposé par des eaux en milieu sous-glaciaire ou au contact de la glace, ils sont surtout constitués de sables et graviers stratifiés et déformés. Ces sédiments sont mis en place par les eaux de fonte au contact ou à proximité du glacier. Les unités situées sous la limite marine ou glaciolacustre ont généralement été remaniées par les vagues et les courants lors de la submersion ou de l'exondation. Les eskers sont très nombreux sur l'ensemble de la région d'étude mais ils ont été considérablement exploités depuis le dernier siècle. Dans ce secteur des Appalaches, le territoire est façonné par une série de moraines cartographiées par Gadd et al. (1972). Les sédiments associés à ces moraines sont liés à une récession progressive d'un front glaciaire actif qui abandonne des eskers et des amas fluvioglaciaires frontaux dans un environnement contrôlé par l'élévation des lacs d'obturation. Les principaux complexes morainiques sont localisés dans les secteurs de Dixville, East-Angus, Ham, Cherry-River et au nord de La Patrie. Les dépôts fluvioglaciaires déposés en milieu proglaciaire forment des cônes d'épandage sous-aquatique et sont souvent constitués de graviers, de sable ou de silt et un peu de till ou de diamicton.

Les sédiments mis en place dans le lac proglaciaire Memphrémagog (McDonald, 1969; Parent, 1987b) sont en partie constitués de sables en couverture, qui sont en général de conductivité hydraulique assez forte. Les dépôts associés au faciès glaciolacustre d'eau profonde se présentent comme des rythmites présentant une alternance régulière de lits silteux situés dans les dépressions plus profondes du paléo-bassin. Les sédiments littoraux et pré-littoraux se présentent comme des sables, des sables silteux stratifiés, des graviers et des blocs formant des cordons littoraux. Leur élévation est directement liée à l'abaissement du niveau des eaux

glaciolacustres par l'abandon de seuils topographiques s'abaissant vers l'aval. Les sédiments deltaïques associés à cet environnement sédimentaire sont constitués de silts, de sables et graviers stratifiés formant des accumulations tabulaires. Ces sédiments ont été mis en place par les eaux de fonte et déposés à l'embouchure des rivières lors de la régression des plans d'eau glaciolacustre.

Les dépôts organiques sont surtout constitués d'accumulations de tourbes à sphaigne, d'éricacées et de débris végétaux. Présents sur l'ensemble de la région à l'étude, ils apparaissent surtout dans les dépressions topographiques mal drainées et aux abords des lacs. Ils sont déposés dans des milieux palustres à plan d'eau ouvert (étangs) et les épaisseurs de ces dépôts peuvent varier de 1 à 10 m.

Des alluvions sableuses sont présentes le long de plusieurs des rivières principales. Le Quaternaire ancien est rarement visible en surface sur des étendues considérables et on le voit surtout en coupe le long de cours d'eau.

Globalement, en plus d'une couverture spatiale qui englobe la partie du bassin versant de la rivière Saint-François qui se trouve aux États-Unis, la nouvelle carte du Quaternaire se distingue surtout par un niveau de détail plus important et la définition plus fine de la distribution spatiale des unités de dépôts meubles. De plus, par rapport à la version antérieure, certaines caractéristiques ont des différences notables. D'abord, les affleurements rocheux, sans dépôts meubles, sont plus abondants dans la nouvelle carte; les changements sont particulièrement importants à l'ouest du mont Mégantic et dans la portion la plus au sud du bassin de la rivière Chaudière. Aussi, l'étendue des sédiments fluvioglaciaires est mieux précisée et la présence de ces sédiments est reconnue pour la première fois dans certains secteurs; c'est particulièrement notable de chaque côté de la vallée de la rivière Saint-François entre East Angus et Weedon. Enfin, l'étendue des sédiments lacustres est beaucoup plus restreinte; des changements importants sont notables le long de la vallée de la rivière Saint-François, entre East Angus et Weedon ainsi qu'entre Sherbrooke et Richmond. L'étendue de ces sédiments est aussi considérablement réduite à la marge ouest de la région d'étude, dans les bassins versants des rivières Yamaska et Richelieu, de Valcourt, au nord, jusqu'à Mansonville, au sud.

3.2.3 Modèle 3D géologique des dépôts meubles

Dans le cadre du PACES Estrie, Olivier Caron de l'UQAM a révisé et étendu le modèle géologique des dépôts meubles qu'il avait développé antérieurement dans les bassins versants des rivières Chaudière et Saint-François (Caron, 2013). Ainsi, le modèle révisé couvre toute la région d'étude du PACES Estrie, ce qui a exigé d'étendre le modèle original à l'ouest sur la région d'étude du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013), au nord sur la région d'étude du PACES Nicolet-Bas-Saint-François (Larocque et al., 2015), ainsi qu'aux États-Unis pour couvrir l'ensemble du bassin de la rivière Saint-François et servir notamment de base à l'estimation de la recharge (section 4.3). L'annexe 4N contient le modèle géologique 3D.

La révision et l'extension du modèle géologique 3D ont été faites notamment sur la base de nouvelles données qui n'étaient pas disponibles lors du développement du modèle original : 1) descriptions de forages extraites de rapports hydrogéologiques, obtenus notamment des municipalités (section 2.2), 2) description de nouveaux forages faits pour implanter des puits d'observation (section 2.3), et 3) compilation d'affleurements faite à l'UQAM. Tous les points de contrôle du modèle géologique 3D sont compilés dans la base de données du PACES Estrie.

La révision du modèle géologique s'imposait afin d'inclure la nouvelle cartographie des sédiments quaternaires, l'apport d'une nouvelle couverture d'orthophotographies et les données de forages inédites. Dans le cadre des présents travaux, un intérêt particulier pour la stratigraphie quaternaire des formations quaternaires anciennes a permis de modéliser avec beaucoup plus de détails

certaines aquifères potentiels préservés au fond des vallées tributaires des rivières Saint-François et Chaudière. L'ajout de données inédites a permis le raffinement de l'unité Quaternaire ancien et la modélisation d'une sous-unité. Cette sous-unité est un aquifère granulaire enfoui situé principalement le long des rivières Chaudière, Eaton, Coaticook et Tomifobia.

Le tableau 3.3 compare les unités géologiques représentées dans le modèle géologique 3D original de Caron (2013) avec les unités du modèle révisé. Ainsi, certaines unités avec une distribution spatiale restreinte ont été combinées, soient les sédiments pélagiques qui regroupent les sédiments fins glaciomarins et glaciolacustres, ainsi que les sédiments littoraux et deltaïques qui regroupent trois unités antérieurement considérées séparément.

Tableau 3.3 : Comparaison des unités représentées dans le modèle géologique original de Caron (2013) et la version révisée dans le cadre du PACES Estrie

Modèle original		Modèle révisé	
Unité	Symbole	Unité	Symbole
Sédiments de tourbière	O	Organique	O
Alluvions, sédiments éoliens, dépôts d'éboulis, colluvions et sédiments lacustres	A LG ED CE	Alluvions	A
Argiles et silts glaciomarins	MGA	Sédiments pélagiques	LGA MGA
Sédiments glaciolacustres d'eau profonde	LGA		
Sables et graviers glaciomarins littoraux et pré-littoraux	MGB	Sédiments littoraux et deltaïques	MGB MGD LGB LGD
Sédiments glaciomarins deltaïques	MGD		
Sédiments glaciolacustres littoraux et pré-littoraux	LGB		
Sédiments glaciolacustres deltaïques et prodeltaïques	LGD		
Sédiments fluvioglaciaires (graviers et sables grossiers)	GS GX	Fluvioglaciaire	GS GX
Sédiments glaciaires (tills)	T	Dépôts glaciaires	T
Formations quaternaires anciennes	Q	Quaternaire ancien	Q

Les unités de sédiments superficiels peuvent constituer des aquifères ou des aquitards et elles vont contrôler les conditions de confinement de l'aquifère rocheux régional. Les implications hydrogéologiques de la séquence de sédiments présente dans la région d'étude sont discutées à la prochaine section qui décrit aussi la distribution de l'épaisseur des sédiments superficiels.

3.2.4 Définition et épaisseur des unités hydrogéologiques

Le tableau 3.4 présente la définition des unités hydrogéologiques (UH) de la région du PACES Estrie basée sur les unités lithostratigraphiques définies par Caron (2013) (tableaux 3.1 et 3.3). Les sédiments de tourbière ne sont pas considérés à cause de leurs étendues et épaisseurs limitées. La région d'étude étant généralement au-dessus de la limite marine, les sédiments glaciomarins d'eau profonde (MGA) ne sont pas non plus considérés explicitement, étant intégrés dans la même unité que les sédiments glaciolacustres d'eau profonde (LGA) dans le modèle géologique 3D (tableau 3.3).

Tableau 3.4 : Unités hydrogéologiques (UH) de la région d'étude du PACES Estrie sur la base de la stratigraphie des formations superficielles définie par Caron (2013)

Unité	Unité lithostratigraphique	Description de l'unité	Rôle hydrogéologique
UH1	Alluvions (A), colluvions (C), sédiments glaciomarins grossiers (MGb et MGd) [portion aval de la rivière Saint-François seulement], sédiments lacustres et glaciolacustres grossiers (LG, LGb et LGd)	Sédiments généralement sableux mais à granulométrie variable. Les alluvions récentes sont limitées à la bordure des cours d'eau et les autres types de sédiments sont dans les vallées. Les accumulations peuvent atteindre quelques mètres.	Aquifère superficiel libre avec un potentiel limité et vulnérable à la contamination
UH2	Argiles et silts glaciomarins (Mga) [portion aval de la rivière Saint-François seulement] et sédiments glaciolacustres fins (LGa)	Sédiments silteux présents dans la majorité des vallées. Accumulations pouvant dépasser 5 m localement.	Aquitard
UH3	Sédiments fluvioglaciaires (Gs et Gx)	Sédiments grossiers perméables (sable et gravier). Les accumulations peuvent excéder 10 m.	Aquifère libre, semi-confiné ou confiné à fort potentiel localement
UH4	Sédiments glaciaires (T) (Till de Lennoxville)	Diamictons (granulométrie variable) généralement peu perméables. Accumulations de moins de 1 à 3 m dans les hauts topographiques mais pouvant excéder 10 m dans les dépressions.	Aquitard
UH5	Sédiments quaternaires anciens (Q) et sédiments indifférenciés	Sédiments variables allant de silt à sable et gravier et comprenant aussi des tills. Les accumulations peuvent excéder 10 m ou 20 m dans les vallées enfouies.	Assemblage complexe de matériaux pouvant constituer des aquitards ou des aquifères. Plusieurs puits municipaux exploitent des sédiments anciens dans des aquifères confinés.
UH6	Aquifère rocheux régional (R)	Roc généralement peu fracturé et avec une perméabilité limitée.	Aquifère libre ou semi-confiné dans les hauts topographiques et confiné dans les vallées. Aquifère généralement exploité par les puits résidentiels et certains puits municipaux.

Le tableau 3.4 montre que deux unités hydrogéologiques jouent le rôle d'aquitards et limitent ainsi la recharge mais protègent les aquifères sous-jacents lorsque ces unités sont présentes. Ainsi, les sédiments fins silteux et argileux (UH2) ainsi que le Till de Lennoxville (UH4) sont des aquitards, l'unité UH2 étant moins perméable que l'unité UH4, une plus faible épaisseur de cette unité sera considérée induire des conditions captives (section 3.3).

Le tableau 3.4 montre aussi que plusieurs unités hydrogéologiques dans les dépôts meubles peuvent présenter un potentiel aquifère permettant l'exploitation de l'eau souterraine. L'unité hydrogéologique supérieure (UH1) est constituée de matériaux perméables mais cette unité n'est que localement suffisamment épaisse pour constituer un aquifère exploitable. C'est notamment le

cas de puits de la municipalité de Richmond qui sont installés dans des alluvions en bordure de la rivière Saint-François.

Les sédiments fluvioglaciaires constituant notamment les eskers (UH3) ont un potentiel aquifère plus intéressant mais leur étendue est aussi relativement limitée dans la région d'étude. Le Quaternaire ancien (UH5) est une unité plus complexe parce qu'elle contient des unités pouvant constituer des aquitards et des aquifères (figure 3.3). Ainsi, deux unités de till ainsi qu'une unité silteuse peuvent constituer des aquitards dans le Quaternaire ancien. Toutefois, on peut aussi trouver des unités sableuses et graveleuses très perméables à l'intérieur et à la base du Quaternaire ancien et ces unités sont en fait couramment exploitées par des puits municipaux dans la région d'étude. La section 6.1 précise le potentiel aquifère des dépôts meubles en se concentrant sur les sédiments fluvioglaciaires (UH3) et le Quaternaire ancien (UH5).

Le seul aquifère d'extension régionale est constitué du roc fracturé. Toutefois, bien que cet aquifère permet généralement d'approvisionner les puits résidentiels, sa perméabilité relativement restreinte (section 4.1) fait en sorte que les débits des puits au roc sont généralement assez limités. En l'absence d'autres options, plusieurs municipalités de l'Estrie ont tout de même des puits installés dans le roc.

Les livrables cartographiques du PACES Estrie montrent l'épaisseur totale ainsi que les épaisseurs des unités hydrogéologiques retrouvées dans la région d'étude. Le livrable n° 15A montre ainsi l'épaisseur totale de dépôts meubles dans la région d'étude. Ces épaisseurs peuvent aller de nulles, notamment sur les hauts topographiques où le roc affleure par endroits, jusqu'à des épaisseurs excédant 50 m. Les plus grandes épaisseurs de sédiments se retrouvent généralement dans les vallées où le roc peut être enfoui sous une succession complexe de sédiments (figure 3.3). C'est notamment le cas dans la vallée de la rivière Saint-François à partir du lac Aylmer, au nord-est, jusqu'au-delà du lac Massawippi, au sud-ouest, ainsi que dans la partie amont de la vallée de la rivière Chaudière à partir du lac Mégantic. Il y a aussi des accumulations notables de dépôts meubles au centre de la MRC du Val-Saint-François, à l'ouest du Mont Mégantic, ainsi que le long de plusieurs cours d'eau d'orientation générale allant du sud-est vers le nord-ouest dans la partie sud de la région d'étude, notamment le long de la rivière Coaticook.

Les livrables n° 15B à 15F montrent les épaisseurs des unités hydrogéologiques UH1 à UH5. Le livrable n° 15B montre que la présence de l'unité UH1 est restreinte aux vallées et que l'épaisseur de cette unité est généralement restreinte, sauf assez localement. Cette distribution restreinte limite le potentiel aquifère de l'unité UH1 tel que mentionné précédemment.

Le livrable n° 15C présente l'épaisseur de l'unité UH2 constituée de sédiments fins silteux ou argileux. Bien que l'extension de cette unité soit aussi restreinte aux vallées, elle constitue souvent des accumulations excédant 5 m d'épaisseur qui vont permettre à cet aquitard d'induire des conditions captives dans l'aquifère granulaire ou rocheux sous-jacent.

Le livrable n° 15D illustre la distribution de l'unité UH3 (fluvioglaciaire) qui a un potentiel aquifère intéressant. Cette unité est aussi surtout présente dans les vallées mais peut se retrouver hors des vallées. Les épaisseurs de cette unité peuvent excéder 10 m et lui conférer un bon potentiel aquifère localement (voir section 6.1).

Le livrable n° 15E montre la distribution de l'unité UH4, soit le Till de Lennoxville. Contrairement aux autres unités, cette unité recouvre pratiquement toute la surface de la région d'étude, sauf à quelques endroits dans les hauts topographiques où le roc est affleurant. Ce till peut avoir localement des épaisseurs excédant 10 m, ce qui est considéré induire des conditions captives aux aquifères sous-jacents, mais son épaisseur est souvent moindre que 5 m, ce qui est considéré mener à des conditions semi-captives.

Finalement, le livrable n° 15F présente les épaisseurs de l'unité UH5 constituée du Quaternaire ancien. Cette unité peut avoir des épaisseurs excédant 10 m dans les vallées mais sa distribution peut aussi s'étendre hors des vallées, mais avec des épaisseurs moindres. Cette unité présente le potentiel aquifère le plus intéressant dans les dépôts meubles de la région (voir section 6.1).

Le livrable n° 16 montre la topographie du roc sous les dépôts meubles. Bien que la morphologie générale de la surface du roc soit similaire à la topographie du sol (livrables n° 1 et n° 3), les dépressions sont beaucoup plus marquées dans les vallées où se trouvent les plus épaisses accumulations de dépôts meubles.

3.2.5 Coupes et contextes hydrogéologiques

Les travaux sur les propriétés hydrauliques du roc ont montré que les unités géologiques du roc n'ont pas des valeurs distinctes de conductivité hydraulique (section 4.1). Conséquemment, les coupes produites dans le cadre du PACES Estrie se sont concentrées à montrer la distribution des dépôts meubles (livrable n° 14).

La figure 3.5 montre les localisations des quatre coupes qui ont été développées alors que les coupes elles-mêmes sont présentées dans l'atlas hydrogéologique du PACES Estrie (voir aussi l'annexe 4O). Quatre coupes ont été jugées nécessaires afin de représenter les diverses conditions rencontrées dans la région d'étude. Les coupes ont aussi servi de base au développement de modèles numériques d'écoulement en 2D (section 6.2).

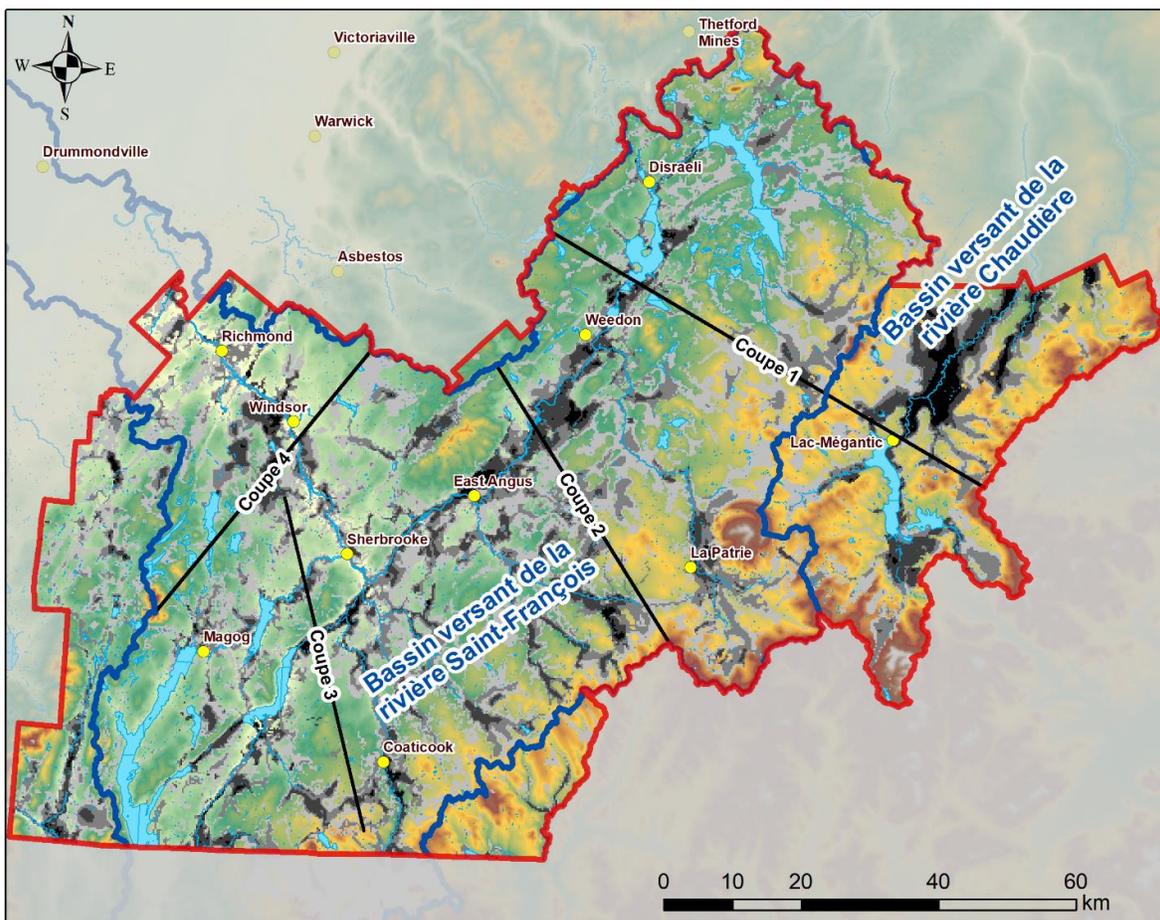


Figure 3.5 : Localisation des quatre coupes dans la région d'étude du PACES Estrie

Les coupes ont donc été positionnées de façon à être généralement perpendiculaires aux principales pentes de la topographie qui correspondent aussi aux directions générales de l'écoulement de l'eau souterraine. Ainsi, trois coupes sont orientées généralement du sud-est vers le nord-ouest à l'est (coupes 1), au centre (coupes 2) et à l'ouest (coupes 3) de la région d'étude, alors qu'une autre coupe est orientée du sud-ouest vers le nord-est dans la partie nord-ouest de la région d'étude (coupes 4).

Les coupes montrent quatre aspects distincts des conditions géologiques et hydrogéologiques dans la région d'étude : 1) une coupe géologique montrant la distribution des épaisseurs des types de sédiments constituant les six unités hydrogéologiques (tableau 3.4); 2) une coupe conceptuelle hydrogéologique illustrant les conditions présumées d'écoulement régional de l'eau souterraine; 3) une coupe présentant les résultats de la simulation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine (section 6.2); et 4) une coupe montrant les résultats de la simulation numérique de l'âge de l'eau souterraine (section 6.2). Les coupes géologiques seront décrites dans la présente section, alors que la coupe conceptuelle sera discutée à la section 4.7 et les coupes représentant les résultats des simulations numériques seront abordées à la section 6.2. Afin de mieux montrer la distribution des épaisseurs des unités, la coupe géologique a une exagération verticale plus importante (50 X pour la coupe 1 et 40 X pour les autres coupes) que les trois autres coupes qui ont la même exagération verticale (20 X).

La coupe 1 couvre les bassins versants des rivières Saint-François et Chaudière et passe donc par la ligne de partage des eaux entre ces deux bassins. Le till de Lennoxville (UH4) recouvre le roc avec une épaisseur variable qui est généralement plus importante dans les dépressions et plus faible, ou absent, sur les hauts topographiques. Les vallées des rivières Saint-François et Chaudière ont des accumulations plus importantes de sédiments et l'unité de Quaternaire ancien (UH5) y est présente à la base des dépôts meubles. La coupe 2 montre des conditions similaires avec des accumulations plus importantes dans la vallée de la rivière Saint-François. La coupe 3 se distingue par la très faible épaisseur de sédiments sur le roc du sud de la région d'étude jusqu'à la dépression du lac Massawippi. La coupe 4 montre aussi peu de sédiments sur le roc, sauf en bordure de la rivière Saint-François.

3.3 Conditions de confinement

En Estrie, il y a un potentiel aquifère dans l'aquifère rocheux fracturé à l'échelle régionale ainsi que dans des unités de sédiments superficiels à l'échelle locale où ces unités sont épaisses, soit généralement dans des vallées enfouies (section 6.1). Les conditions de confinement ont donc été définies pour le roc ainsi que pour deux unités aquifères granulaires, soient les unités hydrogéologiques UH3 (sédiments fluvioglaciers) et UH5 (Quaternaire ancien) (tableau 3.4). Ainsi, le livrable 17A présente les conditions de confinement de l'aquifère rocheux, le livrable 17B montre les conditions de confinement pour l'unité de Quaternaire ancien (UH5) et le livrable 17C documente les conditions de confinement pour l'unité de sédiments fluvioglaciers (UH3). La méthodologie utilisée pour préparer ce livrable a été adaptée des PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013) et Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015). Toutefois, pour l'Estrie, la définition des conditions de confinement ainsi que l'identification du potentiel aquifère dans les sédiments superficiels ont été basés sur le modèle géologique 3D des sédiments superficiels (section 3.2).

Trois conditions de confinement ont été considérées : les conditions libres, semi-captives et captives. Le tableau 3.4 (section 3.2) a présenté le regroupement des unités quaternaires en termes d'unités hydrogéologiques. Ce sont les épaisseurs de ces unités qui ont servi au classement du confinement, principalement les épaisseurs de sédiments argileux et de sédiments indifférenciés sous-jacents qui sont considérés dans les critères des conditions de confinement. Les sédiments indifférenciés sous-jacents aux sédiments argileux comprennent les sédiments glaciaires qui représentent un aquitard, soit le Till de Lennoxville, ainsi que les sédiments du Quaternaire ancien dont certaines sous-unités sont aussi des aquitards.

Les sédiments du Quaternaire ancien constituent un assemblage complexe de matériaux qui peuvent contenir à la fois des tills peu perméables et des matériaux granulaires perméables. Compte tenu de l'incertitude sur la nature et la perméabilité des sédiments indifférenciés, l'utilisation de l'épaisseur de ces sédiments comme critère de confinement entraîne également une certaine incertitude sur les conditions définies, particulièrement les conditions semi-captives dont les critères sont basés sur ces épaisseurs estimées. Conséquemment, les conditions semi-captives ont été subdivisées en trois sous-catégories afin de documenter l'incertitude et de mieux guider l'utilisation de ce livrable.

3.3.1 Livrable 17A – Confinement de l'aquifère rocheux

Les conditions de confinement de l'aquifère rocheux ont été définies pour l'ensemble du territoire du PACES Estrie. Les portions du territoire du PACES Estrie couvertes par les projets PACES antérieurs sont également incluses dans la zone cartographiée pour les conditions de confinement. Le confinement dans ces secteurs avait déjà été défini pour l'aquifère rocheux dans le cadre du PACES Montérégie-Est (Carrier et al., 2013), du PACES Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015), et du PACES Nicolet-Bas-Saint-François (Larocque et al., 2015). Toutefois, la stratigraphie des sédiments du quaternaire n'était pas aussi détaillée qu'en Estrie lors de la réalisation de ces projets. La mise à jour du modèle géologique 3D des sédiments du quaternaire (Caron, 2003) a permis d'établir l'épaisseur des dépôts quaternaires pour l'ensemble de la région d'étude du PACES Estrie (section 3.2). Les conditions de confinement ont ainsi été définies à nouveau pour la portion du territoire déjà couverte par une cartographie PACES antérieure. De plus, les conditions de confinement ont été aussi estimées pour la portion du bassin de la rivière Saint-François située aux États-Unis.

Les critères utilisés pour définir chaque condition de confinement pour l'aquifère rocheux sont résumés au tableau 3.5. Des couleurs distinctes sont associées aux différents niveaux de confinement et ces mêmes couleurs sont utilisées sur les cartes de confinement. Les critères utilisés sont basés sur les épaisseurs d'unités hydrogéologiques du tableau 3.4 (section 3.2) et

un code est associé à la condition de confinement pour faciliter la production des cartes. Afin de simplifier la cartographie des conditions de confinement, des regroupements ont été faits de critères différents qui sont jugés mener à des conditions similaires, particulièrement pour les conditions semi-captives. Ces regroupements évitent aussi d'avoir des classes distinctes pour des conditions représentant une très faible proportion de la surface de la région d'étude.

Tableau 3.5 : Définition des conditions de confinement de l'aquifère rocheux

Condition de confinement		Critères	Code	Nb de cellules	% zone PACES	
Condition captive 12,2% 20 957		<i>Confinement par l'argile</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 ≥ 5 m	43	1 301	0,76	
		<i>Confinement par glaciaire (till)</i> - Till (UH4) ≥ 10 m	42	17 208	10,05	
		<i>Confinement par till et quaternaire ancien</i> - Till (UH4) entre 3 et 10 m ET - Quaternaire ancien UH5 ≥ 10 m	41	2 448	1,43	
Condition semi-captive 25,1% 43 001	Niveau 1 0,5% 869	<i>Condition semi-captive reliée à l'épaisseur d'argile limitée ET épaisseur importante de till</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 entre 1 et 5 m ET - Till (UH4) entre 3 et 10 m	33	405	0,24	
		<i>Condition semi-captive reliée à l'épaisseur d'argile limitée ET épaisseur importante de quaternaire ancien</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 entre 1-5 m ET - UH4 + UH5 ≥ 13 m, (forcément UH4 < 3 m)	32	0	0,00	
		<i>Condition semi-captive reliée à l'épaisseur d'argile limitée ET épaisseur limitée de quaternaire ancien</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 entre 1 et 5 m ET - UH4 + UH5 entre 3 et 13 m, (forcément UH4 < 3 m)	31	109	0,06	
		<i>Condition semi-captive reliée à l'épaisseur d'argile limitée ET épaisseur faible de till</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 entre 1 et 5 m ET - UH4 + UH5 < 3 m	30	355	0,21	
	Niveau 2 24,6% 42 132	<i>Condition semi-captive reliée à une faible épaisseur d'argile ET épaisseur intermédiaire de till</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 < 1 m ET - Till UH4 entre 3 et 10 m	23	35 739	20,88	
		<i>Condition semi-captive reliée à une faible épaisseur d'argile ET forte épaisseur de till et quaternaire ancien</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 < 1 m ET - UH4 + UH5 ≥ 13 m, (forcément UH4 < 3 m)	22	69	0,04	
		<i>Condition semi-captive reliée à une faible épaisseur d'argile ET épaisseur réduite de till et quaternaire ancien</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 < 1 m ET - UH4 + UH5 entre 3 et 13 m, (forcément UH4 < 3 m)	21	6 384	3,69	
	Condition libre 59,1% 101 114		<i>Condition libre reliée à une faible épaisseur d'argile ET de till et quaternaire ancien</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 < 1 m ET - Épaisseur de sédiments indifférenciés UH4+UH5 < 3 m	12	19 592	11,45
			<i>Condition libre reliée au roc affleurant</i> - Roc affleurant (UH1+UH2+UH3+UH4+UH5 ≤ 1 m)	11	81 522	47,63
	3,6%		Cellule Eau pour laquelle on ne calcule pas le confinement	99	6 087	3,56

Note : le pourcentage du territoire représenté par la condition de confinement est défini en fonction du nombre de cellules de 250x250 m du modèle géologique. Le nombre de cellule est indiqué sous le %.

Le code de conditions de confinement a été ainsi attribué aux cellules de 250 m par 250 m couvrant l'ensemble du territoire du PACES Estrie. Dans l'entête du tableau 3.5, le champ *Nb de cellules* indique le nombre de cellules correspondant à chacune des conditions et le champ *% zone PACES* présente la proportion de cellules de la zone cartographiée. Le modèle géologique et les conditions de confinement ont aussi été définies pour l'extension aux États-Unis du bassin de la rivière Saint-François. Cette extension du modèle 3D aux États-Unis avait pour but de permettre l'estimation de la recharge sur tout le bassin de la rivière Saint-François afin de pouvoir utiliser les stations de jaugeage sur cette rivière pour caler l'estimation de la recharge (voir section 4.3). Les statistiques du tableau 3.5 (ni des tableaux 3.6 et 3.7) ne considèrent toutefois pas l'extension du modèle 3D aux États-Unis. Le confinement n'a pas été calculé pour les cellules associées à une étendue d'eau (lac ou rivière).

Les couleurs indiquent le niveau de confinement du rouge (libre) au vert (captif) en passant par le jaune (semi-captif). La couleur rouge est associée aux conditions libres, mais un rouge très foncé distingue les cellules où le roc est affleurant (épaisseur totale de sédiments inférieure à 1 m). Similairement, le vert est associé aux conditions captives, mais un vert très foncé distingue les zones captives où l'épaisseur d'argile est supérieure à 5 m. Trois couleurs contenant du jaune sont associées aux conditions semi-captives afin de distinguer les conditions semi-captives s'approchant des conditions libres (orange) des conditions semi-captives plus près des conditions captives (vert olive) par rapport aux conditions semi-captives intermédiaires (jaune).

Les conditions captives sont reliées soit à la présence de sédiments fins (UH2) ayant une épaisseur excédant 5 m (code 43) ou à la présence d'épaisses accumulations de till (UH4). Dans ce dernier cas, on distingue les situations où l'épaisseur de till (UH4) excède 10 m (code 42) de la situation où l'épaisseur de till (UH4) est entre 3 et 10 m combiné à une épaisseur de Quaternaire ancien (UH5) excédant 10 m (code 41). Cette dernière situation est jugée mener à des conditions captives car le Quaternaire ancien peut comprendre un ou deux tills, même s'il peut aussi comprendre des sédiments perméables. La carte du livrable n° 17A montre que les conditions captives pour l'aquifère rocheux se retrouvent dans les vallées, soit là où on peut avoir de fortes accumulations de sédiments fins (unité UH2; livrable n° 15C), de Till de Lennoxville (unité UH4; livrable n° 15E) ou de Quaternaire ancien (unité UH5; livrable n° 15F). En fait, les conditions captives observées dans la région d'étude sont principalement reliées à la présence de tills épais (code 42). Le confinement contrôlé par les sédiments fins (UH2) est très peu présent et est observé seulement dans la partie aval de la rivière Saint-François, au nord-ouest de la région à l'étude. L'ensemble des types de conditions captives couvre un peu plus que 12% de l'aquifère rocheux dans la région d'étude.

Une première série de conditions semi-captives en vert olive (codes 30 à 33) représente des épaisseurs intermédiaires entre 1 et 5 m de sédiments argileux (UH2) ainsi que de till (UH4) et de quaternaire ancien (UH5) pouvant aller de 3 à plus de 13 m. Ces conditions semi-captives sont jugées se rapprocher des conditions captives mais représentent une faible proportion du territoire (moins de 1%). Les niveaux intermédiaires de conditions semi-captives en jaune (codes 22 et 23) ont de faibles épaisseurs de sédiments argileux (UH2) de moins de 1 m mais des épaisseurs intermédiaires de till (UH4) entre 3 et 10 m (code 23) ou d'une combinaison de till (UH4) et de quaternaire ancien (UH5) excédant 13 m. Les conditions semi-captives du code 23 dominent dans la région d'étude et couvrent plus de 20% de la zone cartographiée. Ces conditions se retrouvent principalement en bordure des grandes vallées ainsi qu'à l'intérieur des vallées moins importantes. Une dernière catégorie de conditions semi-captives en orange (code 21) se rapproche des conditions libres et impliquent moins de 1 m de sédiments argileux et une épaisseur intermédiaire entre 3 et 13 m de la somme de l'épaisseur du till (UH4) et du quaternaire ancien (UH5). Ce type de condition couvre environ 4% de la zone cartographiée et se trouve surtout en périphérie des zones à condition libre.

Les conditions libres sont jugées être présentes lorsque le roc est affleurant tel qu'indiqué en rouge foncé (code 11) ou lorsque les épaisseurs de sédiments argileux (UH2) sont inférieures à 1 m et que les épaisseurs combinées de till (UH4) et de quaternaire ancien (UH5) sont inférieures à 3 m. Les affleurements rocheux se trouvent sur les hauts topographiques qui correspondent aussi aux conditions libres du code 11 (épaisseur totale de sédiments moindre que 1 m). Cette condition domine en fait la zone cartographiée. Les conditions avec de faibles épaisseurs de till ou de quaternaire ancien en rouge (code 12) couvrent moins de territoire et sont rencontrées également sur les hauts topographiques, surtout en périphérie des sommets. Puisque les conditions libres couvrent plus de la moitié de la zone cartographiée (59%) et qu'elles sont présentes sur l'ensemble du territoire, la recharge de l'aquifère rocheux régional devrait pouvoir se faire assez efficacement et assurer le renouvellement de la ressource en eau souterraine (section 4.3). Toutefois, de telles conditions impliquent aussi une vulnérabilité relativement importante (section 4.5).

3.3.2 Livrables 17b et 17c – Confinement des aquifères dans les sédiments quaternaires

Les conditions de confinement des aquifères granulaires ont été définies de façon analogue aux conditions pour l'aquifère rocheux régional. La différence pour les aquifères granulaires est que les unités hydrogéologiques dans les sédiments superficiels ne sont évidemment pas toutes en mesure de confiner les aquifères granulaires, dépendamment de leur position stratigraphique. Pour les aquifères dans les sédiments du Quaternaire ancien, le tableau 3.4 (section 3.2) définissant le cadre hydrostratigraphique montre que les tills dans le Quaternaire ancien (UH5) ne seront pas disponibles pour confiner les aquifères dans cette même unité. Par contre, les aquitards constitués du Till de Lennoxville (UH4) et les sédiments fins (UH2) pourront confiner les aquifères dans le Quaternaire ancien. De même, pour les aquifères dans l'unité fluvioglacière (UH3), seules les argiles glaciolacustres (UH2) pourront confiner ces aquifères.

Une épaisseur minimale des unités lithostratigraphiques a été établie pour considérer qu'elles peuvent former un aquifère granulaire (voir section 6.1). Les cartes de confinement des aquifères granulaires indiquent donc en même temps les endroits où ces unités peuvent avoir un potentiel aquifère. Dans le cas du Quaternaire ancien (UH5), il est considéré avoir un potentiel aquifère seulement au-delà de 10 m d'épaisseur. Cette épaisseur importante a été utilisée comme seuil car cette unité contient un assemblage de sédiments incluant des tills peu perméables en plus de sédiments perméables. Pour les sédiments fluvioglaciers (UH3), une épaisseur moindre de 5 m a servi de seuil pour considérer qu'ils ont un potentiel aquifère. Ces sédiments sont généralement très perméables, mais il est possible qu'ils ne soient pas saturés en eau sur toute leur épaisseur, particulièrement lorsqu'ils sont en conditions libres.

Le tableau 3.6 résume les critères utilisés pour définir les conditions de confinement pour le Quaternaire ancien (UH5). Ces conditions ne sont présentées sur la carte du livrable 17B que lorsque l'épaisseur du Quaternaire ancien excède 10 m. Toutefois, une trame violette indique les endroits où cette unité a entre 1 et 10 m d'épaisseur. Le livrable 17B montre d'abord que les épaisseurs de quaternaire ancien excédant 10 m se retrouvent principalement dans la vallée enfouie du bassin de la rivière Chaudière ainsi que dans la vallée de la rivière Saint-François allant, du sud-ouest, d'East Angus jusqu'au lac Aylmer, au nord-est. Ailleurs dans la région d'étude, le Quaternaire ancien a un potentiel aquifère sur des étendues plus restreintes : on le retrouve à l'est du lac Lovering, dans la vallée de la rivière Massawippi, dans la vallée du ruisseau Bunker situé au sud-ouest du Lac Massawippi, dans la vallée de la rivière Tomifobia, de l'amont de la rivière Nigger au lac Lyster, dans la vallée de la rivière Coaticook (particulièrement au sud de la ville de Coaticook), à l'ouest du mont Mégantic, et entre la rivière Rouge et la rivière au Saumon au nord du lac McGill.

Le Quaternaire ancien dans le bassin de la rivière Chaudière est presque partout en conditions captives à l'exception de la vallée de la rivière Victoria. Dans le bassin de la rivière Saint-François, les conditions de confinement du Quaternaire ancien vont de semi-captives à captives, mais il y a aussi une proportion significative de conditions libres. Le Quaternaire ancien présente un potentiel aquifère sur 9,7% de la région d'étude du PACES Estrie. Cet aquifère est principalement présent en conditions semi-captives (58,5 %) et captives (39,5 %). Seulement 2,1% de cet aquifère est en conditions libres.

Tableau 3.6 : Définition des conditions de confinement dans le Quaternaire ancien (UH5)

Conditions de confinement		Critères utilisés	Code	Nb de cellules	% aquifère	% zone PACES
Pas d'aquifère de quaternaire ancien		Pas de valeur de confinement, car l'épaisseur de l'unité de quaternaire ancien est inférieur à 10 m, UH5 < 10 m	0	148 425	-	86,72
Condition captive 39,5%		<i>Confinement par l'argile</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 ≥ 5 m	43	136	0,8	0,08
		<i>Confinement par glaciaire (till)</i> - Till (UH4) ≥ 10 m	42	6 395	38,5	3,74
Condition semi-captive 58,5%	Niveau 1 1,1%	<i>Confinement semi-captif relié à l'épaisseur d'argile limitée ET épaisseur importante de till</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 entre 1 et 5 m ET - Till (UH4) entre 3 et 10 m	33	190	1,1	0,11
		- Épaisseur de sédiments argileux UH2 entre 1 et 5 m ET - UH4 < 3 m	30	3	0,0	0,00
	Niveau 2 57,4%	- Épaisseur de sédiments argileux UH2 < 1 m ET - Till UH4 entre 3 et 10 m	23	9 535	57,4	5,57
Condition libre 2,1%		- Épaisseur de sédiments argileux UH2 < 1 m ET - Épaisseur de sédiments indifférenciés UH4 < 3 m	12	325	2,0	0,19
		- Unité aquifère affleurante (UH1+UH2+UH3+UH4 = 0)	11	34	0,2	0,02
		Cellule <i>Eau</i> pour laquelle on ne calcule pas le confinement	99	6 116	-	3,57

Le tableau 3.7 résume les critères utilisés pour définir les conditions de confinement pour les sédiments fluvioglaciaires. Les résultats ne sont présentés sur les cartes du livrable 17C que lorsque l'épaisseur excède 5 m. Encore une fois, les critères de classification des conditions de confinement sont définis de la même façon que pour le roc, à l'exception de l'unité de Quaternaire ancien (UH5) et le Till de Lennoxville (UH4) qui ne sont pas considérés.

La carte du livrable 17C montre d'abord que les épaisseurs de sédiments fluvioglaciaires excédant 5 m ne se retrouvent que sporadiquement et sur de petites étendues dans le bassin de la rivière Chaudière. Toutefois, ces sédiments sont présents dans plusieurs des vallées du bassin de la rivière Saint-François, particulièrement au centre dans un rayon d'environ 20 km autour de Cookshire ainsi que dans la partie ouest de la région d'étude.

Les conditions dans les sédiments fluvioglaciaires s'avèrent toutefois généralement libres pour 94,7 % des cellules ayant plus de 5 m de ces sédiments. Ceci implique qu'une partie seulement des accumulations de ces sédiments sera saturée en eau, limitant ainsi le potentiel aquifère de cette unité. De plus, l'eau souterraine contenue dans ces sédiments sera vulnérable à la contamination. L'aquifère fluvioglaciaire présente ainsi un potentiel aquifère intéressant lorsqu'il est présent en conditions captives (0,4 %) et semi-captives (4,9 %), ce qui correspond à 5,3 % de l'aquifère.

Tableau 3.7 : Définition des conditions de confinement dans le fluvioglaciaire (UH3)

Conditions de confinement	Critères	Code	Nb de cellules	% aquifère	% zone PACES
Pas d'aquifère fluvioglaciaire	Pas de confinement, car l'épaisseur de l'unité de fluvioglaciaire est inférieur à 5 m, UH3 < 5 m	0	155 069	-	90,60
Condition captive 0,4%	<i>Confinement par l'argile</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 ≥ 5 m	43	35	0,4	0,22
Condition semi-captive 4,9%	<i>Confinement semi-captif relié à l'épaisseur d'argile limitée</i> - Épaisseur de sédiments argileux UH2 entre 1 et 5 m	33	475	4,9	0,28
Condition libre 94,7 %	- Épaisseur de sédiments argileux UH2 < 1 m	12	9 114	94,7	5,32
	Cellule <i>Eau</i> pour laquelle on ne calcule pas le confinement	99	6 116	-	3,11

3.4 Contextes hydrostratigraphiques et hydrogéologiques

Le livrable n° 18 illustre les contextes hydrostratigraphiques de la région d'étude du PACES Estrie. Ces contextes représentent les séquences des unités hydrogéologiques de dépôts meubles au-dessus de l'aquifère rocheux régional. La séquence possible d'unités hydrogéologiques dans la région d'étude est résumée au tableau 3.4 (section 3.2). Le modèle géologique 3D décrit à la section 3.2 permet d'extraire l'information sur les unités et leurs épaisseurs. Ainsi, les contextes hydrostratigraphiques de la région d'étude ont été définis tel que résumé au tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Définition des contextes hydrostratigraphiques

Contexte	Condition	Implication
1	Roc (UH6) affleurant (< 1 m de sédiments)	Le seul aquifère présent est le roc fracturé en condition libre
2	Till (UH4) (> 1 m) sur roc ou sur le Quaternaire ancien (< 10 m)	Le seul aquifère présent est le roc fracturé
3	Till (UH4) sur Quaternaire ancien (UH5) (> 10 m) sur roc	Il y a un potentiel aquifère dans le Quaternaire ancien
4	Fluvioglacière (UH3) (> 5 m) sur till (UH4) sur roc ou Quaternaire ancien (UH5) (indépendamment de l'épaisseur)	Il y a un potentiel aquifère dans le fluvioglacière
Confinement du roc	Conditions confinées au roc (41, 42 et 43) (voir définition au tableau 3.5)	L'aquifère rocheux dans ce secteur est confiné

Note : les contextes 2, 3 et 4 ne tiennent pas compte de la présence ou non de sédiments des unités hydrogéologiques UH1 ou UH2 au-dessus des autres unités.

Le livrable n° 18 montre que le contexte hydrostratigraphique 1 suivi du contexte 2 sont dominants dans la région d'étude. Les contextes 1 et 2 sont présents hors des vallées, alors que le contexte 1 se rencontre surtout dans les hauts topographiques à la périphérie desquels on retrouve le contexte 2. Ceci implique que ce n'est que l'aquifère rocheux régional qui est disponible pour l'approvisionnement en eau souterraine pour la majorité de la région d'étude. Toutefois, le contexte 3 est rencontré dans plusieurs des vallées de la région d'étude, notamment dans l'axe allant de l'ouest du lac Massawippi jusqu'au lac Aylmer dans la vallée de la rivière Saint-François ainsi que dans la vallée de la rivière Chaudière où ce contexte est particulièrement étendu latéralement. C'est le contexte 4 relié au potentiel aquifère du fluvioglacière qui est le moins étendu dans la région, mais on le trouve à plusieurs endroits où il n'y a que peu de potentiel aquifère dans le Quaternaire ancien, ce qui en fait une cible d'exploration en eau souterraine complémentaire. La section 6.1 donne plus de détails sur le potentiel aquifère dans les dépôts meubles alors que la section 3.3 précédente a décrit les conditions de confinement des trois principaux aquifères de la région d'étude et qui sont présentées dans les livrables n° 17A (roc, UH6), 17B (Quaternaire ancien, UH5) et 17C (fluvioglacière, UH4).

Conformément aux épaisseurs de dépôts meubles constituant des unités hydrogéologiques (section 3.2; livrables n°s 15A à 15F) et aux conditions de confinement (section 3.3; livrable n° 17A), le livrable n° 18 sur les contextes hydrostratigraphiques confirme bien que la région d'étude du PACES Estrie présente deux contextes hydrogéologiques distincts, soient les vallées et les hautes terres, comme pour le PACES Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015). Le contexte hydrogéologique des vallées se retrouve dans les secteurs à plus faible élévation où l'épaisseur des sédiments est supérieure à 10 m et où les dépôts meubles ont un bon potentiel aquifère (section 6.1). Le contexte hydrogéologique des hautes terres est présent lorsque l'épaisseur des dépôts est inférieure à 10 m et alors seulement le roc constitue un aquifère exploitable.

4 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

4.1 Propriétés hydrauliques

Dans la région d'étude du PACES Estrie, c'est le « roc fracturé » qui constitue un système aquifère continu à l'échelle régionale. Les formations superficielles ne constituent des aquifères que localement, notamment dans les vallées enfouies comblées par des accumulations de sédiments qui se trouvent souvent sous les cours d'eau actuels en Estrie (section 6.1; voir aussi le livrable n° 18). C'est aussi le roc fracturé qui est généralement exploité par les puits résidentiels. Toutefois, les puits municipaux exploitent couramment les aquifères dans les formations superficielles (section 6.1 ; voir aussi le tableau 6.6 à la section 6.4).

À l'échelle régionale, la conductivité hydraulique (K) du roc fracturé est le plus souvent dérivée par l'analyse statistique de données renseignant sur la transmissivité locale de l'aquifère rocheux (T) au niveau des puits. La transmissivité locale du roc, quant à elle, doit typiquement être estimée à partir de l'interprétation d'essais hydrauliques. Si les « essais de pompage conventionnels » de longue durée (ex. : 3 jours) et à débit constant fournissent des estimations précises de transmissivité. Ce type d'essai n'est toutefois pas retenu pour la caractérisation hydraulique du roc dans la zone d'étude, puisque ces essais sont trop peu nombreux dans les bases de données existantes. De plus, il serait impossible, en pratique, de réaliser un nombre suffisant d'essais de pompage de longue durée pour obtenir une bonne couverture de la région d'étude. C'est pourquoi les essais hydrauliques privilégiés sont plutôt les essais de capacité spécifique réalisés puis rapportés de façon routinière par les puisatiers. En effet, dans les bases de données hydrogéologiques publiques, tel que le Système d'information hydrogéologie (SIH) du MELCC (2022), on retrouve les données de milliers d'essais de capacité spécifique, contre seulement une centaine d'essais de pompage conventionnels. L'avantage lié à l'abondance et donc à la meilleure distribution spatiale des essais de capacité spécifique l'emporte sur l'inconvénient lié à la précision généralement inférieure de ces essais en termes d'estimation de T , puisqu'on souhaite caractériser la variabilité spatiale de la K par des moyens statistiques d'autant plus représentatifs que le nombre de données étudiées est grand.

L'estimation de la transmissivité à partir des données d'un essai de capacité spécifique (CS), notée $T(CS)$, a été faite en suivant la méthodologie développée par Laurencelle (2018). Cette méthode consiste à trouver T à partir de la solution de Papadopoulos et Cooper (1967) qui représente l'effet de l'emmagasinement dans le puits sur la réponse du puits lors du pompage. D'abord, les essais de capacité spécifique qui permettent une estimation quantitative de T sont identifiés. Par la suite, une simulation Monte Carlo est faite pour reproduire la distribution des transmissivités en fonction de la profondeur des puits à l'aide d'un modèle de milieu fracturé et en tenant compte du biais d'échantillonnage des puisatiers. En effet, la profondeur des forages n'est pas aléatoire et généralement les puits productifs sont peu profonds alors que les puits moins productifs ont tendance à être forés plus profondément pour atteindre une capacité souhaitable ou à tout le moins offrir un volume important d'emmagasinement d'eau dans le puits.

Pour la caractérisation hydraulique du système aquifère rocheux de la zone d'étude, une extraction ciblée du SIH a été faite afin d'obtenir les données sur un maximum d'essais de capacité spécifique réalisés dans le roc fracturé. Ainsi, 31 248 puits-essais ont pu être extraits du SIH, desquels seulement 17 604 (56 %) se sont avérés utilisables (voir annexe 4C). Une autre particularité du jeu de données hydrauliques de départ pour le PACES Estrie est que les essais de capacité réalisés par les puisatiers semblent mener très souvent à la quasi-vidange du puits pompé durant l'essai.

Le modèle Monte Carlo a été calé aux distributions statistiques du $\log T^*$ afin que les T simulées reproduisent au mieux les T^* observées d'un point de vue statistique, c'est-à-dire collectivement et non individuellement. La figure 4.1 présente les résultats de ces simulations Monte Carlo pour chacune des quatre zones géologiques de la région d'étude (le domaine externe des Appalaches n'est en fait présent qu'à la périphérie au nord-ouest de la région d'étude).

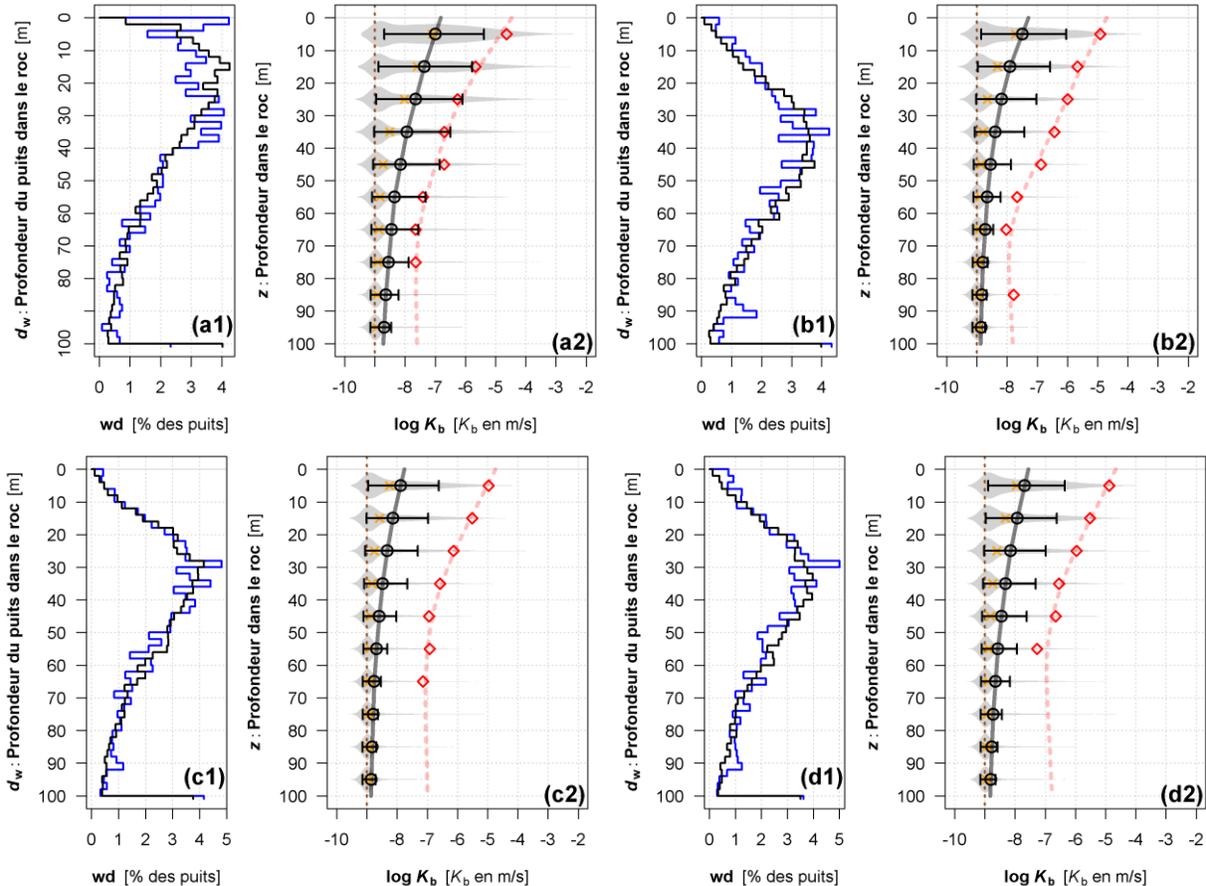


Figure 4.1 : Résultats des simulations Monte Carlo calées pour chacune des quatre zones géologiques du territoire à l'étude dans le PACES Estrie : (a) Appalaches domaine externe, (b) Appalaches domaine interne, (c) Appalaches domaine océanique et (d) Terrains siluro-dévonien

Dans la figure 4.1, les graphiques '1' présentent les profils observés (en bleu) et simulés (en noir) de la répartition de la profondeur des puits dans le roc. Les graphiques '2' montrent les statistiques sur le logarithme de la conductivité hydraulique équivalente du roc fracturé ($\log K_b$) dérivées pour chaque intervalle de profondeur dans le roc. Les surfaces grises illustrent les distributions complètes. Les ronds noirs et les moustaches les accompagnant indiquent la valeur moyenne et le pseudo-écart-type de $\log K_b$ pour chaque intervalle. Les losanges rouges montrent, enfin, les valeurs moyennes de $\log K_b$ que l'on obtiendrait en appliquant l'approche conventionnelle au lieu de la nouvelle approche par simulation Monte Carlo.

Les résultats présentés dans la figure 4.1 indiquent tout d'abord que 50 % des puits sont forés dans le roc à des profondeurs dépassant 30 à 40 m selon les zones. La fréquence relativement élevée des puits profonds souligne qu'il n'est pas rare qu'il soit nécessaire de forer au-delà de la partie supérieure du roc pour éventuellement obtenir un puits suffisamment productif. Ensuite, les graphiques '2' de la figure 4.1 révèlent que l'aquifère rocheux régional est en général peu perméable, avec des K_b moyennes de l'ordre de 10^{-7} m/s tout au plus. Toutefois, ces résultats

soulignent en même temps la très grande hétérogénéité hydraulique du roc fracturé, avec des valeurs de K_b s'étendant de $< 10^{-9}$ m/s jusqu'à $> 10^{-3}$ m/s, avec des probabilités d'occurrence largement supérieures pour les valeurs plus faibles de K_b . De plus, l'abondance de valeurs autour de 10^{-9} m/s informe sur le fait que la K du roc fracturé s'approche très souvent de la K de la matrice rocheuse à l'échelle locale d'un puits. La probabilité d'atteindre des fractures offrant une très bonne productivité en forant à travers le roc fracturé apparaît donc relativement faible en Estrie.

Par ailleurs, le tracé rouge présenté à des fins comparatives dans chacun des graphiques '2' de la figure 4.1 expose la grande différence entre les résultats obtenus par simulations Monte Carlo et ceux obtenus en suivant l'approche conventionnelle qui suppose que l'on peut calculer directement $K \approx T / d_w$ pour lier ensuite la valeur de K à la position verticale du centre de l'intervalle de profondeur du puits qui est ouvert au roc ($z \approx d_w / 2$). La comparaison critique des courbes rouges par rapport aux courbes noires met en évidence la forte surestimation de $\log K_b$ à laquelle mène l'approche conventionnelle et rappelle l'importance de tenir compte du biais dans le jeu de données de capacité spécifique (Laurencelle, 2018). C'est malheureusement l'approche conventionnelle qui a été utilisée jusqu'à maintenant dans les projets PACES, notamment ceux en Montérégie Est et en Chaudière-Appalaches. D'où l'intérêt de mettre en valeur la nouvelle approche par simulations Monte Carlo dans le PACES Estrie.

Les résultats de l'exercice de caractérisation hydraulique du roc fracturé mettent en évidence la faible productivité de l'aquifère rocheux régional de façon générale, même si exceptionnellement la productivité peut être plus élevée. Néanmoins, ces résultats soulignent également la grande variabilité des propriétés hydrauliques du roc et de la productivité à laquelle on peut s'attendre en y forant des puits. Des détails sur l'approche utilisée pour estimer la conductivité hydraulique du roc fracturé sont donnés à l'annexe 4C.

Dans le cadre des travaux de modélisation numérique de l'écoulement réalisés sur des coupes 2D (section 6.2), il s'est avéré que la conductivité hydraulique estimée avec la méthode décrite dans la présente section dans la région d'étude ne permettait pas la circulation de la recharge évaluée globalement à 200 mm/an. Ainsi, c'est plutôt une valeur maximale de conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-5} m/s qui a été utilisée plutôt que la valeur estimée ici de 10^{-7} m/s. En fait, le profil de la conductivité hydraulique en fonction de la profondeur $K(z)$ qui a été retenu pour les modélisations est très similaire à celui qui avait été dérivé dans le cadre du PACES Chaudière-Appalaches (figure 6.6), mais sans considérer l'effet du biais des foreurs. Ces valeurs de conductivité hydraulique du PACES Chaudière-Appalaches sont du même ordre que les valeurs obtenues des essais de pompage réalisés dans la région d'étude du PACES Estrie. Toutefois, les essais de pompage sont généralement réalisés uniquement dans les puits qui montrent un potentiel aquifère intéressant. Il subsiste donc une incertitude sur la conductivité hydraulique du roc sur la base des résultats plutôt contradictoires obtenus de l'estimation présentée dans la présente section et les valeurs retenues pour la modélisation numérique. Les travaux de maîtrise de Mathis (2023) donnent plus de détails sur l'estimation des propriétés hydrauliques à l'aide de la modélisation numérique en 2D et 3D.

4.2 Piézométrie et écoulement dans l'aquifère rocheux

Dans la région d'étude du PACES Estrie, 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 qui représenterait le livrable PACES n° 19. De plus, il y a peu de mesures du niveau d'eau souterraine disponibles dans les vallées où se trouvent ces aquifères car les puits résidentiels sont essentiellement des puits ouverts au roc. La carte du livrable n° 20 présente ainsi la piézométrie de l'aquifère rocheux régional dont les détails de la méthodologie de production sont documentés à l'annexe 4D. Les données sur le niveau d'eau souterraine mesuré dans les puits au roc ont été utilisées pour la production de la carte piézométrique. Ces données proviennent de sources au Québec (puits du SIH, puits du RSESQ, rapports de consultants) ainsi qu'aux États-Unis de la base de données du *Vermont Agency of Natural Resources* (GIS-Open Data). Les données du Vermont ont été intégrées afin de couvrir l'amont du bassin versant de la rivière Saint-François qui se situe aux États-Unis.

Les données collectées ont été nettoyées pour éliminer les doublons et ont ensuite été analysées. L'analyse statistique des mesures de profondeur de niveau d'eau a permis d'éliminer les données extrêmes qui ne semblent pas représentatives (annexe 4D). Ainsi, seules les mesures de niveau d'eau ayant une profondeur inférieure à 20 m ont été conservées pour produire l'interpolation de la surface piézométrique. Un variogramme omnidirectionnel a été ajusté au variogramme expérimental des données au Québec et la surface piézométrique a été interpolée par krigeage avec dérive externe sur la topographie. Cette approche s'est révélée efficace dans les régions d'étude avec de fortes variations topographiques et des points de contrôle limités sur les hauts topographiques (Carrier et al., 2013 ; Lefebvre et al., 2015 ; Huchet et al., 2017 ; Huchet, 2018).

Afin de corriger les erreurs d'interpolation où il y a absence de données, les données interpolées ont été corrigées afin de ramener l'élévation de la surface piézométrique au même niveau que l'élévation du sol aux endroits où la surface piézométrique était supérieure à la topographie. En fait, il est possible que la surface piézométrique se trouve au-dessus du sol; d'ailleurs McCormack (1979) avait observé plusieurs puits coulants dans la MRC du Val-Saint-François. Il a été décidé de faire tout de même cette correction étant donné l'incertitude verticale sur les données d'élévations.

L'usage de la topographie pour la dérive externe fait en sorte qu'on produit en fait une carte « hybride » représentant plutôt la surface libre, qu'elle soit dans le roc ou les dépôts meubles, plutôt qu'une surface potentiométrique pour le roc uniquement. Cette surface représente bien la piézométrie du roc en condition libre hors des vallées, mais elle représente plutôt la surface libre dans les dépôts meubles dans les vallées. En effet, sous les vallées enfouies on peut présumer que la charge hydraulique dans le roc est « artésienne » (au-dessus du niveau du sol), tel qu'observé localement par McCormack (1979). La carte ainsi produite permet toutefois de bien représenter l'écoulement régional de l'eau souterraine dans l'ensemble du système aquifère.

Tel qu'envisageable, la carte du livrable n° 20 montre la piézométrie de l'aquifère rocheux comme une version adoucie de la topographie régionale (livrable n° 3). On y constate la convergence de l'écoulement, tant à partir du nord-ouest que du sud-est, à partir des hauts topographiques vers la grande vallée orientée du sud-ouest vers le nord-est et allant de la frontière avec les États-Unis dans la vallée de la rivière Tomifobia jusqu'au nord du lac Aylmer, en passant par le lac et la rivière Massawippi ainsi que la vallée de la rivière Saint-François. Le même écoulement convergeant est présent dans la partie amont de la rivière Chaudière, mais avec un gradient hydraulique horizontal (dénivelé) moins important. Dans l'axe orienté vers le nord-ouest de la vallée de la rivière Saint-François, entre Lennoxville et Richmond, l'écoulement converge aussi vers la vallée mais avec un gradient hydraulique horizontal (dénivelé) encore moins important.

4.3 Bilan hydrologique et recharge

Le livrable n° 27 comprend l'établissement d'un bilan hydrologique, incluant l'estimation de la recharge, ainsi que la cartographie des zones de recharge et de résurgence de l'eau souterraine à l'échelle de la région d'étude. Encore une fois, c'est uniquement l'aquifère rocheux régional qui a fait l'objet de ces travaux parce que les aquifères granulaires n'ont pas d'extension régionale. L'approche utilisée pour produire un bilan hydrologique est d'abord expliquée dans la section 4.3.1. Ensuite, la production de la carte du livrable n° 27A qui montre la distribution spatiale de la recharge est décrite dans la section 4.3.2. La carte du livrable n° 27B montrant les zones de recharge et de résurgence sera discutée à la prochaine section 4.4.

Le bilan hydrologique implique l'estimation des composantes du cycle de l'eau qui déterminent comment se fait la répartition des précipitations entre 1) l'évapotranspiration qui retourne l'eau dans l'atmosphère via l'évaporation de l'eau et la transpiration des plantes, 2) le ruissellement de l'eau à la surface du sol qui apporte l'eau directement aux cours d'eau, et 3) l'infiltration de l'eau dans le sol qui contribue à la recharge des nappes et dont l'écoulement va éventuellement émerger aussi dans les cours d'eau. Dans les études hydrogéologiques, l'établissement du bilan hydrologique vise surtout à faire l'estimation de la recharge qui est une partie importante de l'évaluation des ressources en eau souterraine. En effet, les débits exploitables de façon durable dépendent grandement du renouvellement annuel de l'eau souterraine par la recharge.

Toutefois, la quantité d'eau qui s'infiltré 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.

L'approche de Jyrkama et al. (2002) 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 en les comparant aux débits de base d'un sous-bassin versant. Cette approche a aussi été utilisée par Paradis et al. (2016) à l'Île-du-Prince-Édouard pour évaluer l'effet des changements climatiques sur la recharge. Cette même approche a été utilisée dans le cadre des projets PACES réalisés antérieurement par l'INRS en Montérégie Est (Carrier et al., 2013) ainsi qu'en Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015). Plus récemment, dans le cadre d'une collaboration de l'INRS au projet RADEAU 2, une estimation de la recharge avec HELP a été faite pour la région des Laurentides et Laval (Raynauld et al., 2018). Ces derniers travaux ont mené au développement d'un outil nommé pyHELP qui facilite l'application de HELP (Gosselin et al., 2020). Cet outil a aussi été appliqué dans le cadre du PACES Estrie pour faire l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux (section 4.3.2).

L'estimation de la recharge avec HELP exige une calibration des résultats à l'aide des débits totaux et des débits de base de bassins hydrologiques jaugés par des stations hydrométriques. L'exploitation des données de débit des cours d'eau permet aussi de définir un bilan hydrologique global à l'échelle des bassins versants. Ainsi, la prochaine section décrit l'approche utilisée pour évaluer les bilans hydrologiques de bassins dans la région d'étude avant de décrire les résultats de l'estimation de la recharge avec HELP.

4.3.1 Bilan hydrologique global

Les travaux sur l'estimation des bilans hydrologiques ont été réalisés dans le cadre de la maîtrise de Raphaël Mathis et plus de détails se trouvent dans son mémoire (Mathis, 2023). À l'échelle de bassins versants, un bilan hydrologique comprend les composantes suivantes (Healy, 2010) :

$$P = ET + RS + RH + R + \Delta RAS$$

Où P représente les précipitations, ET l'évapotranspiration, RS le ruissellement de surface, RH le ruissellement hypodermique, R la recharge et ΔRAS la variation de stockage de l'eau dans le sol. Ainsi, pour établir le bilan, il faut estimer les précipitations moyennes, le ruissellement de surface et hypodermique, la recharge et l'évapotranspiration. Toutes ces composantes sont définies en termes de lame d'eau équivalente annuelle qui représente le volume d'eau annuel de chaque composante divisé par l'aire du bassin versant jaugé (mm/an). La variation de stockage de l'eau peut être négligée lorsqu'on considère une longue période.

L'estimation du bilan hydrologique, incluant la recharge, a été faite avec les données de débit de cours d'eau de quatre stations de jaugeage dans la région d'étude. Les précipitations moyennes ont été estimées sur la base de travaux qui ont défini des contextes hydroclimatiques à partir de normales climatiques sur l'ensemble du sud du Québec (Huchet et al., 2021). Ces normales climatiques représentent notamment la moyenne de précipitation annuelle de 1981 à 2010. L'évapotranspiration a été estimée en soustrayant la moyenne du débit total annuel convertie en lame d'eau équivalente de la précipitation. Les composantes de ruissellement de surface et hypodermique ont été estimées en effectuant la somme des débits des stations de jaugeage pour chaque année afin d'en faire une moyenne. En divisant cette moyenne par l'aire du bassin-versant et en retirant la recharge estimée séparément, la composante annuelle du ruissellement de surface et hypodermique a été estimée. Enfin, la recharge a été estimée à l'aide de deux méthodes. La première méthode est la séparation d'hydrogramme avec l'application de filtres qui permet de séparer le débit de base et le ruissellement direct, ce qui permet d'estimer une valeur d'infiltration annuelle représentant la recharge et le ruissellement hypodermique. La seconde méthode est basée sur le débit d'étiage représentant le débit minimal d'un cours d'eau au cours de l'année, ce qui donne une estimation de la recharge minimale (Rivard et al., 2014).

Les données de débit des stations de jaugeage ont été prises sur le site du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2018; MELCC, 2021b). Quatre stations de jaugeage ont été sélectionnées, soit les stations 023403, 030204, 030215 et 030284 qui respectaient les critères suivants : bassin versant suffisamment vaste, grande couverture temporelle de données, bonne continuité dans les données, et proximité des coupes de la modélisation 2D (section 6.2). La première station est dans le bassin versant de la rivière Chaudière et les trois autres dans le bassin versant de la rivière Saint-François. La figure 4.2 présente l'emplacement des stations de jaugeage ainsi que leur bassin versant par rapport aux positions des coupes considérées pour les travaux de modélisation 2D (section 6.2).

Les hydrogrammes représentent le débit d'un cours d'eau en fonction du temps qui peut être divisé en deux composantes, soit le ruissellement direct et le débit de base. Le débit de base représente l'apport des écoulements souterrains aux cours d'eau, incluant le ruissellement hypodermique dans les sols et l'écoulement plus profond qui correspond à la recharge. La séparation d'hydrogramme de cours d'eau repose sur l'hypothèse que le ruissellement direct a un temps de réponse plus rapide que le débit de base (Ancil et al., 2012). Une fois le débit de base séparé, la recharge annuelle est estimée à l'aide de l'aire du bassin versant. Cependant, puisque le débit de base représente à la fois l'apport du ruissellement hypodermique et de la recharge, la valeur estimée de la recharge sera surestimée. Ainsi, l'utilisation du terme « infiltration » est plus appropriée quant à la valeur obtenue du débit de base (Rivard et al., 2014).

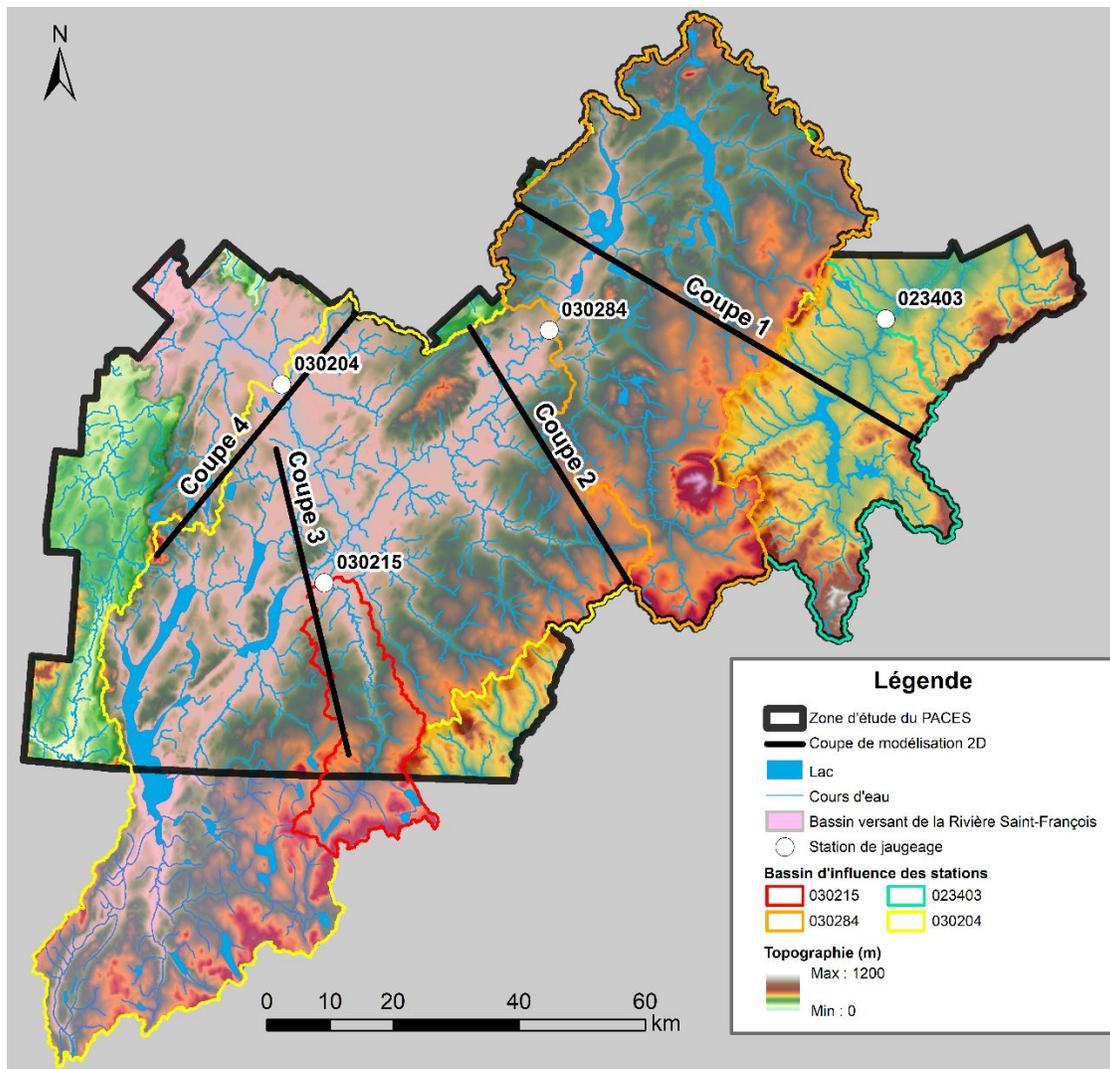


Figure 4.2 : Stations de jaugeage utilisées pour l'estimation des bilans hydrologiques

La séparation d'hydrogramme a été réalisée avec le logiciel ESPERE qui est intégré dans une feuille de calcul Excel (Lanini et al., 2016). ESPERE permet d'appliquer trois filtres sur les hydrogrammes de cours d'eau, soient les filtres de Wallingford (Gustard et al., 1992), de Chapman et Maxwell (1996) et d'Eckhardt (2005). Les données entrées dans le simulateur ESPERE sont les débits journaliers de cours d'eau ainsi que la superficie du bassin versant associée à la station de jaugeage. Deux approches d'estimation ont été utilisées : 1) l'application de trois filtres sur les hydrogrammes de cours d'eau, et 2) l'application de l'un de ces filtres, soit celui qui semble le plus réaliste, pour les mois de juin à octobre où le débit est plus faible et d'étendre la moyenne obtenue sur toute l'année. Ainsi, la surestimation du débit de base lors des crues printanières est évitée. Cette approche réduit le débit provenant du ruissellement hypodermique lors du calcul du débit de base, permettant une estimation plus réaliste de la recharge (Rivard et al., 2014).

Le débit d'étiage représente le débit minimal d'un cours d'eau et il est souvent observé vers la fin de l'été lorsque les précipitations se font plus rares et que les températures élevées favorisent l'évapotranspiration, minimisant ainsi la recharge. En ayant très peu de précipitation durant une longue période, les apports d'eau dans les cours d'eau provenant des ruissellements de surface et hypodermique sont presque nuls. Ainsi, le débit de cours d'eau est uniquement associé à l'apport des écoulements souterrains. Cependant, la recharge sera probablement sous-estimée

puisque l'apport des écoulements souterrains aux cours d'eau est également à son plus bas durant les périodes d'étiage (Rivard et al., 2014). Deux approches d'estimation ont été utilisées avec cette méthode : 1) le calcul de percentiles des débits de chaque bassin versant pour le mois d'août, que l'on considère avec le moins de ruissellement, 2) le 7-jours faible débit (« river 7-day low-flows ») qui est la valeur minimale de la moyenne du débit sur sept jours consécutifs chaque année et ensuite d'en faire une moyenne des valeurs minimales annuelles.

Le tableau 4.1 présente le bilan hydrologique obtenu en considérant l'estimation de la méthode du filtre de Chapman de juin à octobre comme étant représentative de la recharge. Les résultats obtenus pour les quatre stations sont très cohérents. Les précipitations varient entre 1142 et 1192 mm/an, l'évapotranspiration est la composante la plus importante du bilan avec de 470 à 559 mm/an (40 à 48% des précipitations), suivi du ruissellement allant de 410 à 485 mm/an (35 à 41% des précipitations), et enfin la recharge est entre 176 et 229 mm/an (15 à 20% des précipitations).

Tableau 4.1 : Bilan hydrologique obtenu pour les quatre stations de jaugeage

Station de jaugeage	023403	030204	030215	030284
Superficie du bassin (km ²)	1170	8670	514	2934
Précipitation moyenne (mm/an)	1168	1161	1142	1192
Moyenne du débit annuel (Mm ³ /an)	816	5216	309	2076
Moyenne du débit annuel (mm/an)	698	602	602	708
Précipitation (mm/an)	1168	1161	1142	1192
Évapotranspiration (mm/an)	470	559	540	484
Ruissellement (mm/an)	469	410	425	485
Recharge (mm/an)	229	192	176	223
Précipitation (%)	100%	100%	100%	100%
Évapotranspiration (%)	40%	48%	47%	41%
Ruissellement (%)	40%	35%	37%	41%
Recharge (%)	20%	17%	15%	19%

La recharge obtenue du filtre de Chapman de juin à octobre est donc de l'ordre de 200 mm/an, alors que le filtre de Chapman annuel donne une valeur de l'ordre de 300 mm/an qui représente l'infiltration totale, incluant le ruissellement hypodermique. Finalement, le débit d'étiage est plutôt de l'ordre de 100 mm/an. L'intervalle de recharge possible reste donc assez large, mais le bilan hydrologique permet tout de même d'établir des bornes maximales et minimales de recharge à l'échelle régionale. L'estimation de la distribution spatiale de la recharge avec HELP permettra de préciser le bilan ainsi que la variabilité de la recharge dans la région d'étude.

4.3.2 Recharge spatialement distribuée

Le logiciel HELP (*Hydrological Evaluation of Landfill Performance*) (Schroeder et al., 1994) a été utilisé pour estimer la recharge spatialement distribuée dans l'aquifère rocheux régional. Ce modèle d'infiltration a des fondements physiques et permet d'utiliser des données climatiques réelles ainsi que des propriétés physiques des matériaux. HELP fait l'estimation quotidienne des composantes du bilan hydrologique qui ont été définies à la section précédente. HELP considère le ruissellement de surface, la fonte de la neige, l'infiltration dans le sol, la croissance de la végétation, l'évapotranspiration, l'emménagement d'eau dans le sol ainsi que le ruissellement hypodermique sous la surface du sol.

Suivant l'approche développée par Croteau et al. (2010) pour l'application de HELP à l'échelle régionale, un outil nommé pyHELP a été développé pour faciliter cet usage (Gosselin et al., 2020). L'outil pyHELP aide notamment à la construction des fichiers d'entrées, permet de définir des zones à l'intérieur du domaine global, facilite la modification de paramètres lors de la calibration des résultats et produit automatiquement une série de graphiques illustrant le processus de calibration ainsi que les composantes du bilan hydrologique (annuelles, mensuelles et globales).

En plus de l'outil pyHELP, dans le cadre du PACES Estrie des scripts Matlab ont été développés afin de convertir des cartes de base en paramètres requis pour les simulations HELP. C'est notamment le cas pour l'exploitation de la carte d'utilisation du sol pour obtenir des paramètres contrôlant l'évapotranspiration et le ruissellement. Ces scripts tiennent aussi compte des données disponibles au Québec ainsi qu'aux États-Unis pour une portion au sud en amont du bassin de la rivière Saint-François. Ces scripts facilitent la modification des paramètres lors de la calibration de HELP avec les données des stations de jaugeage (section 4.3.1). Ces scripts pourraient aussi permettre un certain niveau d'automatisation de la production des paramètres de HELP lors de son éventuelle application à d'autres régions du Québec. La présente section résume les travaux réalisés avec HELP alors que les détails sont documentés à l'annexe 4E.

Des données sur plusieurs paramètres sont requises pour réaliser les simulations HELP. Ces paramètres doivent être définis sur chacune des mailles d'une grille couvrant la région visée. Pour le PACES Estrie, la taille des mailles était de 250 m par 250 m, comme pour nos travaux antérieurs au Québec (Croteau et al., 2010; Carrier et al., 2013; Lefebvre et al., 2015; Raynauld et al., 2018). Le tableau 4.2 résume les paramètres requis, la sources des données utilisées, et le traitement fait sur les données pour obtenir les paramètres. D'autres paramètres ont été dérivés indirectement des paramètres indiqués au tableau 4.2. C'est notamment le cas du nombre de courbe (*Curve Number*) et du groupe hydrologique. Afin de les intégrer, les données disponibles aux États-Unis ont parfois fait l'objet d'un traitement différent qui est décrit à l'annexe 4E.

Tableau 4.2 : Résumé des données utilisées pour les simulations HELP (détails sur les données au Québec et aux États-Unis et de leur traitement à l'annexe 4E)

Paramètre	Source	Traitement
Température et précipitations	Grille Info-Climat 1980-2021 (Bergeron, 2016; MELCC, 2018b)	Assignation des mailles à un élément de la grille météo
Radiation solaire	HELP (généralisé à l'interne)	Aucun
Pente du sol	Livraison n° 4	Aucun
Occupation du sol	Livraison n° 7	Simplification
Pédologie	Livraison n° 11	Textures utilisées
Dépôts meubles	Modèle géologique 3D Livraisons n° 15 (A B C D E F)	Aucun
Piézométrie	Livraison n° 20	Aucun
Indice de surface foliaire	RNCAN	Facteur de réduction
Humidité relative	Climate Data Store (UE)	Valeurs trimestrielles
Période de croissance	Atlas agroclimatique du Québec (AgCan, 2016)	Aucun

Dans HELP, les couches de matériaux peuvent avoir trois fonctions : 1) permettre la percolation verticale (infiltration), 2) permettre le drainage latéral (ruissellement hypodermique), ou 3) constituer une barrière à l'infiltration. Les couches de type 2 permettant le drainage latéral doivent reposer sur une couche de type 3, mais l'infiltration peut se faire à travers une couche de type 3.

La figure 4.3 montre un modèle conceptuel des couches de matériaux pouvant être retrouvées dans la région d'étude et de leur fonction dans HELP. En fait, selon les unités hydrogéologiques présentes à un endroit donné, le modèle conceptuel sera différent dans chaque cellule de la grille utilisée pour l'estimation de la recharge.

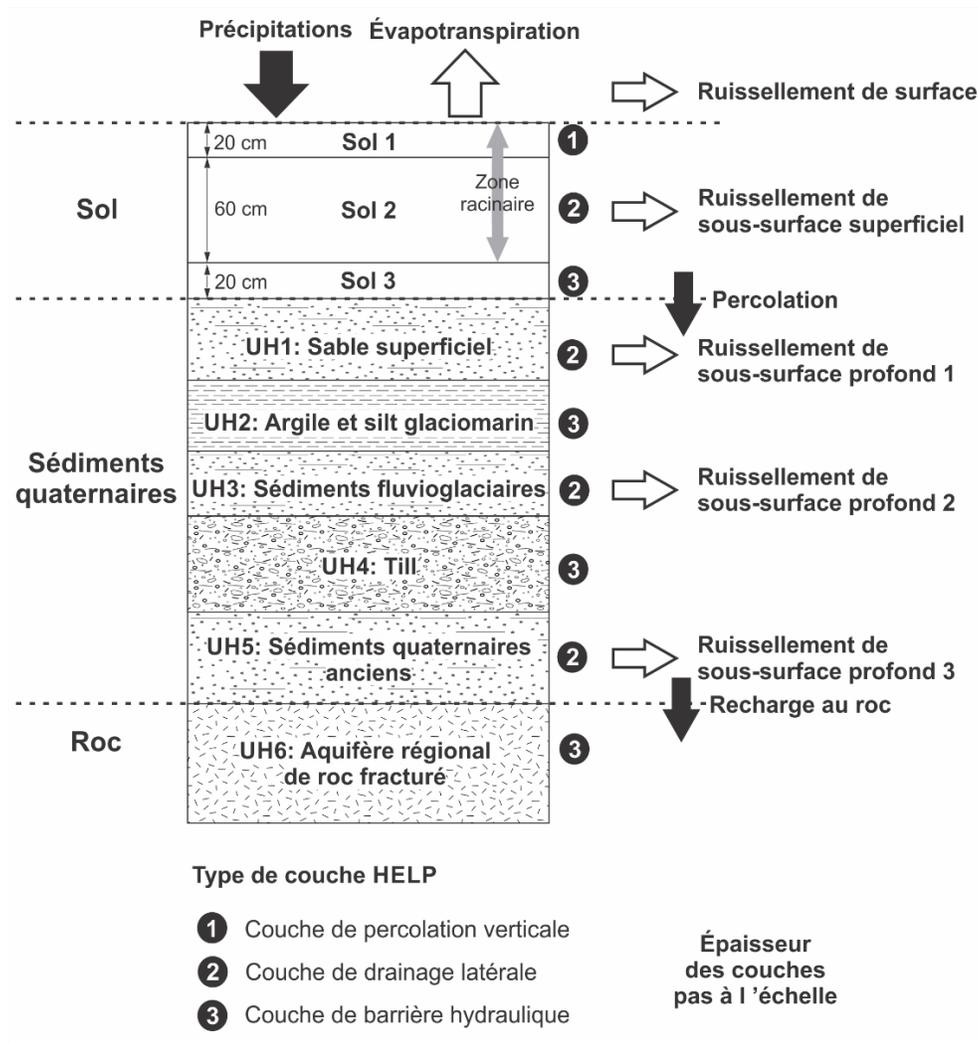


Figure 4.3 : Modèle conceptuel HELP « complet » des couches de matériaux pouvant être retrouvées dans la région d'étude

Tel que montré à la figure 4.3, le sol est toujours représenté par trois couches dont l'épaisseur totale est fixée à 1 m. Lorsque le roc est affleurant, il n'y a pas de sol. Les propriétés de ces couches vont exercer un contrôle sur l'évapotranspiration, le ruissellement en surface, le ruissellement hypodermique superficiel et l'infiltration totale d'une partie des précipitations. Les propriétés hydrauliques des couches de sols sont fixes et sont assignées aux sols en fonction de leur classe de texture USDA (*US Department of Agriculture*). Les textures ont été définies à partir des données de l'IRDA pour le territoire du Québec et des données de l'USDA pour le territoire américain (USDA, 2021). La méthodologie utilisée pour déterminer les textures est décrite à l'annexe 4E. Les épaisseurs des autres couches de dépôts meubles sont variées en fonction du modèle géologique 3D (section 3.2) et leurs propriétés hydrauliques initiales peuvent être modifiées lors du processus de calibration de la recharge (détails à l'annexe 4E).

Pour les cellules de la grille HELP qui tombent dans une étendue d'eau, il n'y a pas de simulation HELP mais l'évaporation d'eau est calculée et ajoutée au bilan. De même, la recharge n'est pas estimée pour les cellules en bordure d'un cours d'eau car on présume que l'eau souterraine est alors en émergence. Pour ces cellules, la recharge est tout de même simulée dans HELP mais sa valeur est assignée au ruissellement hypodermique superficiel ou profond dépendamment des conditions de confinement de l'aquifère rocheux à cet endroit (détails à l'annexe 4E).

La calibration des résultats obtenus de HELP pour l'évapotranspiration et l'infiltration totale à l'intérieur de sous-bassins versants se fait en comparant respectivement leurs valeurs totales aux débits totaux et débits de base de stations de jaugeage de ces mêmes sous-bassins (Croteau et al., 2010). Le débit total annuel des cours d'eau est directement obtenu des stations de jaugeage alors que le débit de base total annuel a été estimé par la séparation des hydrogrammes des débits à l'aide du logiciel ESPERE qui est intégré dans une feuille de calcul Excel (Lanini et al., 2016). Ces deux débits sont transformés en lame d'eau équivalente (mm/an) en les divisant par la surface du bassin en amont de la station de jaugeage.

Le tableau 4.3 montre que plusieurs stations dans la région d'étude ont été utilisées pour la calibration. Ces stations sont ordonnées en fonction de la localisation relative des bassins en allant de l'ouest vers l'est. En fait, pour le bassin de la rivière Saint-François, le sous-bassin de la station du barrage Jules-Allard (030225) est compris dans le sous-bassin de la station du barrage Aylmer (030278) qui est lui-même inclus dans le sous-bassin de la station de la centrale Weedon (030284). Les aires de ces bassins sont montrées sur le livrable n° 26. Sauf pour les sous-bassins de Coaticook (030215) et de Massawippi (030220) où l'agriculture est importante, un couvert forestier domine dans les autres sous-bassins. De plus, les trois sous-bassins de la rivière Saint-François englobent les grands lacs Aylmer et Saint-François. Les sous-bassins des stations Au Saumon (030282) et Eaton (030234) sont aussi compris dans le bassin de la rivière Saint-François.

Tableau 4.3 : Stations de jaugeage utilisées pour la calibration de HELP (MELCC, 2021b)

Numéro de la station	Nom de la station	Superficie du bassin (km ²)	Régime d'écoulement	Périodes d'activité de la station
023427	Chaudière	783	Influence mensuelle	19 février 1976 – aujourd'hui
030225	Saint-François / Barrage Jules-Allard	1219	Influencé	1 ^{er} janvier 1968 – aujourd'hui
030278	Saint-François / Barrage Aylmer	1720	Influence mensuelle	10 décembre 1977 – aujourd'hui
030284	Saint-François / Centrale Weedon	2938	Influence mensuelle	20 mars 1979 – aujourd'hui
030282	Au Saumon	736	Naturel	27 novembre 1974 – aujourd'hui
030234	Eaton	647	Naturel	1 ^{er} avril 1954 – aujourd'hui
030215	Coaticook	525	Influence quotidienne	24 juillet 1959 – aujourd'hui
030220	Massawippi	612	Influence mensuelle	6 août 1952 – aujourd'hui

Même si les débits de plusieurs sous-bassins sont influencés par des barrages, et qu'ils peuvent être perturbés saisonnièrement, la supposition a été faite que les débits annuels totaux et de base sont représentatifs des conditions naturelles. Ce sont ces débits annuels qui sont utilisés pour la calibration de la recharge avec HELP et non les débits saisonniers.

La première étape de la calibration de HELP implique le calage du débit total annuel qui représente en fait l'effet de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui explique la différence entre les précipitations totales annuelles et le débit total annuel sur le bassin versant. Cette étape de calibration implique surtout la modification de la profondeur racinaire qui influence fortement l'ETR. La température de fonte de la neige peut aussi avoir un effet sur l'ETR. En fait, pour la région d'étude, aucune modification n'a été faite pour caler l'ETR car l'ajustement des débits totaux simulés aux débits mesurés était déjà jugé satisfaisant avec les paramètres initiaux pour les grands sous-bassins à l'est de la région à l'intérieur du bassin de la rivière Saint-François (Weedon et les sous-bassins inclus ainsi qu'au Saumon). L'ajustement était moins bon pour les autres sous-bassins mais des essais de modification de la profondeur racinaire ont montré que les résultats étaient très peu sensibles à ces changements.

La deuxième étape de la calibration s'applique au débit de base qui est relié à l'effet du ruissellement de surface qui va faire cheminer directement aux cours d'eau une proportion des précipitations qui n'a pas été sujette à l'ETR. Cette calibration est surtout contrôlée par la modification du nombre de courbe (*curve number*, CN) qui va induire plus ou moins de ruissellement pour les mêmes conditions de précipitations. L'utilisation d'une valeur correspondant à 120% du CN initial permettait d'approcher le débit de base observé pour plusieurs sous-bassins boisés à l'est du bassin de la rivière Saint-François (Jules-Allard, Aylmer, Weedon, Au Saumon, Eaton). Pour les sous-bassins plus agricoles de Massawippi et Coaticook, une valeur de 118% du CN donnait un ajustement satisfaisant. Cette valeur a aussi été appliquée au reste du bassin de la rivière Saint-François où l'utilisation du territoire est similaire. Enfin, un ajustement a été fait en modifiant le CN de 127% pour le bassin de la Chaudière (023427).

Après les deux premières étapes de calibration, les grandes composantes hydrologiques de l'ETR et du ruissellement de surface ont été fixées. Le reste de l'eau représente donc l'infiltration totale sous la surface du sol. Ainsi, la troisième étape de calibration implique plutôt un jugement professionnel par rapport à la représentation adéquate du processus de recharge. Notamment, est-ce que les périodes de recharge se retrouvent bien au printemps et à l'automne et est-ce que la présence d'épaisses couches de sédiments va induire du ruissellement hypodermique, surtout si ces sédiments sont peu perméables. Ainsi, cette étape de calibration a impliqué une réduction de la conductivité hydraulique du till par un facteur de 25.

En fait, la calibration implique aussi une certaine itération entre les étapes puisque l'effet de la modification des paramètres à une étape peut influencer les autres composantes du bilan hydrologique. De plus, à chacune des étapes, un processus d'analyse de sensibilité est réalisé en modifiant les principaux paramètres vers le bas et vers le haut afin d'évaluer si ces paramètres ont des effets relativement importants. Le tableau 4.4 résume les erreurs sur les débits totaux et les débits de base pour les sous-bassins versant dont les stations de jaugeage ont été utilisées pour la calibration de la recharge. La figure 4.4 donne deux exemples des graphiques utilisés pour la calibration de chaque bassin jaugé, soit un sous-bassin de la rivière Chaudière (023427) et le plus grand sous-bassin de la rivière Saint-François (Centrale Weedon, 030284). Les détails de la procédure de calibration avec les graphiques obtenus pour toutes les simulations réalisées avec différents paramètres sont présentés à l'annexe 4E.

Tableau 4.4 : Qualité de calibration des débits des stations de jaugeage : racine de l'erreur quadratique moyenne (*root mean square error*, RMSE) et erreur moyenne (*mean error*, ME)

Numéro de la station	Nom de la station	Débit total (mm/an)		Débit de base (mm/an)	
		RMSE	ME	RMSE	ME
023427	Chaudière	174,3	162,3	42,1	-5,0
030225	Saint-François / Barrage Jules-Allard	97,8	35,1	59,4	20,6
030278	Saint-François / Barrage Aylmer	72,4	3,5	52,4	-0,7
030284	Saint-François / Centrale Weedon	72,9	48,1	45,4	7,3
030282	Au Saumon	112,0	74,3	69,2	53,5
030234	Eaton	126,3	102,3	64,0	49,3
030215	Coaticook	139,7	123,0	75,7	-65,8
030220	Massawippi	159,1	149,2	41,3	-12,8

Le tableau 4.4 montre les statistiques de la calibration pour les bassins. Pour le débit total, donc de l'estimation de l'ETR, l'ajustement est meilleur pour les bassins à l'est du grand bassin de la rivière Saint-François où on trouve de grands lacs (exemple à la figure 4.4A). Il n'a pas été possible d'obtenir des ajustements aussi satisfaisant pour les autres sous-bassins (exemple à la figure 4.4B). Au niveau du débit de base qui représente l'infiltration totale et la recharge, l'ajustement est jugé satisfaisant. Les graphiques aux figures 4.4C et 4.4D montrent que la variation interannuelle du débit de base est aussi très bien représentée. Ainsi, à la suite des étapes de calibration, le bilan hydrologique global tel que représenté par les débits annuels totaux et de base est bien respecté dans l'ensemble des bassins jaugeés. Ces bassins couvrent une grande partie de la région d'étude ainsi que les différentes conditions qu'on y retrouve, ce qui devrait faire en sorte que la recharge estimée avec HELP soit représentative pour l'ensemble de la région d'étude.

La figure 4.5A illustre graphiquement ces variations des composantes annuelles du bilan hydrologique. On note que la variabilité des précipitations annuelles qui vont d'environ 1000 à 1400 mm/an induit des variations importantes des composantes du bilan hydrologique annuel, particulièrement le ruissellement et la recharge, tandis que l'ETR et les ruissellements hypodermiques changent relativement peu d'une année à l'autre.

La figure 4.5B montre la variation des moyennes mensuelles des composantes du bilan hydrologique. On note que les précipitations sont moins importantes de janvier à avril par rapport aux autres mois de l'année. Au printemps, c'est le ruissellement qui domine lors de la fonte du couvert de neige, alors que l'évapotranspiration est plus importante de mai à septembre. L'infiltration et la recharge sont plus importantes au printemps et à l'automne. Le ruissellement hypodermique superficiel et profond sont plus réguliers et moins importants que les autres composantes hydrologiques.

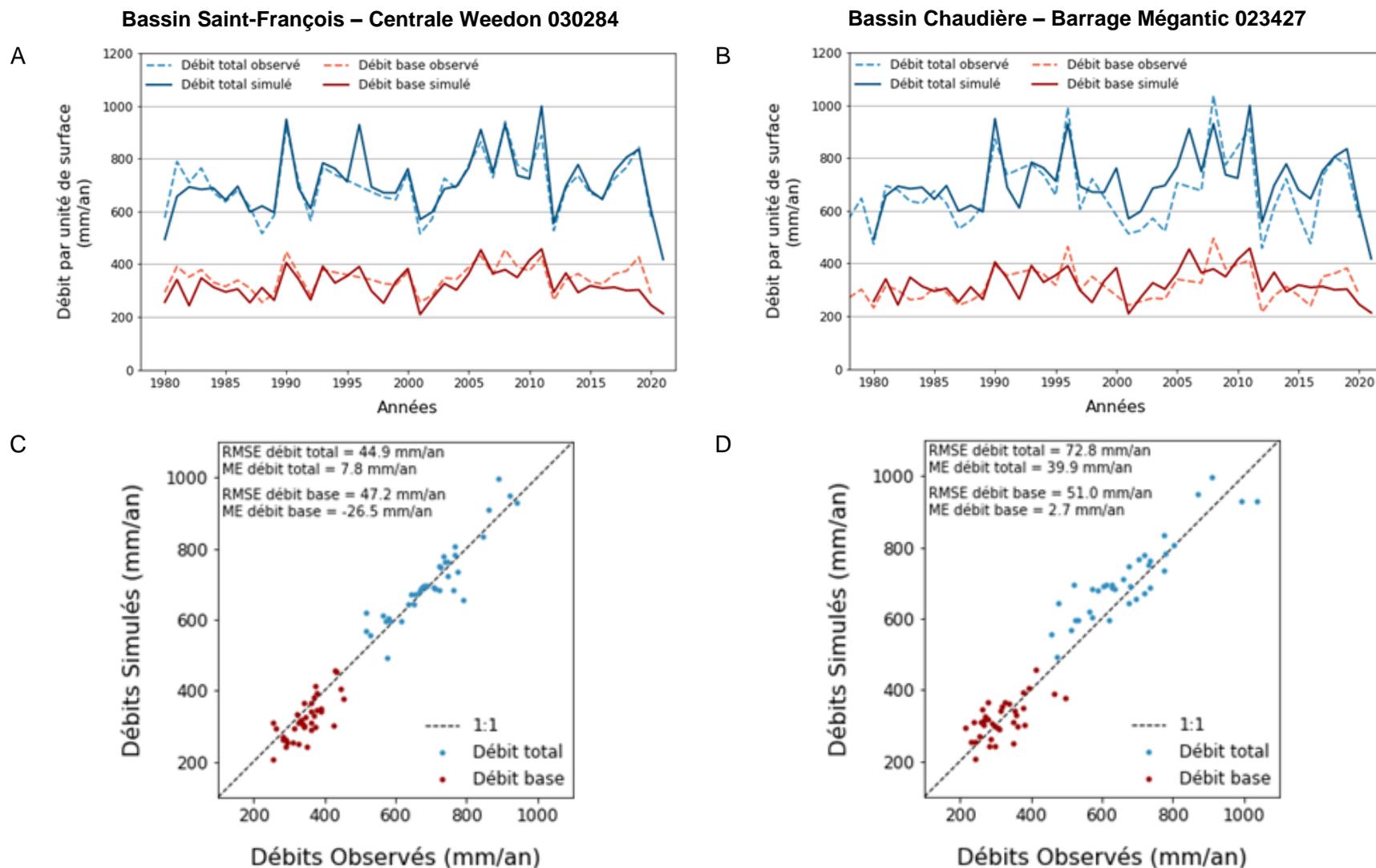


Figure 4.4 : Exemples de calibration des débits annuels totaux (bleu) et de base (rouge) mesurés et simulés pour les stations 030284 et 023427 : A et B) variation des débits entre 1980 et 2021; C et D) corrélation entre les débits avec les valeurs des erreurs

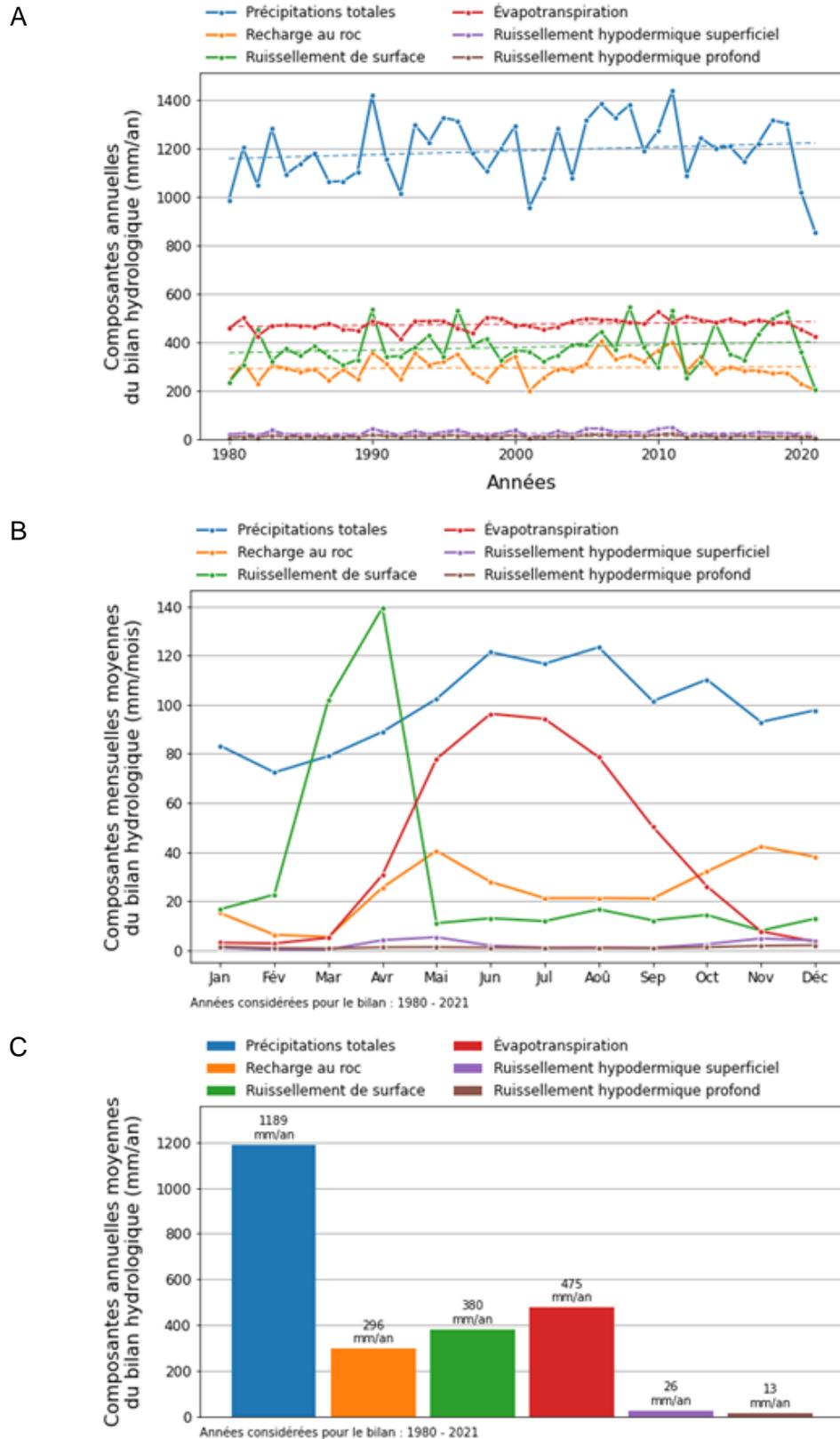


Figure 4.5 : Composantes moyennes du bilan hydrologique pour la région d'étude : A) annuelles, B) mensuelles, et C) globales

La figure 4.5C illustre les valeurs moyennes annuelles des composantes du bilan hydrologique pour toute la région d'étude. Les précipitations moyenne de 1189 mm/an représentent la composante principale et l'intrant du bilan hydrologique. Les précipitations se répartissent dans les autres composantes hydrologiques : l'évapotranspiration réelle (475 mm/an; 39,9%) domine le devenir des précipitations, suivie du ruissellement de surface (380 mm/an; 32,0%), de la recharge (296 mm/an; 24,9%) et du ruissellement hypodermique superficiel (26 mm/an; 2,21%) et profond (13 mm/an; 1,1%).

Par rapport au bilan hydrologique établi uniquement sur la base des données hydrologiques (section 4.3.1, tableau 4.1), les précipitations sont du même ordre à près de 1200 mm/an. Toutefois, l'ETR est un peu moindre (40% vs 40 à 48%) et nous avons vu qu'effectivement les résultats obtenus de HELP surestimaient les débits totaux pour certains bassins (donc sous-estimaient l'ETR). Enfin, le ruissellement de surface est un peu moindre (33% vs 35 à 41%) et la recharge est donc un peu plus élevée (23% vs 15 à 20%), ce qui est attendu puisque la calibration de HELP se fait à partir de tout le débit de base annuel alors que le bilan hydrologique a été établi en considérant le débit de base plus faible des mois de juin à octobre. De plus, le ruissellement hypodermique relativement faible diminue peu la recharge au roc par rapport à l'infiltration totale correspondant au débit de base.

Les résultats obtenus pour le PACES Estrie ont aussi été comparés à ceux obtenus pour les PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013) et Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015) qui ont aussi couvert en partie un contexte appalachien. Relativement aux précipitations, la proportion des débits de base correspondant à l'infiltration totale est du même ordre pour tous ces projets, mais la grande différence dans les résultats se trouve dans la représentation du ruissellement hypodermique. Ainsi, alors que nos travaux estiment le ruissellement hypodermique peu important, c'était une composante majeure des bilans hydrologiques des PACES antérieurs. Durant le processus de calibration, l'application d'une conductivité hydraulique du till plus faible menait effectivement à un ruissellement hypodermique plus important, mais cela causait aussi la perte de la saisonnalité de la recharge au printemps et à l'automne. Puisque les hydrogrammes de puits dans la région indiquent bien que cette saisonnalité est présente, le choix a été fait de ne pas utiliser des paramètres menant à de plus forts ruissellements hypodermiques. Nous pouvons faire l'hypothèse que le fait que la recharge en Estrie domine dans les secteurs où le roc est affleurant ou a un faible couvert de till ne permet pas de générer des ruissellements hypodermiques significatifs et qu'ainsi l'infiltration totale atteint le roc pratiquement au complet. La plausibilité de la recharge au roc estimée dans le cadre du PACES Estrie a été démontrée par la modélisation numérique 3D du système aquifère régional réalisée par Mathis (2023).

Le livrable n° 27A montre la distribution spatiale de la recharge de l'aquifère rocheux estimée avec HELP. On constate que les hauts topographiques où l'aquifère est en conditions libres ont des valeurs de recharge généralement plus importantes (dépassant 350 mm/an), alors que dans les vallées où l'aquifère est en conditions captives on observe des valeurs de recharge inférieures à 100 mm/an. Les secteurs avec de plus fortes recharges excédant 350 mm/an sont situés à la marge ouest de la région d'étude dans les bassins des rivières Yamaska et Richelieu, au nord de la rivière Saint-François et du lac Aylmer à la marge nord de la région d'étude ainsi que dans une grande zone autour du mont Mégantic. Les secteurs avec de plus faibles recharges se trouvent dans la vallée de la rivière Chaudière, dans la vallée allant de Magog à East Angus ainsi que dans la vallée allant de Sherbrooke à Windsor. Enfin, on note une grande variabilité de la recharge dans la MRC de Coaticook.

4.4 Zones de recharge et de résurgence

La carte du livrable n° 27B montre les zones de recharge et de résurgence de l'eau souterraine qui circule dans l'aquifère rocheux régional. La piézométrie de l'aquifère rocheux (livrable n° 20) est présentée en fond de carte pour indiquer les directions d'écoulement de l'eau souterraine qui vont des secteurs où la charge hydraulique est élevée aux secteurs où la charge est plus faible, en suivant essentiellement la topographie du sol. Au-dessus de la piézométrie, les secteurs avec de fortes valeurs de recharge excédant 300 mm/an sont indiqués par une trame superposée à la piézométrie.

Les cours d'eau représentent les endroits où il y a émergence de l'eau souterraine. Le long des tronçons des cours d'eau principaux, une indication du lien entre le cours d'eau et l'aquifère rocheux est donnée. Ainsi, sur la base du confinement de l'aquifère rocheux (livrable n° 17A), un lien « direct » a été assigné lorsque l'aquifère est libre, un lien « indirect diffus ou inexistant » dénote des conditions semi-captives ou captives. Dans ce dernier cas, la résurgence de l'eau souterraine pourrait se faire en bordure de la vallée d'un cours d'eau plutôt que directement dans le cours d'eau lui-même.

La présence de milieux humides est aussi montrée sur la carte du livrable n° 27B, mais sans distinguer le type de milieu humide comme pour le livrable n° 9. Les milieux humides sont indiqués parce qu'ils peuvent représenter des zones d'émergence plus diffuse de l'eau souterraine. C'est notamment le cas où les cours d'eau ne sont pas développés. Toutefois, l'indication des milieux humides sur la carte n'implique pas nécessairement qu'il y a émergence de l'eau souterraine. Certains milieux humides peuvent être en fait isolés de l'aquifère rocheux et ne représenter que des secteurs où stagnent les eaux de surface. La position d'un milieu humide dans une dépression où l'aquifère rocheux est libre ou semi-captif (livrable n° 17A) peut tout de même donner une indication de la possible émergence de l'eau souterraine.

De façon cohérente avec la piézométrie et la recharge (livrable n° 27A), les zones de recharge se retrouvent généralement dans les hauts topographiques hors des vallées, particulièrement où le roc est affleurant et n'a pas de couvert de dépôts meubles. Au contraire, les zones de résurgences sont dans les vallées, mais on note qu'une grande partie des cours d'eau majeurs ne sont pas en contact direct avec l'aquifère rocheux car ils coulent sur de grandes épaisseurs de sédiments qui confinent le roc. Ainsi, on peut présumer qu'une partie significative de la résurgence de l'eau souterraine pourrait se faire en bordure des vallées, à des sources alimentant de petits cours d'eau où dans des milieux humides. Une partie de la résurgence de l'eau souterraine pourrait aussi se faire par une circulation à travers les dépôts meubles qui comblent les vallées. Ces dépôts meubles pouvant être constitués d'une séquence complexe de matériaux (section 3.2), une telle voie d'écoulement devrait être très lente, ce qui est cohérent avec les âges de l'eau souterraine pouvant atteindre plus de 5000 ans dans plusieurs vallées de la région d'étude (section 4.6). Ces âges importants dans les vallées peuvent aussi résulter de longs cheminements régionaux de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux (voir section 6.2).

4.5 Vulnérabilité des nappes

L'objectif 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. Toutefois, les conditions qui contrôlent la vulnérabilité des nappes sont nombreuses et complexes. Les cartes de vulnérabilité permettent ainsi d'intégrer un ensemble de conditions qui contribuent à la vulnérabilité d'un aquifère, « traduisant » alors la connaissance hydrogéologique en un outil applicable par des non spécialistes.

Le programme PACES spécifie que la méthode qui doit être utilisée pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque est la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987). Le protocole suivi pour appliquer cette méthode est documenté à l'annexe 3 alors que les détails de l'application du protocole sont donnés à l'annexe 4F. Puisque les aquifères granulaires n'ont pas d'extension régionale dans la région d'étude (section 6.1), la vulnérabilité n'a été évaluée que pour l'aquifère rocheux régional. La méthode DRASTIC utilise 7 paramètres, chacun correspondant à une des lettres du mot « DRASTIC ». Ces paramètres et leurs définitions sont illustrés à la figure 4.6.

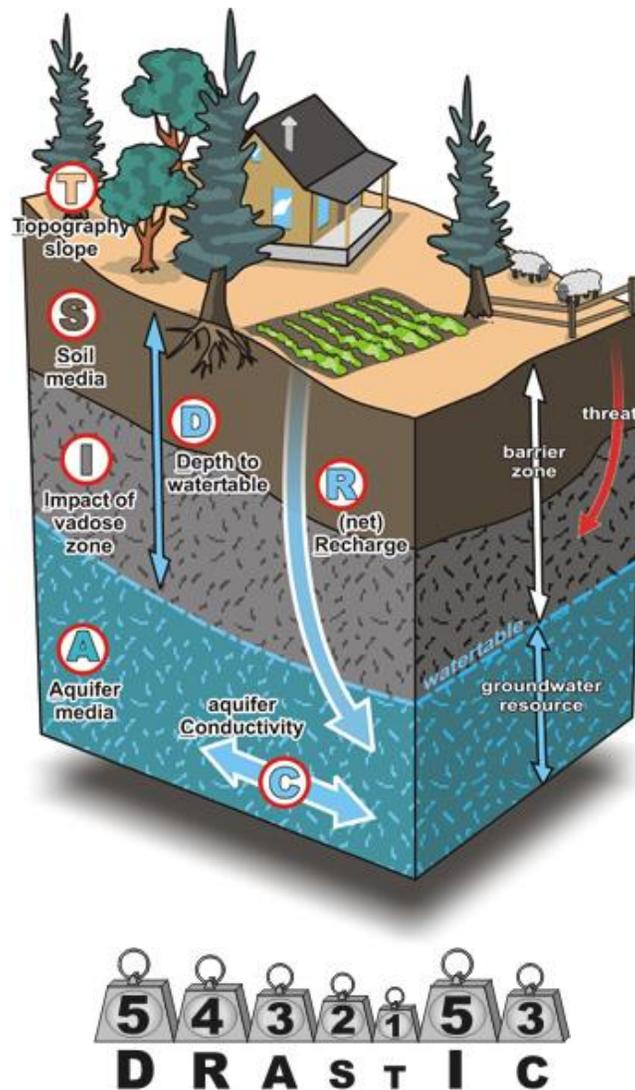


Figure 4.6 : Poids et définitions des paramètres de la méthode de vulnérabilité DRASTIC (De Chardon, 2009, modifié de R. Franklin & R. Turner)

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. Ainsi, des cotes sont attribuées, selon un gabarit, en fonction de la valeur d'un paramètre ou des caractéristiques géologiques. Ces intervalles de valeurs vont généralement de 1 (faible vulnérabilité) à 10 (forte vulnérabilité). Des poids, de 1 à 5, ont aussi été assignés à chacun des 7 paramètres (figure 4.6) en fonction de l'importance relative présumée des processus physiques représentés par les paramètres par rapport à leur contribution à la vulnérabilité. La somme des cotes attribuées aux paramètres DRASTIC, multipliés par leur poids, donne l'indice DRASTIC de vulnérabilité :

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

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*).

Préalablement au calcul de l'indice DRASTIC, une carte de la distribution spatiale de chacun des 7 paramètres a été générée en format matriciel (*raster*) de façon à pouvoir additionner les couches des paramètres. Dans le cadre des projets PACES, des mailles de 250 m x 250 m ont été utilisées pour les couches matricielles, 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.

La carte du livrable n° 22A montre l'indice DRASTIC de vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional. En fait, deux versions de la carte sont présentées dans l'atlas hydrogéologique, une carte qui utilise une échelle de couleur « relative » et une carte avec l'échelle standard définie dans le guide de la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987), aussi utilisée pour la carte à l'échelle 1 / 100 000. La carte « relative » de l'atlas est basée sur les percentiles de la distribution des valeurs d'indice DRASTIC obtenues dans la région d'étude. Les cartes de chacun des sept paramètres DRASTIC sont aussi présentées dans l'atlas. Ces cartes ont les caractéristiques suivantes :

- N° 22B – Vulnérabilité DRASTIC – Indice D Profondeur de la nappe : pour la majorité du territoire la nappe est peu profonde, ce qui mène à des indices « D » élevés (9 ou 10). Par contre, dans les vallées où le roc est enfoui sous une forte épaisseur de sédiments, la nappe dans le roc est profonde et l'indice « D » est plus faible.
- N° 22C – Vulnérabilité DRASTIC – Indice R Recharge : les valeurs de l'indice « R » sont très variables et vont de 1 où la recharge est faible (sous 50 mm/an) à 10 où la recharge est élevée (à plus de 250 mm/an).
- N° 22D – Vulnérabilité DRASTIC – Indice A Type d'aquifère : trois grandes classes de lithologies ont été considérées, auxquelles correspondent des indices « A » de 2 (shale), de 3 (roches métamorphiques et ignées) et de 5 (séquence de grès, calcaire et shale).
- N° 22E – Vulnérabilité DRASTIC – Indice S Type de sol : la région d'étude est constituée surtout de sols issus de tills qui sont généralement des loams auxquels correspondent des indices « S » intermédiaires (3 à 6), mais cet indice est faible (1) où on retrouve des argiles alors qu'il est élevé (10) où le roc est quasi-affleurant et les sols sont minces.
- N° 22F – Vulnérabilité DRASTIC – Indice T Topographie : on a par endroit des pentes très abruptes avec des indices « T » faibles (1 à 3) mais généralement le relief ondulé mène à de faibles pentes et à des indices élevés (9 à 10).
- N° 22G – Vulnérabilité DRASTIC – Indice I Impact de la zone vadoze : les sédiments glaciaires (tills) étant dominants dans la région, l'indice « I » est généralement modéré

- (3) et il est très faible (1) où on trouve une couche confinante. Des indices un peu plus élevés (5) se trouvent dans les secteurs avec roc affleurant (sédiments < 1 m).
- N° 22H – Vulnérabilité DRASTIC – Indice C Conductivité hydraulique : la plage des conductivités hydrauliques du roc ne mène qu'à un seul indice faible (2).

La carte du livrable n° 22A indique que la vulnérabilité est relativement faible (indice < 100) dans les principales vallées, notamment la vallée de la rivière Saint-François entre le lac Massawippi et le lac Aylmer, ainsi que dans la vallée de la rivière Chaudière. Des valeurs intermédiaires de vulnérabilité (indice entre 125 et 150) dominent toutefois la région d'étude. Des valeurs de vulnérabilité plus importantes (indice supérieur à 150 ou même 160) sont observées pour des secteurs d'étendue relativement restreinte, sauf dans le bassin de la rivière Chaudière où l'indice dépasse souvent 160 hors de la vallée.

4.6 Géochimie de l'eau souterraine

4.6.1 Objectifs

La géochimie des eaux souterraines s'est avérée être un outil important pour la compréhension des systèmes aquifères régionaux. Au Québec, de nombreux travaux de caractérisation hydrogéochimique ont ainsi permis non seulement de définir la qualité des eaux souterraines mais aussi d'identifier les processus géochimiques impliqués dans différents contextes régionaux (Beudry et al., 2018; Benoit et al., 2014; Blanchette et al., 2010; Bondu et al., 2018; Chaillou et al., 2018; Cloutier et al., 2006, 2008 et 2010; Ghesquière et al., 2015; Meyzonnat et al., 2016; Montcoudiol et al., 2015, Rey et al., 2018; Saby et al., 2017). Ces études ont également permis de mieux caractériser les systèmes d'écoulement régionaux des eaux souterraines, incluant la définition des zones de recharge et de résurgence.

L'objectif général de la caractérisation géochimique et isotopique de l'eau souterraine dans la région d'étude du PACES Estrie était de contribuer à la compréhension du système aquifère et de supporter la gestion durable de la ressource en eau souterraine. Cette caractérisation a permis aussi d'atteindre quatre objectifs spécifiques. Le 1^{er} objectif spécifique était de faire le portrait de la géochimie et du temps de résidence (âge) de l'eau souterraine pour identifier les processus géochimiques contrôlant la présence de différents types d'eau. Ce sont les travaux reliés à cet objectif qui sont documentés dans la présente section. Le 2^e objectif spécifique visait la caractérisation de la qualité de l'eau souterraine en Estrie qui est documentée à la section 5.3. Cette caractérisation de la qualité a confirmé que ce sont le manganèse (Mn) et l'arsenic (As) qui représentent les plus importants problèmes de qualité de l'eau souterraine dans la région d'étude. Ces problématiques étant déjà connues avant d'amorcer le PACES Estrie, le 3^e objectif spécifique était de réaliser des travaux afin de mieux comprendre les processus géochimiques à l'origine des fortes concentrations en Mn et en As dans certains secteurs de la région (section 6.3). Enfin, le 4^e objectif spécifique était d'évaluer le risque de contamination des puits d'approvisionnement municipaux à l'aide de données géochimiques, isotopiques et de chlorofluorocarbones (CFCs) et d'hexafluorure de soufre (SF₆) (section 6.4).

Les travaux sur la géochimie de l'eau souterraine ont été réalisés dans le cadre de la maîtrise d'Élise Colléau (2020) qui a été faite dans un cheminement bidualmement à l'INRS et à l'Université de Rennes 1. Plus de détails sur l'ensemble des travaux se trouvent dans le mémoire.

4.6.2 Données considérées

La campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine ainsi que le programme analytique sont décrits à la section 2.3. Au total, il y a eu échantillonnage de 180 puits, dont 151 puits résidentiels (privés), 14 puits du réseau de suivi du MELCCFP (RSESQ) et 15 puits municipaux. Les puits privés répertoriés dans le SIH (MELCC, 2022) ont été privilégiés pour avoir des informations sur les puits (année de construction, profondeur au roc, tubage, etc.). Sur les 180 puits échantillonnés, 90,5% sont ouverts au roc tandis que 9,5% sont alimentés par un aquifère granulaire.

Puisque la région d'étude du PACES Estrie couvre une partie du territoire de projets PACES réalisés antérieurement, des données géochimiques provenant de ces projets ont aussi été considérées afin de couvrir toute la région d'étude, tout en évitant de refaire des analyses dans les secteurs déjà couverts. Ainsi, les 219 données géochimiques considérées pour nos travaux comprennent les 180 analyses produites par le PACES Estrie ainsi que 23 analyses provenant du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013), 10 analyses du PACES Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015) et 6 analyses du PACES Nicolet-Saint-François (Larocque et al., 2015). En plus des analyses chimiques complètes ainsi obtenues, 10 analyses isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, ^3H , ^{14}C) ont aussi été récupérées de ces projets antérieurs.

Le tableau 4.6 résume les analyses chimiques, isotopiques et de gaz dissous disponibles pour les 219 échantillons, selon leur provenance de sources, soit en majorité de puits privés. Le tableau montre aussi le type d'aquifère ainsi que les conditions de confinement d'où proviennent les échantillons. Les puits s'alimentent en général à partir de l'aquifère rocheux fracturé régional et ces puits sont presque tous ouverts au roc et sans crépine. Une plus grande proportion de puits municipaux s'alimente dans un aquifère granulaire, ces aquifères ayant généralement un meilleur potentiel que le roc fracturé (section 6.1). Plus de la moitié des puits privés présentent des conditions de confinement libres. Cependant, 40% des puits municipaux échantillonnés prélèvent leur eau souterraine dans des aquifères granulaires dont les conditions de confinement sont principalement libres ou semi-captives. Le mémoire de Colléau (2020) présente des cartes montrant la distribution spatiale des différents types de puits, des aquifères échantillonnés et des conditions de confinement.

Tableau 4.5 : Échantillons d'eau souterraine dans la région du PACES Estrie avec leurs types d'analyses, l'aquifère capté et les conditions de confinement (tiré de Colléau, 2020)

Paramètres par type d'échantillon		Source N=1	Puits privé N=186	Puits municipal N=15	Puits du RSESQ N=17	Total
Analyses	Chimie complète	1	186	15	17	219
	¹⁴ C et ³ H	0	47	15	8	70
	δ ¹⁸ O et δ ² H	0	48	15	7	70
	CFCs, SF ₆ et gaz dissous	0	8	15	4	27
Aquifère	Roc	1	177	9	15	202
	Granulaire	0	9	6	2	17
Confinement	Libre	1	110	6	5	122
	Semi-captif	0	49	6	8	63
	Captif	0	27	3	4	34

4.6.3 Définition et nature des groupes d'eau souterraine

Les 219 résultats analytiques disponibles ont été soumis à une analyse statistique multivariée dont les détails sont donnés par Colléau (2020). Une classification ascendante hiérarchique (CAH) (*clustering*) et une analyse en composante principale (ACP) ont été réalisées afin d'établir les similitudes et les relations entre les échantillons. Ces analyses statistiques permettent de considérer plusieurs variables en même temps et de définir des groupes d'eau présentant des ressemblances. Le traitement des données et l'interprétation des résultats ont suivi les approches définies initialement par Cloutier et al. (2008) puis appliquées par la suite par Blanchette et al. (2010) puis Beaudry et al. (2018). L'approche développée par Cloutier et al. (2008) est abondamment citée (565 citations par Scopus et 811 par Google Scholar en date d'avril 2024).

Les 19 paramètres géochimiques considérés pour l'analyse statistique (pH, Eh, MDT estimée, pCO₂, HCO₃, Ca, Cl, Mg, K, Na, NO₃, SO₄, As, Mn, Si, Fe, F, Sr, Ba) ont été sélectionnés selon ces critères : 1) paramètres impliqués dans de nombreux processus géochimiques ; 2) paramètres provenant d'échantillons avec une erreur sur le bilan ionique inférieure à 15% ; 3) paramètres dont moins de 15% des échantillons analysés sont sous la limite de détection (LD) ; et 4) paramètres avec une grande distribution des concentrations.

Les données géochimiques ne suivant pas une distribution normale ont subi une transformation Boxcox qui est similaire à une transformation logarithmique mais assure que les données transformées suivent parfaitement une loi normale. Par la suite, les données ont été standardisées pour s'assurer que le même poids soit attribué à chacun des paramètres : $S = (X - \mu) / \sigma$. La valeur standardisée S étant obtenues en centrant la valeur observée X par la soustraction de la moyenne μ des valeurs et en la réduisant par la division avec l'écart-type σ des valeurs observées.

La classification ascendante hiérarchique (CAH), aussi appelée *clustering*, a permis de classer les échantillons présentant des traits communs dans les mêmes groupes. Cette opération a ainsi permis la définition de 8 groupes d'eau. L'analyse en composantes principales (ACP) permet d'explorer et de visualiser un ensemble de données comprenant plusieurs variables quantitatives. L'ACP permet ainsi de définir de nouvelles variables indépendantes, nommées composantes principales, qui correspondent à des combinaisons linéaires des variables d'origine, soit les analyses chimiques dans le cas de notre étude.

La figure 4.7 montre qu'une bonne définition de variabilité de la géochimie de l'eau souterraine peut être obtenue de l'analyse multivariée. La figure 4.7a indique d'abord comment les huit (8) groupes d'eau ont été définis par la classification ascendante hiérarchique (CAH) en fixant la distance d'agrégation à une valeur de 20.

La figure 4.7b représente les valeurs propres des paramètres géochimiques considérés pour l'analyse en composante principale en fonction des deux premières composantes qui expliquent 50% de la variance des compositions chimiques. La composante 1 est reliée surtout à la concentration des ions majeurs et la composante 2 aux conditions géochimiques. La première composante a des valeurs négatives lorsque les concentrations en ions majeurs sont fortes et positives lorsque ces concentrations sont faibles. La seconde composante peut prendre des valeurs positives reliées à un milieu acide, oxydant (Eh), ouvert (pCO_2) et avec des effets anthropiques (NO_3), et des valeurs négatives reliées à un milieu alcalin (pH), réducteur, fermé et avec des composés mineurs typiques d'une eau géochimiquement évoluée (As, F, Fe, Mn, Si).

La figure 4.7c montre la projection des 219 échantillons identifiés selon leur groupe sur les 2 premières composantes de l'ACP. Le regroupement des échantillons des différents groupes d'eau à l'intérieur de zones bien définies démontre que ces groupes ont des caractéristiques géochimiques bien distinctes.

Afin de refléter les conditions auxquelles sont associés les groupes d'eau, des noms et des symboles leur ont été attribués avec un code couleur donnant des indications sur la composition géochimique. D'abord, en fonction de la 2^e composante, les couleurs bleu-gris correspondent à des eaux de recharge dont la 2^e composante est positive alors que les couleurs jaune-brun-rouge ont été attribuées aux groupes représentant des eaux évoluées géochimiquement avec des valeurs négatives de la 2^e composante. Ensuite, des nuances de couleur pour ces 2 grands ensembles classifient ces eaux selon leurs concentrations en ions en fonction de la valeur de la 1^{ère} composante.

Ainsi, les eaux de recharge (bleu-gris) sont liées à un milieu acide, oxydant, ouvert et à la présence de composés anthropiques. Le groupe A2b (bleu clair) est non affecté par les activités anthropiques tandis que les groupes B1b1 (bleu), A2a (bleu foncé) et B1a (gris) sont de plus en plus impactés par des activités anthropiques. Les eaux évoluées géochimiquement (jaune-brun-rouge) sont présentes en conditions alcalines, réductrices et fermées avec une évolution selon la concentration en ions majeurs. Les groupes B2a (jaune clair), B2b (jaune) et B1b2 (brun) représentent ces eaux dans un ordre croissant de concentrations en ions. Le groupe A1 (rouge) correspond à des eaux purement sodiques identifiées dans la zone d'étude.

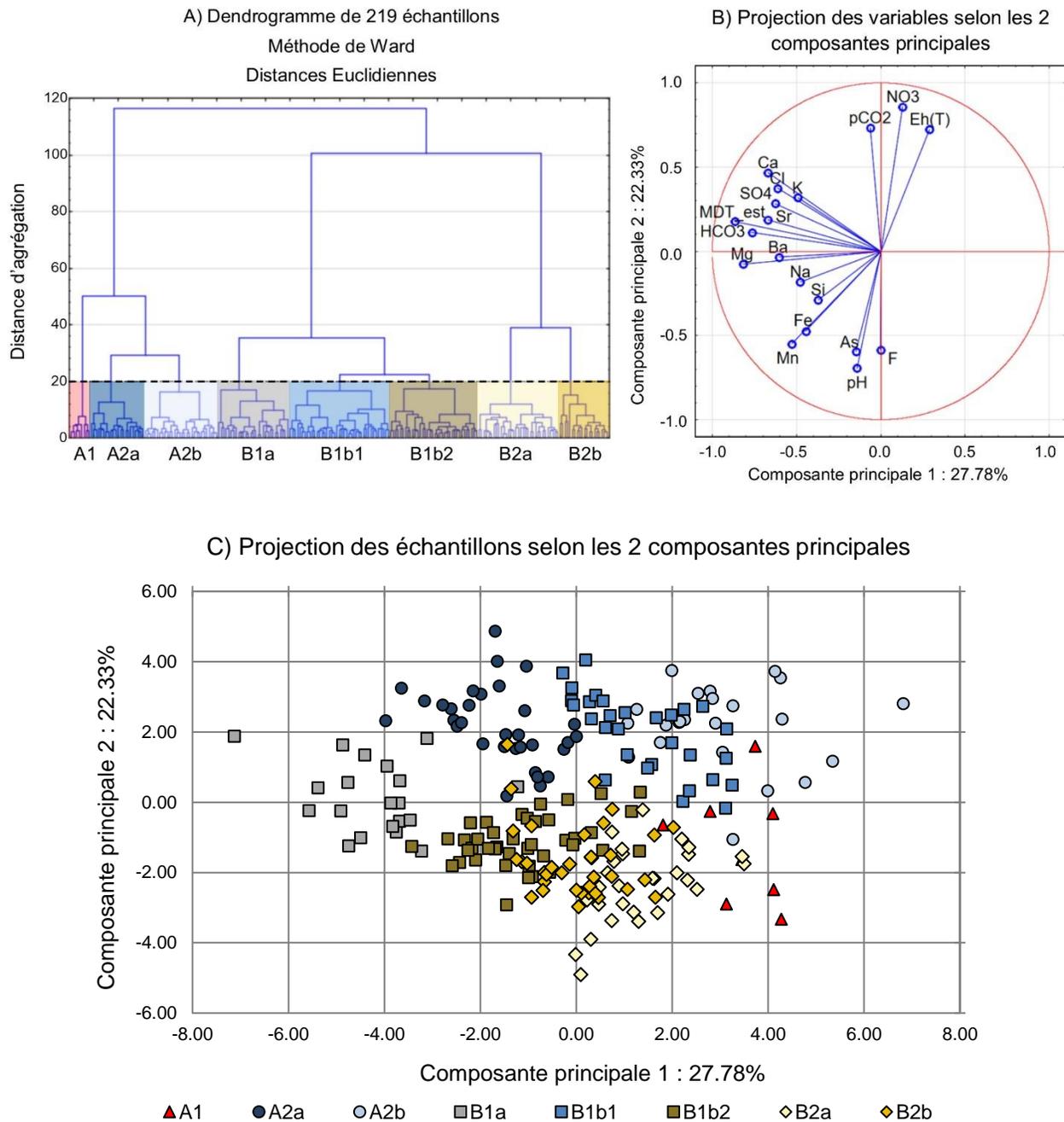


Figure 4.7 : Résultats de l'analyse statistique multivariée : a) dendrogramme présentant les résultats de la CAH définissant les 8 groupes d'eau; b) projection des variables utilisées pour l'ACP selon les 2 premières composantes; et c) distribution des 219 échantillons distingués par leur groupe d'eau selon les 2 premières composantes (tiré de Colléau, 2020)

La distribution spatiale des groupes d'eau est montrée sur la figure 4.8. De façon générale, les groupes d'eau de recharge tendent à être dominants dans les hautes terres alors qu'on retrouve plutôt les groupes d'eaux évoluées en bordure ou dans les vallées. La distribution spatiale des types d'eau de recharge et évolués sera précisée plus loin en relation avec l'âge de l'eau souterraine (figure 4.11).

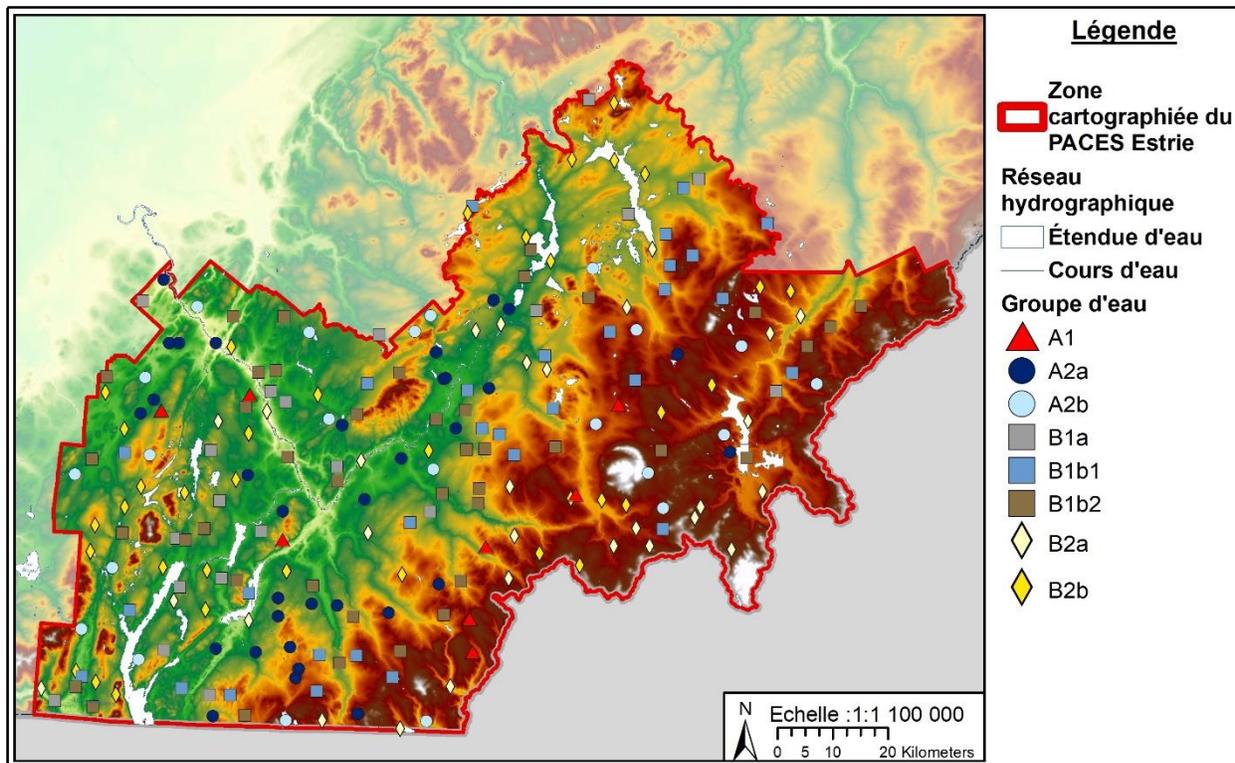


Figure 4.8 : Distribution spatiale des groupes d'eau (tiré de Colléau, 2020)

Les ions majeurs permettent d'identifier le profil géochimique de chacun des groupes d'eau. La figure 4.9 montre ainsi la proportion des ions dans un diagramme de Piper ainsi que les concentrations moyennes illustrées par des diagrammes de Stiff. La majorité des eaux sont de type bicarbonaté calcique et magnésien, tant pour les eaux de type recharge que pour les eaux évoluées. Au niveau des groupes d'eau de type recharge, c'est dans le groupe A2b que les concentrations sont les plus faibles, suivi des groupes B1b1, A2a et B1a. Les groupes A2a ainsi que B1a ont été interprétés comme ayant subi une dégradation de la qualité d'eau en relation avec les activités anthropiques. Cette dégradation de qualité ne mène pas à des dépassements des concentrations maximales acceptables (CMA) de composés d'origine anthropique (section 5.3). Toutefois, la modification des conditions d'oxydoréduction du groupe B1a favorise de fortes concentrations en As et Mn qui peuvent dépasser la CMA de ces composés (sections 5.3 et 6.3). Au niveau des ions majeurs, les groupes d'eau de type évolué ne se distinguent pas de façon importante des groupes d'eau de recharge, sauf pour le groupe A1 qui correspond à des eaux carbonatées sodiques. Les concentrations en ions majeurs sont généralement les plus faibles pour le groupe B2a et augmentent pour les groupes B2b et B1b2.

En plus des concentrations en ions majeurs, l'interprétation des groupes d'eau peut être précisée à l'aide du temps de résidence (âge) de l'eau souterraine. Deux principaux indicateurs isotopiques ont été utilisés pour préciser l'âge de l'eau souterraine. Ces deux indicateurs sont présents dans l'atmosphère et se retrouvent ainsi dans les précipitations qui rechargent les nappes. D'abord, le tritium (^3H) a une courte demi-vie, de sorte que sa détection implique qu'une partie de l'eau souterraine est « moderne », c'est-à-dire qu'elle a moins que 50 ou 60 ans. Les plus fortes concentrations de l'ordre de 10 unités tritium (TU, *tritium units*) indiquent même des eaux « récentes » ayant moins que 10 ans. Ensuite, le radiocarbone (^{14}C) a une plus longue demi-vie permettant de dater des eaux ayant jusqu'à 50 000 ans. La dissolution des carbonates lors de la circulation de l'eau souterraine affecte les âges ^{14}C qui doivent être corrigés (Colléau, 2020).

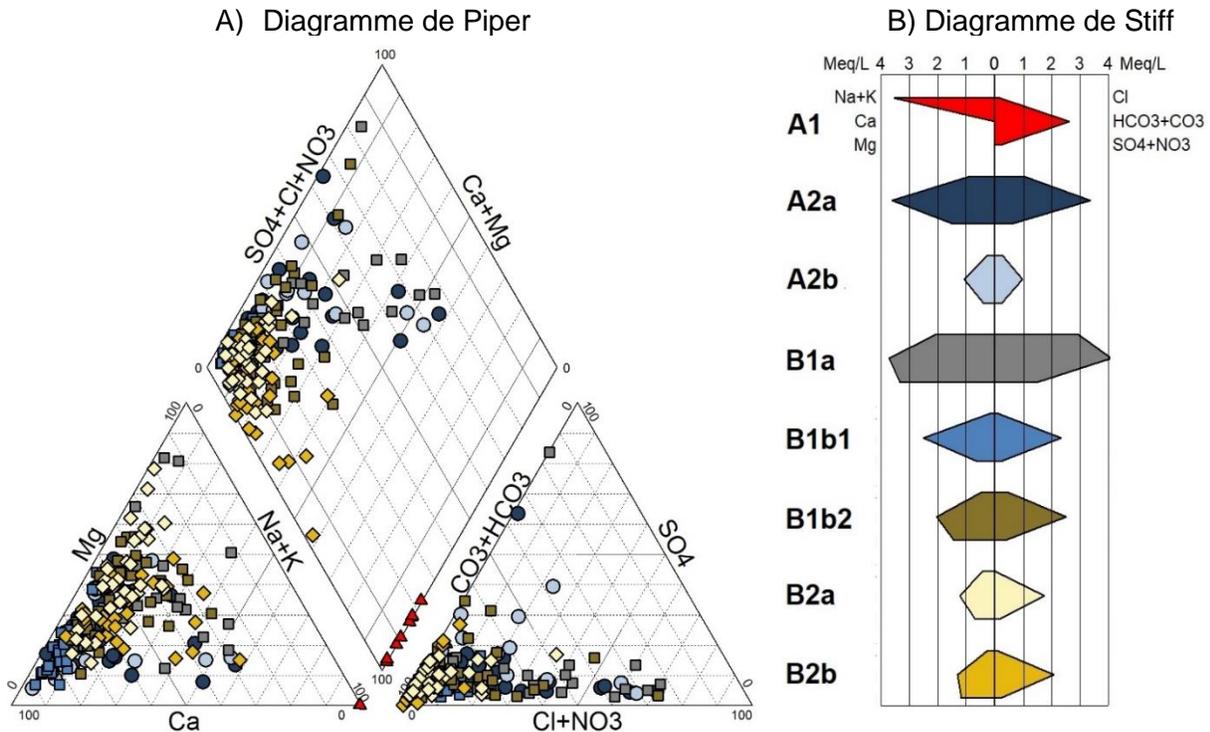


Figure 4.9 : Ions majeurs des groupes d'eau : a) échantillons associés aux groupes dans un diagramme de Piper; b) concentration moyenne des groupes d'eau représentée par un diagramme de Stiff (tiré de Colléau, 2020)

L'eau souterraine est couramment constituée d'un mélange d'eaux ayant des temps de résidence différents. En fait, les puits ouverts au roc dont proviennent la majorité des échantillons d'eau favorisent un tel mélange d'eaux pouvant entrer dans le puits par des fractures ouvertes à différentes profondeurs du puits. Ainsi, les indicateurs représentant respectivement la présence d'eau jeune (concentration en tritium) et d'eau à long temps de résidence (âge ^{14}C corrigé) peuvent être combinés pour classer les temps de résidence de l'eau souterraine. Le tableau 4.7 montre ainsi les classes qui ont été définies à partir de ces deux indicateurs pour notre région d'étude. Cette classification distingue trois catégories d'eau selon leur temps de résidence : 1) les eaux avec une prédominance d'eau moderne, 2) les eaux constituées d'un mélange d'eau moderne et ancienne, et 3) les eaux avec une prédominance d'eau ancienne.

Tableau 4.6 : Catégories d'âge de l'eau souterraine selon les âges radiocarbone corrigés et les concentrations en tritium (tiré de Colléau, 2020)

Temps de résidence estimé par le radiocarbone		Présence d'eau moderne estimée par le tritium		
		Faible $^3\text{H} < 2 \text{ TU}$	Présente $2 < ^3\text{H} < 7 \text{ TU}$	Dominante $^3\text{H} > 7 \text{ TU}$
Court	Âge $^{14}\text{C} < 2000 \text{ y BP}$	NA	Eau moderne	Eau récente
Intermédiaire	$2000 < \text{Âge } ^{14}\text{C} < 5000 \text{ y BP}$	NA	Mélange d'eau moderne et ancienne	Eau récente avec eau ancienne
Long	Âge $^{14}\text{C} > 5000 \text{ y BP}$	Prédominance d'eau très ancienne	Eau très ancienne avec eau moderne	NA

La figure 4.10a montre la distribution des valeurs des deux indicateurs de temps de résidence pour tous les échantillons distingués par groupe d'eau, tandis que la figure 4.10b montre la moyenne des proportions des trois catégories d'âge de l'eau souterraine pour les groupes d'eau. Les eaux de type recharge (A2b, B1b1, A2a et B1a) n'ont aucun échantillon avec prédominance d'eau ancienne. Les échantillons du groupe A2b qui a subi le moins d'effet anthropique n'ont en fait que des eaux modernes, alors que les trois autres groupes peuvent aussi avoir des mélanges d'eau d'âges modernes et anciens. Les groupes d'eau évoluée géochimiquement (A1, B2a, B2b et B1b2) sont dominés par des eaux à prédominance d'eau ancienne ou des mélanges. Le groupe B2a est le plus purement relié à des eaux anciennes (à 75%), tandis que le groupe B2b possède le plus de mélanges d'eau ou même des eaux modernes.

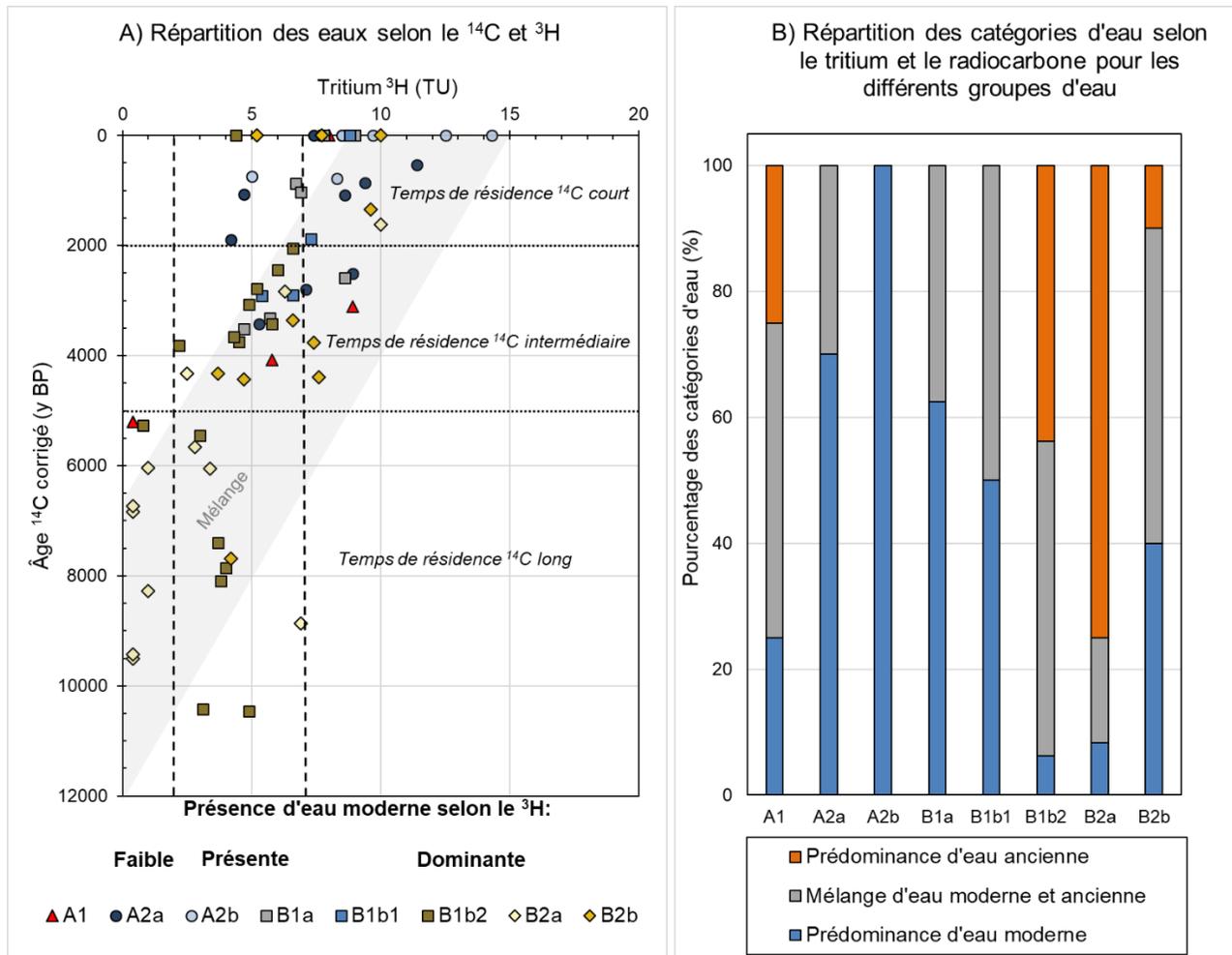


Figure 4.10 : Âges des échantillons des groupes d'eau : a) concentrations en tritium (^3H) et âges radiocarbone (^{14}C); b) proportions des catégories d'âge (tiré de Colléau, 2020)

La figure 4.11 montre la distribution spatiale des échantillons selon les trois classes d'âge de l'eau (eaux récentes, mélanges et eaux anciennes) avec les zones correspondant aux eaux de recharge et évoluées définies par Colléau (2020). Les eaux avec une prédominance d'eau moderne se situent effectivement dans les zones de recharge et les eaux avec une prédominance d'eau ancienne dans les zones d'eau évoluées géochimiquement. Les travaux subséquents de modélisation numérique ont montré que les secteurs avec des eaux évoluées et anciennes sont associés aux zones d'émergence de l'eau souterraine et ont en fait une étendue plus restreinte que ce qui est montré à la figure 4.11 (section 6.2; Mathis, 2023).

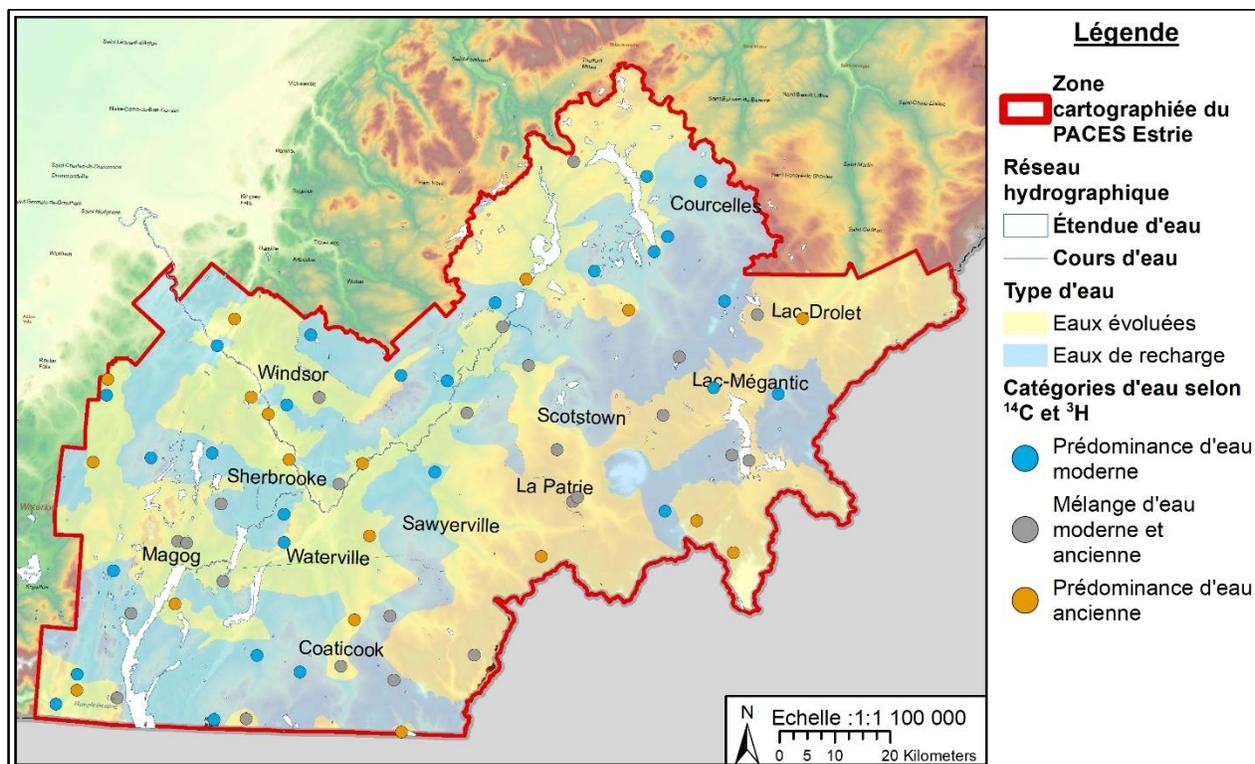


Figure 4.11 : Distribution spatiale des échantillons selon les classes de ^{14}C et ^3H avec les zones d'eaux de recharge et évoluées géochimiquement (tiré de Colléau, 2020)

4.6.4 Caractéristiques et évolution géochimique de l'eau souterraine en Estrie

L'ensemble des résultats de la caractérisation de la géochimie et du temps de résidence des groupes d'eau souterraine permet l'interprétation et l'organisation des groupes d'eau. Le tableau 4.8 résume ainsi les caractéristiques des groupes d'eau qui sont présentés dans l'ordre de leur évolution. Les eaux de recharge sont classées dans l'ordre A2b, B1b1, A2a et B1a, en fonction du niveau de l'impact anthropique sur leur composition chimique et leur concentration globale. Les eaux évoluées géochimiquement sont classées dans l'ordre A1, B2b, B1b2 et B2a, par rapport à leur temps de résidence qui dépend notamment de l'effet du mélange d'eaux avec des âges modernes et anciens.

Colléau (2020) présente aussi des tableaux et cartes sur les conditions hydrogéologiques reliées aux groupes d'eau (type d'aquifère, confinement, lithologie). Tel qu'indiqué au tableau 4.6, la majorité des puits échantillonnés prélèvent leur eau dans un aquifère ouvert au roc avec des conditions libres. Les eaux évoluées géochimiquement présentent également des proportions importantes de conditions semi-captives. Les eaux de recharge sont principalement localisées dans les zones avec des conditions libres alors que les eaux évoluées géochimiquement sont surtout observées dans les zones de confinement semi-captif et captif. En effet, les proportions cumulées des conditions semi-captives et captives augmentent du groupe A1, B2b, B1b2 et au groupe B2a. Ainsi, plus de la moitié des échantillons de ces groupes sont issus d'un aquifère semi-captif ou captif.

Tableau 4.7 : Description des groupes d'eau (tiré de Colléau, 2020)

Type d'eau	Groupe d'eau	N	Description géochimique	N ³ H et ¹⁴ C	N CFCs et SF ₆	Description datation
Eaux de recharge	A2b	22	Eau à pH acide, oxydante et en système ouvert au CO ₂ ; la moins chargée (MTD) et affectée par les effets anthropiques mais la plus riche en Al, Cu, Pb, Zn et la plus pauvre en As, Si, SO ₄ .	6	4	Eau la plus riche en ³ H avec un âge ¹⁴ C corrigé moderne (0 yBP); entièrement constituée d'une prédominance d'eau moderne.
	B1b1	30	Eau à pH neutre, oxydante et en système ouvert au CO ₂ ; un peu d'effets anthropiques (NO ₃) et d'évolution géochimique (Ca, K). Groupe d'eau pauvre en Mn et Si.	4	3	Eau avec une teneur en ³ H élevée et un temps de résidence ¹⁴ C intermédiaire (2394 yBP). Présence d'eau moderne à 50% et d'eau de mélange entre un pôle moderne et ancien à 50%.
	A2a	33	Eau à pH neutre, oxydante et en système ouvert au CO ₂ ; eau chargée (TDS) avec un effet anthropique important (Cl, COD, NO ₃ , SO ₄) et concentration totale élevée (Ca, Mg, Sr). Moyenne élevée en N-NH ₃ .	10	6	Eau avec une teneur en ³ H élevée et un temps de résidence ¹⁴ C court (1074 yBP); majoritairement constituée d'une prédominance d'eau moderne.
	B1a	20	Eau à pH neutre, réductrice et en système ouvert au CO ₂ ; la plus concentrée (Ba, Ca, K, Mg, Mn, Na, Si, Sr, U). Eau dégradée avec un fort impact de l'activité anthropique (Cl, COD, SO ₄) et contient les plus fortes concentrations en Fe, SO ₄ et N-NH ₃ avec une faible teneur en NO ₃ (suspicion de dénitrification autotrophe). Moyenne élevée en B, Br-.	8	2	Eau avec une teneur en ³ H élevée et un temps de résidence ¹⁴ C court (951 yBP); majoritairement constituée d'une prédominance d'eau moderne.
Eaux évoluées	A1	8	Eau à pH neutre, oxydante et en système ouvert au CO ₂ ; eau purement sodique la plus riche en As.	4	2	Eau avec une teneur en ³ H élevée et un temps de résidence ¹⁴ C intermédiaire (3594 yBP); la moitié des échantillons correspondent à un mélange d'eau entre un pôle moderne et ancien.
	B2b	36	Eau un peu alcaline, réductrice et en système fermé pour le CO ₂ ; avec de fortes concentrations en Mn, Fe et contient aussi beaucoup de F, Si. Moyenne élevée en P inorg et S ²⁻ .	10	3	Eau avec une teneur en ³ H élevée et un temps de résidence ¹⁴ C intermédiaire (3561 yBP); la moitié des échantillons correspondent à un mélange d'eau entre un pôle moderne et ancien.
	B1b2	41	Eau alcaline, réductrice et en système fermé pour le CO ₂ ; se distingue par des concentrations élevées en As, B, Ba, F, Mg, Sr, S ²⁻ .	16	3	Eau avec peu de ³ H et un temps de résidence ¹⁴ C intermédiaire (3780 yBP); constituée d'une prédominance d'eau ancienne mais également d'un mélange d'eau entre un pôle moderne et ancien.
	B2a	29	Eau très alcaline, réductrice et en système fermé pour le CO ₂ mais très peu concentrée. Eau la plus riche en F, Mo et P inorg.	12	4	Eau la plus pauvre en ³ H et un temps de résidence ¹⁴ C long (6398 yBP); majoritairement constituée d'une prédominance d'eau ancienne.

Tel que noté précédemment en relation avec la figure 4.9b, les proportions et concentrations des ions majeurs montrent certaines distinctions entre les groupes d'eau, mais ce sont surtout les conditions physicochimiques (pH et Eh), les ions mineurs et les temps de résidence qui distinguent les groupes d'eau, notamment à l'intérieur des types d'eau de recharge et évoluée (tableau 4.8).

D'abord, les eaux de recharge sont généralement acides et oxydantes et en système ouvert par rapport au CO_2 , et montrent une prédominance d'eau moderne ou encore des mélanges d'eau moderne et ancienne (figure 4.10b). De leur côté, les eaux évoluées sont plus alcalines, réductrices et en système fermé par rapport au CO_2 , et contiennent des eaux anciennes ou des mélanges d'eaux d'âges anciens et modernes. À l'intérieur des eaux de recharge, les effets anthropiques se traduisent par des concentrations significatives de divers composés d'origine anthropique. Le groupe d'eau B1a qui est le plus affecté par les effets anthropiques montre aussi de fortes concentrations en Mn et As qui ne se retrouvent pas dans les autres groupes d'eau de recharge. Au niveau des eaux évoluées, le groupe A1 se distingue par la dominance du cation Na qui n'est pas abondant dans les autres groupes d'eau. Les autres groupes d'eau évoluée ont des ions mineurs différents ainsi que des temps de résidence distincts, notamment au niveau de l'importance des mélanges d'eau d'âges modernes et anciens.

L'évolution géochimique des groupes d'eau peut être illustrée notamment par la répartition des échantillons d'eau d'après la concentration en ions majeurs, tel que le montre la figure 4.12. Ce graphique apporte des informations similaires à un diagramme de Piper avec l'axe des abscisses qui représente la concentration relative des cations majeurs et l'axe des ordonnées la concentration relative des anions majeurs. Les eaux de recharge qui sont de type Ca- HCO_3 se retrouvent dans le coin en haut à droite du graphique. À partir de cette « origine » des eaux de recharge, deux tendances sont visibles : un enrichissement des eaux de recharge en Na et Cl et une évolution des eaux évoluées vers un pôle sodique.

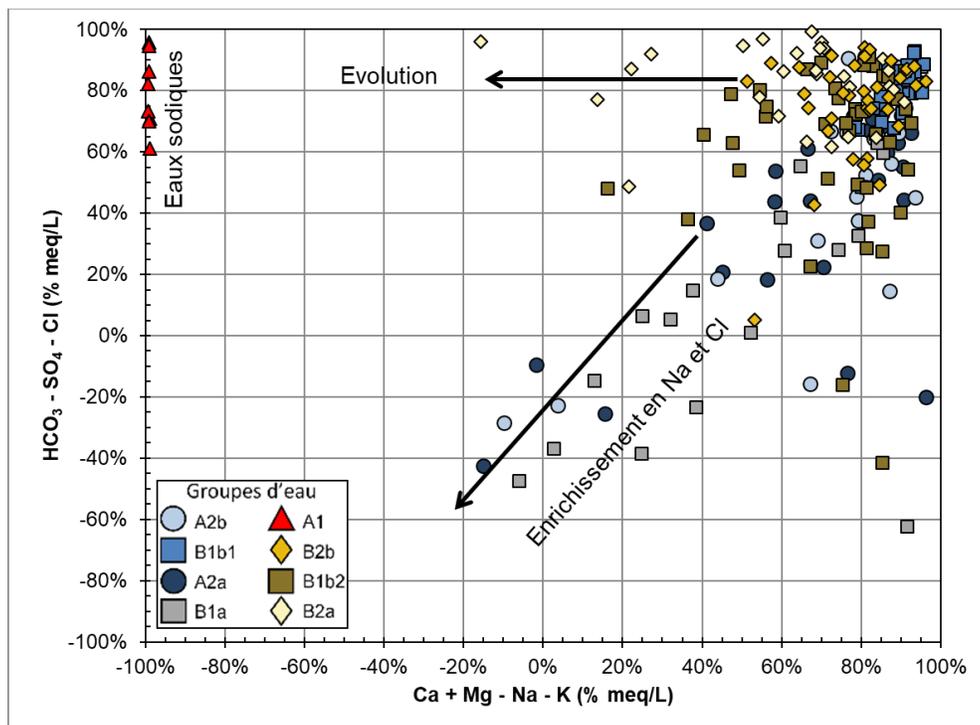


Figure 4.12 : Concentrations relatives des cations (axe X) et des anions (axe Y) pour les échantillons distingués par groupe d'eau (tiré de Colléau, 2020)

Tel que le montre la figure 4.12, les eaux de recharge les plus affectées par les impacts anthropiques (groupes A2a et B1a) présentent des proportions plus grandes en chlorures et un taux de matière dissoute plus important contrairement aux eaux de recharge non affectées (A2b). Les 2 groupes les plus impactés par des effets anthropiques n'ont toutefois pas la même source

de contamination : le groupe B1a a peu de nitrites-nitrates même s'il a de fortes concentrations en matière dissoute totale et de chlorures contrairement au groupe A2a. Le groupe A2a est donc clairement impacté par des activités agricoles ou des émissions de systèmes d'épuration des eaux. Cependant, le groupe le plus impacté B1a est caractérisé par des conditions plus réductrices qui favoriseraient la dégradation des nitrates, ce qui pourrait expliquer leur faible concentration malgré la présence d'autres composés d'origine anthropique (Cl⁻). Les concentrations en arsenic et en manganèse augmentent selon l'évolution géochimique et le temps de résidence des groupes d'eau, ce qui amène des problèmes de potabilité fréquents dans les eaux évoluées, mais le groupe d'eau de recharge B1a le plus impacté a aussi de fortes concentrations en As et Mn. Les sections 5.3 et 6.3 traitent respectivement plus en détail de la qualité de l'eau souterraine et des conditions qui contrôlent la présence de As et Mn.

La figure 4.13 présente un modèle conceptuel de l'évolution géochimique des eaux souterraines en Estrie qui résume l'interprétation de la caractérisation géochimique réalisée dans le cadre du PACES Estrie. Tel que déjà souligné, les eaux souterraines en Estrie constituent 2 grands ensembles : les eaux de recharge (A2b, A2a, B1a et B1b1) et les eaux évoluées géochimiquement (A1, B2b, B1b1 et B2a).

On trouve des eaux de recharge qui ne montrent pas d'évidence d'impact anthropique (groupe A2b). Toutefois, les eaux de recharge montrent aussi différents niveaux d'effets des activités anthropiques qui émettent des chlorures, nitrites-nitrates et sulfates qui atteignent la nappe (groupes A2a et B1a). Les eaux de recharge du groupe B1a sont les plus impactées et certains échantillons ont été prélevés à proximité des routes, d'où leur enrichissement en chlorures (sel déglaçant). Les teneurs en nitrites-nitrates du groupe B1a sont plus faibles, mais les fortes concentrations en azote ammoniacal, fer et sulfates laissent supposer qu'un phénomène de dénitrification autotrophe pourrait s'être produit. Les conditions réductrices reliées au groupe B1a a aussi mené à de fortes concentrations en As et Mn qui ne sont pas présents en fortes concentrations dans les autres groupes d'eau de recharge (détails à la section 6.3). Les eaux du groupe A2a sont riches en ces composés mais aussi en nitrites-nitrates, indiquant l'effet d'un impact anthropique domestique ou agricole. Ces eaux sont modernes avec un temps de résidence court et un pôle récent (<60 ans) prédominant.

Les eaux de recharge (A2b) vont circuler le long du système d'écoulement avec des conditions de plus en plus alcalines et réductrices et s'enrichir naturellement en composés tels que le baryum, le fer, les fluorures et la silice, entraînant une évolution géochimique (groupes B2b, B1b2 et B1a). Les eaux évoluées ont aussi des conditions favorables à de fortes concentrations en As et Mn. Ces eaux évoluées ont des temps de résidence de plusieurs milliers d'années avec une proportion d'eau récente variable, selon l'importance du mélange.

Ce modèle conceptuel illustre bien que les eaux de recharge avec un court temps de résidence sont vulnérables à une contamination anthropique. Au contraire, les eaux évoluées avec de longs temps de résidence sont moins susceptibles d'être impactées. Ces observations sont à la base de l'estimation du risque de contamination des puits qui a été faite à l'aide de la géochimie et d'indicateurs de temps de résidence de l'eau souterraine (section 6.4). La modélisation hydrogéologique a été faite pour mieux comprendre comment se fait l'écoulement régional menant à des eaux évoluées et à de fortes concentrations en As et Mn (section 6.2).

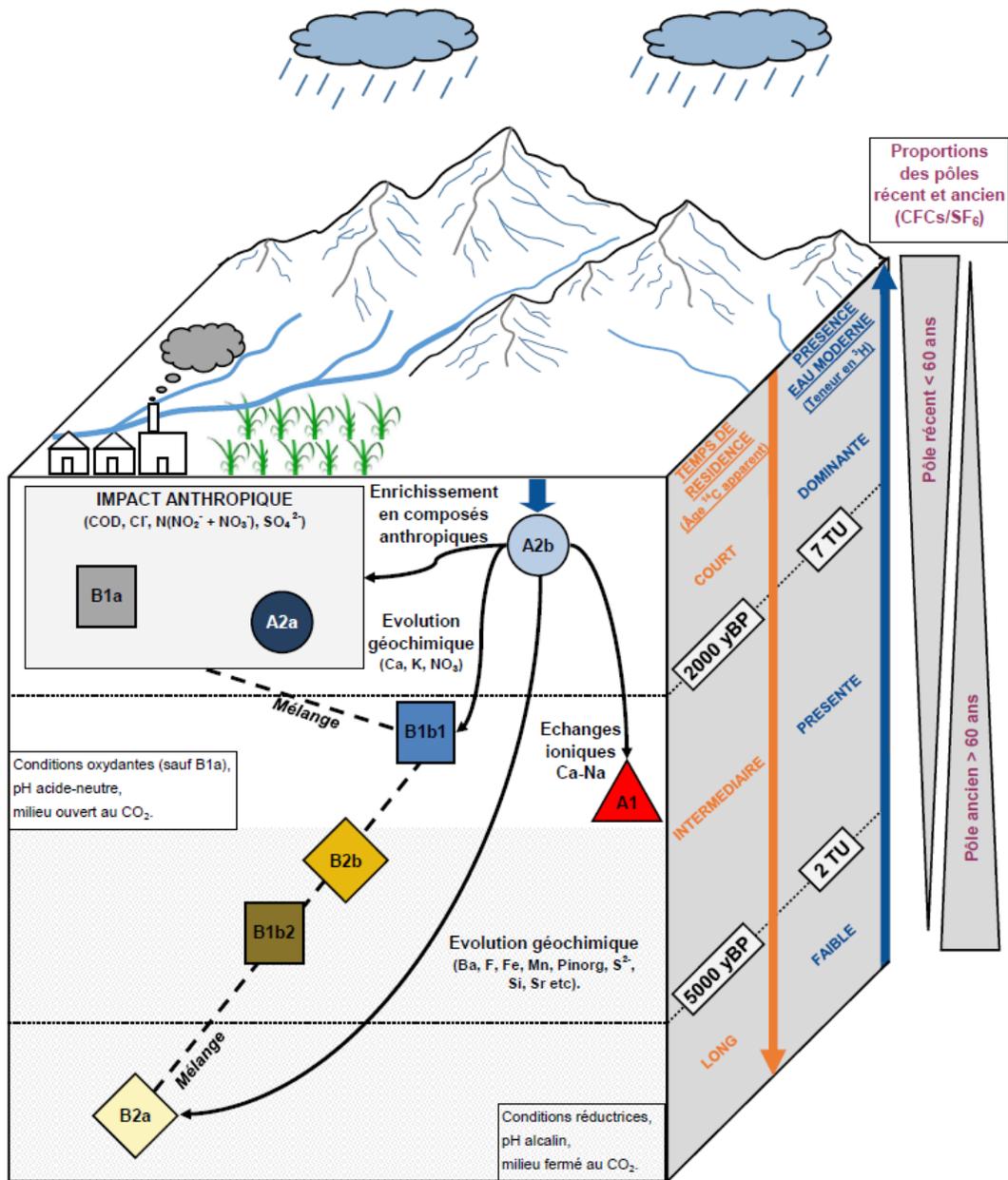


Figure 4.13 : Modèle conceptuel de l'évolution géochimique des eaux souterraines en Estrie (tiré de Colléau, 2020)

4.7 Synthèse des conditions hydrogéologiques

Les livrables cartographiques décrits dans les sections précédentes ainsi que les coupes du livrable n° 14 permettent de définir les conditions hydrogéologiques dans la région d'étude du PACES Estrie. Le tableau 4.9 résume ces conditions pour les deux contextes hydrogéologiques distincts qui ont été identifiés dans la région d'étude, soient les vallées et les hautes-terres appalachiennes. Les vallées sont évidemment reliées aux grands cours d'eau de la région, notamment les rivières Saint-François et Chaudière alors que les hautes-terres se retrouvent hors des vallées. La géologie du roc ne distingue pas les contextes hydrogéologiques, mais la géologie du Quaternaire en surface et surtout la séquence de sédiments sont très distincts selon les contextes. Les vallées sont souvent recouvertes de sédiments fins au-dessus de grandes accumulations complexes de sédiments pouvant excéder 80 m d'épaisseur, alors que les hautes-terres ne sont généralement recouvertes que du Till de Lennoxville dont l'épaisseur peut excéder 10 m mais qui peut aussi être mince ou même absent sur les hauts topographiques.

Les vallées peuvent avoir un potentiel aquifère important dans le Quaternaire ancien dont les aquifères sont exploités par plusieurs puits municipaux. Il peut aussi y avoir un potentiel aquifère dans les sédiments fluvioglaciers qu'on retrouve aussi hors de vallées. Toutefois, il n'y a pratiquement que l'aquifère rocheux qui est exploitable dans les hautes-terres. La conductivité hydraulique des aquifères granulaires peut être très bonne alors que celle du roc est généralement faible et ne permet que rarement des débits de puits importants. Les aquifères granulaires et le roc sont en conditions captives dans les vallées alors que les conditions libres dominent dans les hautes-terres.

La recharge de l'aquifère rocheux régional se fait dans les hautes-terres et il y a peu de recharge localement dans les vallées. L'écoulement se fait des hautes-terres vers les vallées où l'eau souterraine émerge. Toutefois, les grands cours d'eau ne sont pas directement reliés à l'aquifère rocheux et l'émergence peut se faire en bordure de vallées plutôt que dans les cours d'eau. Les eaux de type « évolué » géochimiquement sont prévalentes dans les vallées. Ces eaux peuvent avoir des temps de résidence (âges) de plusieurs milliers d'années. Ce sont plutôt les eaux de type « recharge » qui dominent dans les hautes terres. Ces eaux ont des âges modernes de moins de 60 ans. Les eaux évoluées dans les vallées ont des problématiques de dépassement des normes de potabilité pour le manganèse (Mn) et l'arsenic (As) qui sont présents naturellement. Les eaux de recharge dans les hautes-terres peuvent avoir subi une dégradation anthropique de leur qualité, mais sans qu'il y ait des dépassements de normes de potabilité ou d'objectifs esthétiques.

Les quatre coupes du livrable n° 14 montrent plusieurs aspects des conditions hydrogéologiques de la région d'étude du PACES Estrie : 1) la géologie des dépôts meubles, 2) une conceptualisation de l'écoulement régional de l'eau souterraine, 3) les résultats de la modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine, et 4) les résultats de la modélisation de l'âge de l'eau souterraine. Trois de ces coupes sont orientées du sud-est au nord-ouest et sont localisées à l'est, au centre et à l'ouest de la région d'étude. La quatrième coupe est orientée ouest-est et est située au nord-ouest de la région d'étude. Ces coupes montrent que l'écoulement de l'eau souterraine est plutôt superficiel dans le roc car la partie supérieure du roc est plus perméable. Toutefois, il y a une imbrication d'écoulements locaux et régionaux avec une origine de l'écoulement dans les hautes-terres et une émergence dans les vallées. La modélisation montre que des âges de plusieurs milliers d'années peuvent effectivement être atteints pour les eaux qui circulent en profondeur ou ont de longs cheminements entre leur zone de recharge et de résurgence.

Tableau 4.8 : Synthèse des contextes hydrogéologiques de l'Estrie

Nom du contexte	Vallées appalachiennes	Hautes-terres appalachiennes
Localisation	Présent dans les grandes vallées des principaux cours d'eau : Saint-François, Chaudière et autres cours d'eau au sud-est de la région d'étude	Secteurs hors des vallées : à l'ouest de la MRC du Granit, MRC de Memphrémagog et MRC du Val-Saint-François
Topographie (Livrable n° 1)	Vallées généralement entre 200 et 250 m d'élévation, sauf la vallée de la Chaudière qui est à environ 400 m	Zone de plateaux et de collines/montagnes arrondies, incisée par un réseau orthogonal de grandes vallées. Altitude généralement au-dessus de 225 m et allant à plus de 600 m d'élévation
Hydrographie (Livrable n° 5)	Vallées des principaux cours d'eau de la région, surtout les rivières Saint-François et Chaudière	Nombreux cours d'eau, mais mineurs, ainsi que de grands lacs
Géologie du roc (Livrable n° 13)	Structures complexes, grandes failles régionales et lithologies très variées	Structures complexes, grandes failles régionales et lithologies très variées
Géologie du Quaternaire (Livrable n° 12)	Sédiments fins glaciolacustres en surface	Till de Lennoxville recouvre pratiquement toutes les hautes terres, avec localement des sédiments fluvioglaciaires
Séquence de sédiments quaternaires	Séquence complexe : alluvions, sédiments fins glaciolacustres, sédiments fluvioglaciaires, Till de Lennoxville, Quaternaire ancien (avec plusieurs unités)	Till de Lennoxville pouvant atteindre 10 m mais mince sur les hauts topographiques, localement fluvioglaciaire excédant 5 m
Épaisseur totale des sédiments quaternaires (Livrable n° 15A)	Généralement plus de 10 m et pouvant excéder 80 m d'épaisseur	Généralement < 5 m sur les hauts topographiques mais jusqu'à > 10 m localement
Topographie du roc (Livrable n° 16)	Grandes vallées SO-NE et vallées secondaires perpendiculaires	Plateaux et montagnes (similaire à la topographie du sol)
Aquifères et aquitards	Deux aquifères granulaires potentiels (fluvioglaciaire et Quaternaire ancien)	Aquifère granulaire dans le fluvioglaciaire mais dominé par l'aquifère rocheux
Conductivité hydraulique (K) (m/s)	K des aquifères granulaires de 10^{-7} à 10^{-4} K de l'aquifère rocheux de 10^{-7} à 10^{-4} mais diminuant avec la profondeur	K de l'aquifère rocheux de 10^{-7} à 10^{-4} mais diminuant avec la profondeur
Confinement / Vulnérabilité (Livrables nos 17 & 22A)	Conditions semi-captives et captives dominantes	Conditions généralement libres
Recharge (Livrable n° 27A)	Recharge au roc faible sous 50 mm/an	Recharge au roc régionalement supérieure à 300 mm/an
Zones de recharge (Livrable n° 27B)	Peu de zones de recharge locales	Grandes zones de recharge sur les hauts topographiques
Zones de résurgence (Livrable n° 27B)	Résurgence en bordure des vallées à cause de l'absence de lien direct entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux	Résurgence locale dans les cours d'eau mineurs mais écoulement régional vers les grandes vallées
Patron d'écoulement	Zone d'émergence de l'eau souterraine	Zone de recharge de l'eau souterraine et écoulement vers les vallées
Géochimie	Eau de type « évolué » avec des temps de résidence de plusieurs milliers d'années	Eau de type « recharge » d'âge moderne
Qualité d'eau (Livrables nos 23 & 24)	Dépassements importants de normes de potabilité pour Mn et As et d'objectifs esthétiques pour Fe	Dégradation de qualité d'origine anthropique mais sans dépassements de normes de potabilité

5 RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

5.1 Sources d'approvisionnement en eau

5.1.1 Sources d'approvisionnement en eau municipale

Les données sur les prélèvements en eau municipaux dans la région d'étude du PACES Estrie proviennent du MELCC (2020c). Ces données sont collectées dans le cadre du *Règlement sur la qualité de l'eau potable* pour tous les réseaux de distribution d'eau potable desservant plus de 20 personnes (Québec, 2019). Plusieurs autres sources d'information sur l'utilisation de l'eau ont été utilisées afin compléter les données de la région d'étude (section 5.2). De plus, un sondage sur l'usage de l'eau, réalisé auprès des municipalités par le COGESAF et le COBARIC, a fourni des données complémentaires.

Le tableau 5.1 et la figure 5.1 compilent les réseaux d'approvisionnement en eau municipaux par MRC pour la région d'étude du PACES Estrie. La carte du livrable n° 25 montre les sources, souterraines ou de surface ou mixtes, des réseaux d'approvisionnement municipaux dans la région d'étude. Les données complètes pour chaque municipalité sont présentées dans un fichier Excel à l'annexe 4G. Sur les 97 municipalités comprises dans la région d'étude du PACES Estrie, 49 municipalités possèdent un réseau de distribution d'eau potable alimenté par de l'eau souterraine, 18 réseaux sont alimentés par de l'eau de surface ou mixte, et 30 municipalités n'ont pas de réseau. Dans toutes les municipalités, même celles qui ont des réseaux, une grande partie de la population s'alimente en eau par des puits privés généralement installés dans le roc. Globalement, dans la région d'étude près 73% de la population de 327 781 personnes est approvisionnée en eau à partir des réseaux municipaux. Toutefois, cette statistique est fortement biaisée par le fort taux de population desservie par la ville de Sherbrooke, alors que le taux est plus faible pour toutes les MRC. En plus de ces données sur l'approvisionnement en eau de la population, un portrait plus complet des usages de l'eau est présenté à la section 5.2.

Tableau 5.1 : Réseaux d'approvisionnement en eau municipaux par MRC dans la région d'étude

MRC	Nb	Population totale	Desservie (%)	Superficie (km ²)	Réseau eau souterraine	Réseau eau de surface ou mixte	Sans réseau
Arthabaska	1	137	22	61	1	0	0
Beauce-Sartigan	3	642	21	141	1	0	2
Les Appalaches	7	10 403	65	634	4	1	2
Coaticook	12	18 700	54	1 353	8	1	3
Le Granit	20	22 168	50	2 829	14	0	6
Le Haut-Saint-François	14	22 738	54	2 307	9	0	5
Le Val-Saint-François	18	31 300	40	1 427	3	8	7
Les Sources	4	692	30	125	1	1	2
Memphrémagog	17	51 865	63	1 448	8	6	3
Sherbrooke	1	169 136	92	367	0	1	0
Total	97	327 781	73	10 691	49	18	30

Nb : nombre de municipalités dans la MRC à l'intérieur de la région d'étude du PACES Estrie.

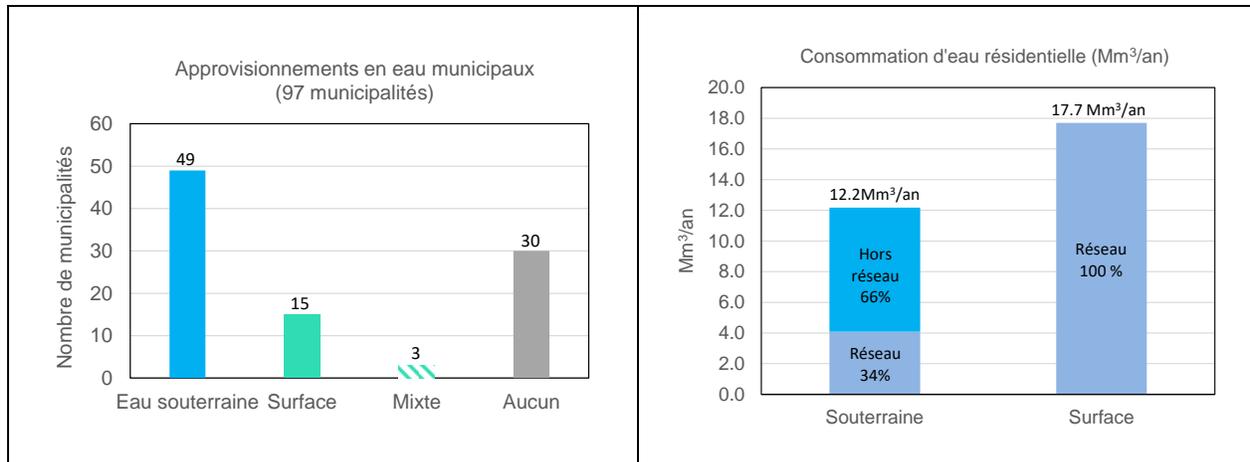


Figure 5.1 : Sources des réseaux d'approvisionnement en eau municipaux (gauche) et consommation d'eau résidentielle (droite; voir section 5.2) dans la région d'étude du PACES Estrie

5.1.2 Problématiques des approvisionnements municipaux

Une enquête de terrain menée auprès de 23 municipalités qui ont été directement impliquées dans la réalisation du PACES Estrie (section 2.3.4) ainsi qu'un sondage en ligne auquel ont répondu 74 municipalités (section 2.3.5) ont permis d'avoir des données plus précises sur les approvisionnements en eau municipaux de la région d'étude du PACES Estrie. Parmi les informations recueillies, il a été possible de brosser un portrait général des problématiques d'approvisionnement en eau rencontrées par les municipalités, tant au niveau de la qualité de l'eau que de la quantité d'eau.

Au niveau des problématiques reliés à la qualité d'eau, une municipalité a relevé un problème causé par l'amiante à des puits privés. Deux municipalités ont signalé des problèmes d'arsenic pour des puits municipaux et deux autres ont relevé ce problème pour des puits résidentiels. Trois municipalités ont documenté des problèmes reliés à des coliformes dans leur puits ou réseau d'approvisionnement qui ont mené à un avis d'ébullition ou à des traitements ponctuels ou continus. Des problématiques de fer ou de manganèse ont été relevées pour des puits privés par une municipalité et pour des approvisionnements municipaux par quatre municipalités. Une problématique avec une odeur de soufre pour des puits privés a été signalée par une municipalité. Enfin, une contamination de puits privés par des produits pétroliers a nécessité la mise en place d'un aqueduc pour desservir des résidents d'une municipalité. Trois autres municipalités ont indiqué le besoin de procéder à des avis d'ébullition ou de faire de la chloration sans spécifier la problématique en cause.

Plusieurs municipalités ont aussi signalé des problématiques reliées à la quantité d'eau dans le cadre des enquêtes et sondages. Ainsi, douze municipalités ont signalé des baisses de nappe, des manques d'eau ou de la difficulté à fournir à des demandes importantes d'eau pour leurs puits ou réseaux municipaux. Ces problématiques ont mené à de la sensibilisation auprès de la population, à des restrictions d'usage de l'eau pour les usagers desservis par les réseaux ou à l'installation de compteurs d'eau pour réduire les usages. De plus, six municipalités ont souligné des problèmes d'approvisionnement de puits privés dans leur municipalité. De plus, en relation avec les niveaux de nappe très bas à la fin de l'été 2021, le MELCCFP a informé l'équipe du PACES Estrie que plusieurs municipalités de l'Estrie avaient sollicité une rencontre et décrit des problèmes d'approvisionnement de leurs puits municipaux.

5.2 Usage des ressources en eau

5.2.1 Sources et traitement des données

Les données sur les prélèvements en eau municipaux dans la région d'étude du PACES Estrie proviennent du MELCC (2020c). Ces données sont collectées dans le cadre du *Règlement sur la qualité de l'eau potable* pour tous les réseaux de distribution d'eau potable desservant plus de 20 personnes (Québec, 2019). Plusieurs autres sources d'information sur l'utilisation de l'eau ont été utilisées afin de compléter les données de la région d'étude, notamment le ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH), le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) et le projet Radeau 1 (Ageco, 2019). De plus, un sondage sur l'usage de l'eau, réalisé auprès des municipalités par le COGESAF et le COBARIC, a fourni des données complémentaires (section 2.3.5). L'estimation des différents usages d'eau a été réalisée en utilisant la même approche que pour les PACES Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015) et Montérégie-Est (Carrier et al., 2013). Le protocole suivi est documenté à l'annexe 3 alors que la feuille de calcul Excel détaillée est disponible à l'annexe 4G, y compris les usages pour chaque municipalité alors que seulement les usages par MRC sont décrits dans la présente section.

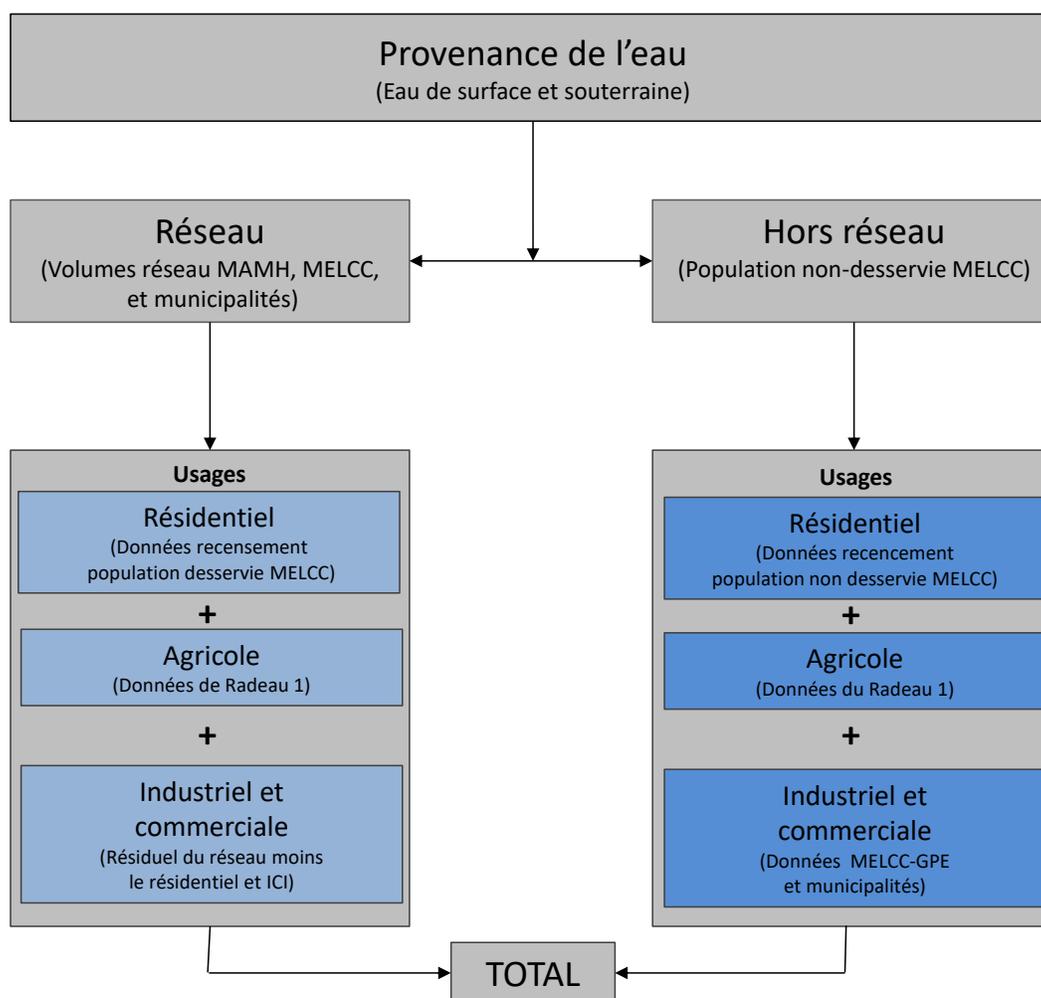


Figure 5.2 : Organisation de l'estimation des usages de l'eau en fonction du type d'utilisation et de la provenance de l'eau (modifié de Lefebvre et al., 2015)

La figure 5.2 présente l'organigramme de la procédure d'estimation des usages de l'eau en fonction du type d'utilisation et de la provenance de l'eau. Les usages de l'eau sont regroupés en 3 catégories : résidentiel, agricole et industriel/commercial/institutionnel (ICI). Le portrait complet de tous les usages à l'échelle municipale est obtenu en compilant les informations permettant de définir la provenance de l'eau, souterraine ou de surface, ainsi que sa distribution, par réseau ou par des puits privés. Les bilans d'eau sont calculés à l'échelle municipale et ensuite regroupés par MRC. Pour les municipalités qui ne sont que partiellement représentées dans la région d'étude, le ratio de la superficie présente dans la région d'étude a été appliqué aux volumes d'eau du bilan. Lorsqu'il n'y a pas de réseau d'aqueduc, l'approvisionnement résidentiel est présumé être fait à partir de l'eau souterraine. Tous les bilans sont comptabilisés en mètre cube par an (m^3/an) et les statistiques sont présentées en million de mètre cube par an (Mm^3/an).

L'utilisation d'eau à des fins résidentielles est comptabilisée par municipalité à partir des données de recensement du MAMH (2020), des données sur les populations desservies par un réseau qui proviennent du MELCC (2020c) ainsi que du sondage réalisé auprès des municipalités. Le bilan de l'eau servant aux usages résidentiels est obtenu en présumant une consommation moyenne journalière de 250 L/personne/jour.

Le bilan de l'utilisation d'eau à des fins agricoles provient de travaux du projet Radeau 1 (Ageco, 2019) qui donnent les usages agricoles totaux (végétaux et animaux) par municipalité et par source d'approvisionnement, soit en eau souterraine ou de surface. Pour le PACES Estrie, il a été présumé qu'il n'y a aucun approvisionnement agricole provenant des réseaux d'aqueduc.

Les données pour les usages industriels, commerciaux et institutionnels (ICI) proviennent du système de gestion des prélèvements d'eau (GPE) obtenu du MELCCFP. Pour les usages hors réseau, les volumes fournis par le GPE sont directement utilisés dans le bilan. Pour les usages réseau, l'approche consiste à calculer le débit restant non utilisé par les autres usages (résidentiel et agricole), ce qui inclut donc les pertes de réseau ainsi que toutes les autres utilisations possibles d'eau du réseau qui ne sont pas considérées par les utilisations résidentielles et agricoles.

5.2.2 Bilan de l'utilisation d'eau

La figure 5.3 illustre les types d'usage de l'eau de surface et de l'eau souterraine dans la région d'étude du PACES Estrie alors que les tableaux 5.2 et 5.3 montrent respectivement les types d'usage total de l'eau et d'usage de l'eau souterraine par MRC. L'usage total de l'eau dans la région d'étude est de 110,2 Mm^3/an , dont 25,2 Mm^3/an (22,9%) provient de l'eau souterraine. La figure 5.3 (gauche) montre que les prélèvements d'eau de surface sont dominés par les usages ICI qui ne proviennent pas d'un réseau de distribution, alors que les usages résidentiels d'eau de surface proviennent tous d'un réseau à l'opposé des usages agricoles qui ne sont pas alimentés par un réseau de distribution. La figure 5.3 (droite) montre que l'approvisionnement hors réseau (privé) représente la majorité des prélèvements d'eau souterraine. Au total, l'usage résidentiel utilise plus de 48% des ressources en eau souterraine, alors que l'usage agricole suit avec 29%.

Le tableau 5.2 montre que l'eau souterraine représente près de 23 % de l'utilisation d'eau totale. Cette faible proportion est reliée au fait que les principales municipalités (Sherbrooke et Magog) s'approvisionnent en eau de surface et qu'il y a un très important usage industriel, commercial et institutionnel (ICI) d'eau qui s'approvisionne aussi en majeure partie en eau de surface. L'usage ICI de l'eau domine en effet les autres usages dans toutes les MRC, sauf dans la MRC de Coaticook où c'est l'usage agricole de l'eau qui domine (58 %). L'usage agricole est aussi important dans les MRC du Haut-Saint-François (57 %) et Les Sources (66 %). Les plus grandes proportions d'usage résidentiel de l'eau sont à Sherbrooke (50 %) et dans la MRC Les Sources (35 %).

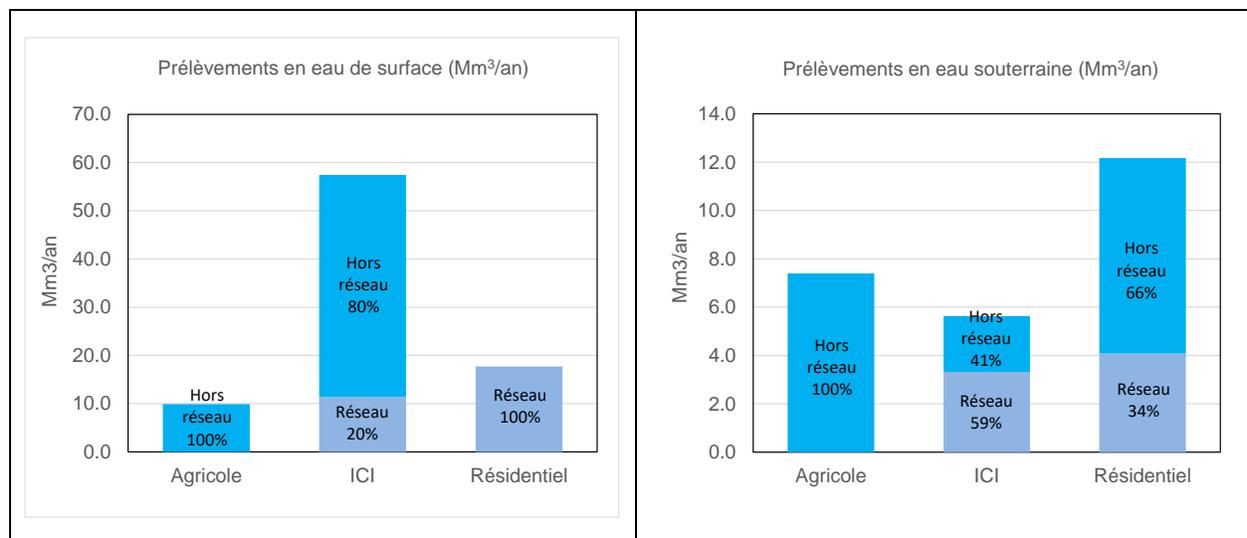


Figure 5.3 : Usages des prélèvements en eau de surface (gauche) et en eau souterraine (droite) dans la région d'étude

Tableau 5.2 : Utilisation totale d'eau par MRC dans la région d'étude

MRC	Usage total (Mm³/an)	Usage eau souterraine (%)	Distribution réseau (%)	Usage agricole (%)	Usage industriel (%)	Usage résidentiel (%)
Arthabaska	0,01	99,4	0,8	0,7	0,0	99,3
Beauce-Sartigan	0,1	59,3	20,7	44,6	2,2	53,2
Les Appalaches	1,8	50,2	65,0	12,5	34,3	53,2
Coaticook	10,3	41,9	53,0	58,1	25,3	16,6
Le Granit	7,7	49,0	47,6	12,5	61,2	26,3
Le Haut-Saint-François	14,4	60,1	49,1	56,9	28,7	14,4
Le Val-Saint-François	16,6	17,1	40,1	7,6	75,3	17,1
Les Sources	0,2	31,0	23,4	65,5	0,0	34,5
Memphrémagog	28,1	11,8	62,7	1,5	81,7	16,8
Sherbrooke	31,1	4,2	91,7	0,3	50,0	49,7
Total PACES	110,2	22,9	72,9	15,7	57,2	27,1

Le tableau 5.3 montre que les volumes les plus importants en eau souterraine sont prélevés dans les MRC du Haut-Saint-François (8,6 Mm³/an), de Coaticook (4,3 Mm³/an) et Le Granit (3,8 Mm³/an). À elles seules, ces MRC prélèvent plus de 66 % des ressources en eau souterraine exploitées à l'échelle de la région d'étude. Il est à noter que pour la ville de Sherbrooke, l'eau souterraine compte pour moins de 5% de l'alimentation totale en eau et qu'elle est utilisée à plus de 98% pour les besoins résidentiels. Par ailleurs, l'eau souterraine est majoritairement utilisée à des fins résidentielles (plus de 50%) pour toutes les MRC sauf pour le haut Saint-François (24 %) et Coaticook (37 %).

Tableau 5.3 : Utilisation d'eau souterraine par MRC dans la région d'étude

MRC	Usage eau souterraine (Mm ³ /an)	Proportion usage total (%)	Distribution réseau (%)	Usage agricole (%)	Usage industriel (%)	Usage résidentiel (%)
Arthabaska	0,01	99,4	0,8	0,1	0,0	99,9
Beauce-Sartigan	0,1	59,3	22,2	6,6	3,6	89,8
Les Appalaches	0,9	50,2	57,3	5,6	19,1	75,3
Coaticook	4,3	41,9	39,2	36,4	26,8	36,9
Le Granit	3,8	49,0	40,1	5,7	40,5	53,8
Le Haut-Saint-François	8,6	60,1	20,2	59,8	16,2	24,0
Le Val-Saint-François	2,8	17,1	20,3	7,5	21,3	71,4
Les Sources	0,05	31,0	7,7	7,1	0,0	92,9
Memphrémagog	3,3	11,8	40,9	5,0	22,8	72,2
Sherbrooke	1,3	4,2	0,0	0,3	1,5	98,3
Total PACES	25,2	22,9	29,4	29,4	22,3	48,3

5.3 Qualité de l'eau souterraine

La section 4.6 a fait le portrait de la géochimie de l'eau souterraine en Estrie et a décrit certains processus géochimiques contrôlant la présence de différents types d'eau dans la région d'étude. La présente section a pour objectif de caractériser la qualité de l'eau souterraine en Estrie. La section 6.3 ira plus en détail dans l'analyse des processus géochimiques à l'origine des fortes concentrations en arsenic et en manganèse retrouvées dans certains secteurs de l'Estrie. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la maîtrise d'Élise Colléau (2020) et plus de détails peuvent être retrouvés dans son mémoire.

La qualité de l'eau souterraine en Estrie a été évaluée sur la base des paramètres normés en vigueur au Québec. Au niveau de la potabilité de l'eau en relation avec les effets sur la santé, les concentrations maximales acceptables (CMA) sont définies dans le *Règlement sur la qualité de l'eau potable* (RQEP) (Québec, 2019). Au niveau des critères esthétiques qui ont un effet sur la perception de l'eau ou son usage, ce sont les objectifs esthétiques (OE) recommandés par Santé Canada (2019a) qui ont été considérés. Tel que mentionné à la section 4.6, la potabilité des eaux souterraines de la région de l'Estrie est principalement affectée par la présence de manganèse (Mn) et d'arsenic (As). La recommandation de Santé Canada (2006) pour une concentration maximale d'arsenic de 0,01 mg/L a été adoptée en tant que CMA dans le RQEP. Toutefois, la recommandation récente de Santé Canada (2019b) au niveau d'une concentration maximale de manganèse de 0,12 mg/L n'avait pas encore été intégrée dans le RQEP lors de la réalisation de nos travaux. Cette recommandation a tout de même été considérée dans le cadre de nos travaux pour évaluer les problèmes de potabilité de l'eau souterraine par rapport au manganèse.

Le tableau 5.4 répertorie les dépassements des critères de potabilité (CMA) et esthétiques (OE) pour les 219 échantillons d'eau souterraine considérés dans la région d'étude du PACES Estrie (voir section 4.6). La proportion des dépassements observés pour chaque groupe d'eau est aussi montrée au tableau 5.4. Les figures 5.4 et 5.5 montrent respectivement la répartition spatiale des échantillons qui présentent un dépassement de critères de potabilité (CMA) et esthétique (OE). Ce sont les dépassements de CMA en manganèse (Mn) de 26% et en arsenic (As) de 8,2% qui représentent les plus importants problèmes de potabilité alors que les dépassements des autres CMA sont relativement peu importants. Ces dépassements en Mn et As se retrouvent surtout dans les eaux évoluées, mais aussi dans le type d'eau de recharge le plus dégradé (B1a). Les dépassements esthétiques (OE) sont surtout reliés au manganèse, au fer ainsi qu'au pH qui est souvent inférieur à 7 dans les groupes d'eau de type recharge.

Tableau 5.4 : Pourcentage de dépassements par groupe d'eau par rapport au nombre total de dépassements (en gras : % le plus élevé) (modifié de Colléau, 2020)

Critère	Paramètres	Norme (mg/L)	Dépassements		% des dépassements par rapport au nombre total de dépassements							
			Nombre	%	A2b	B1b1	A2a	B1a	A1	B2b	B1b2	B2a
CMA	As	0.01	18	8.2%	0	0	0	16.7	5.6	27.8	38.9	11.1
	Cd	0.005	1	0.5%	0	0	100	0	0	0	0	0
	Mn	0.12	57	26.0%	1.8	0	1.8	28.1	0	33.3	24.6	10.5
	NO ₂ ⁻ & NO ₃ ⁻	10	2	0.9%	0	50	50	0	0	0	0	0
	U	0.02	3	1.4%	0	0	0	0	0	0	66.7	33.3
OE	Cl ⁻	250	2	0.9%	0	0	0	100	0	0	0	0
	Fe	0.3	37	16.9%	0	0	0	37.8	0	32.4	18.9	10.8
	Mn	0.02	111	50.7%	1.8	0	8.1	16.2	0	30.6	26.1	17.1
	S ²⁻	0.05	9	4.1%	0	0	0	0	11.1	33.3	44.4	11.1
	pH	<7 ou >10.5	47	21.5%	42.6	12.8	12.8	14.9	0	12.8	4.3	0

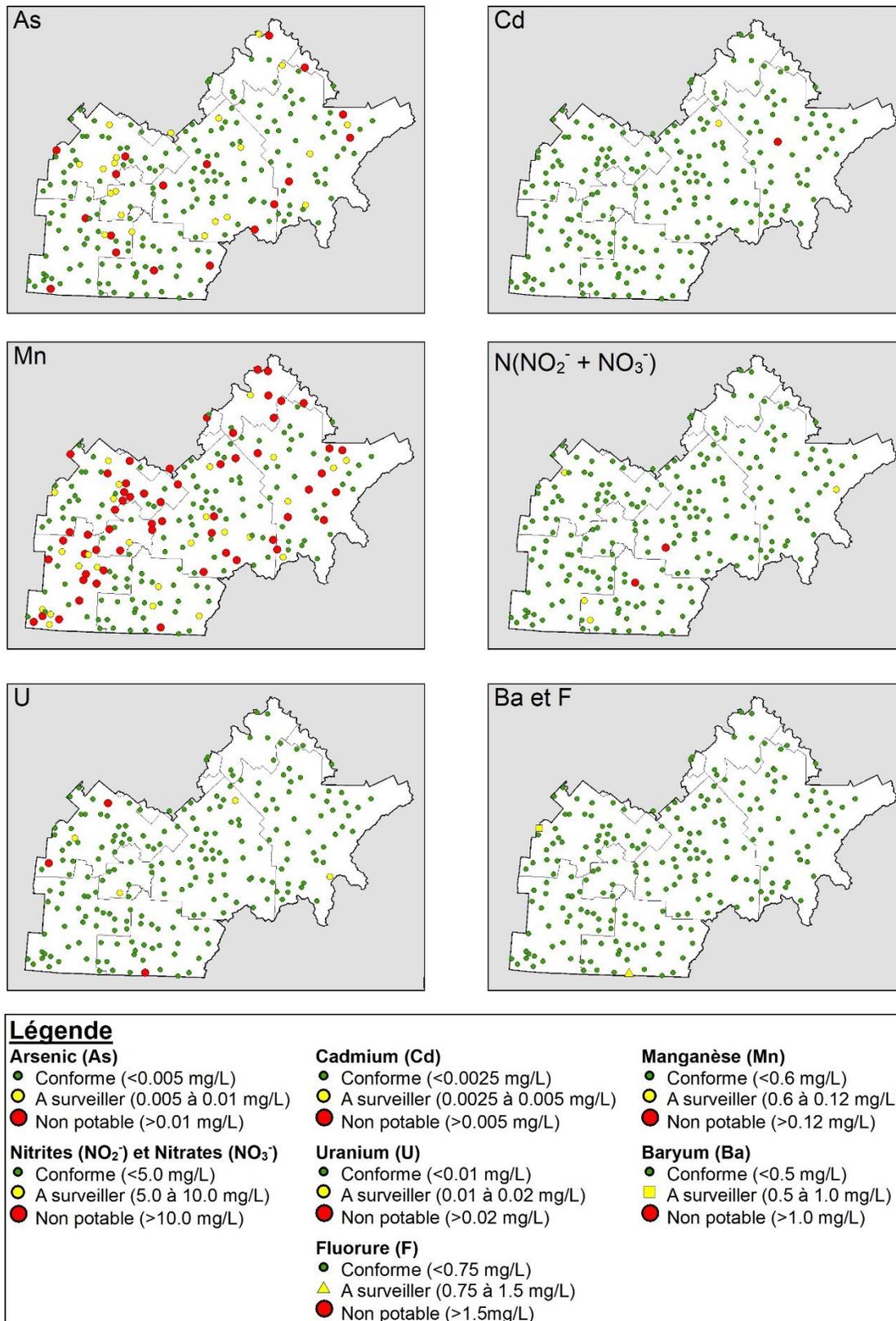


Figure 5.4 : Répartition des dépassements des critères de potabilité (tiré de Colléau, 2020)

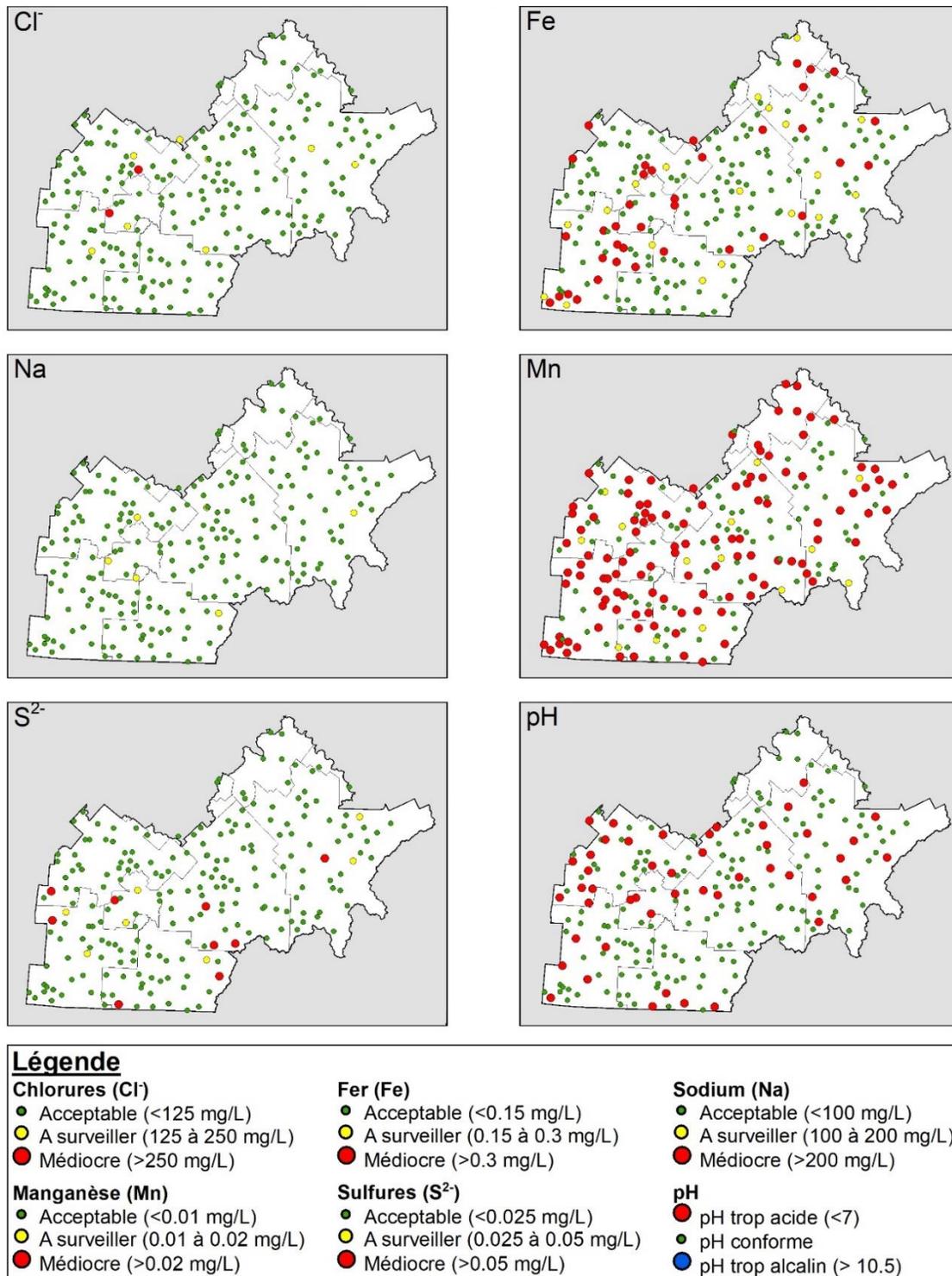


Figure 5.5 : Répartition des dépassements de critères esthétiques (tiré de Colléau, 2020)

Les figures 5.4 et 5.4 montrent la répartition spatiale des dépassements de normes de potabilité (CMA) et esthétiques (OE), respectivement, ainsi que les fortes concentrations représentant la moitié de la norme pour le paramètre cartographié. Les cartes montrent aussi les limites des MRC de la région d'étude afin de fournir des repères géographiques.

Au niveau des critères de potabilité (CMA), la figure 5.4 montre que des dépassements ou de fortes concentrations en manganèse se retrouvent principalement dans les MRC du Val-Saint-François ainsi que de Memphrémagog, ainsi que plus localement dans les vallées de la région, notamment dans la vallée de la rivière Chaudière dans la MRC du Granit. La répartition des dépassements ou fortes concentrations en arsenic est similaire à celle du manganèse, mais avec des secteurs moins étendus et des proportions plus restreintes de dépassements. Le nombre de dépassements ou de fortes concentrations des autres paramètres considérés en relation avec la potabilité ne permet pas de définir des secteurs plus problématiques.

Relativement aux critères esthétiques (OE), la figure 5.5 indique que c'est à nouveau le manganèse qui est le plus problématique, avec des secteurs plus nombreux avec des dépassements ainsi qu'une proportion plus grande de dépassements par rapport aux secteurs où les normes de potabilité du manganèse étaient dépassées (figure 5.4). Le fer est l'autre paramètre problématique au niveau esthétique et ses fortes concentrations sont souvent dans les mêmes secteurs où il y avait des dépassements de CMA pour l'arsenic ou le manganèse (figure 5.4). Enfin, les dépassements de critères esthétiques pour le pH se retrouvent dans les zones de recharge, surtout dans la moitié nord-ouest de la région d'étude. Les autres critères esthétiques représentés à la figure 5.5 (Cl, Na, S²⁻) ont des dépassements plus sporadiques et peuvent être associés à des impacts anthropiques dans le cas du Cl et du Na.

Globalement, l'évaluation de la qualité de l'eau souterraine montre que son niveau d'évolution a une incidence sur la qualité, particulièrement sur la présence naturelle d'arsenic et de manganèse. La concentration maximale acceptable (CMA) en arsenic de 0,01 mg/L pour l'eau potable a été excédée pour 8,2% des échantillons du PACES Estrie. Quant à la recommandation de CMA de 0,12 mg/L pour le manganèse, elle est dépassée pour 26% des eaux échantillonnées. L'arsenic et le manganèse représentent donc des problématiques importantes de qualité d'eau et il est nécessaire de sensibiliser la population à ces problématiques, particulièrement les propriétaires de puits privés. La section 6.3 documente les travaux spécifiques qui ont été réalisés afin de mieux comprendre les conditions qui contrôlent la présence d'arsenic et de manganèse dans la région d'étude.

5.4 Qualité de l'eau de surface

Le MELCCFP maintient un réseau de suivi qui permet l'échantillonnage d'eau de surface et dont les résultats analytiques alimentent la *Banque de données sur la qualité du milieu aquatique* (BQMA) (MELCC, 2020b). La BQMA contient notamment des résultats analytiques sur les nitrites et nitrates (N-NO₂ et N-NO₃) ainsi que le phosphore total dissous (P_{tot} dissous) qui peuvent donner un aperçu de la présence de contaminants d'origine agricole dans les eaux de surface de la région d'étude. Pour les stations de suivi, la BQMA fournit aussi les valeurs de l'indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau, nommé IQBP, qui donne une indication des utilisations possibles de l'eau de surface. Ces paramètres étaient disponibles jusqu'à 2020 à partir soit de l'année 2000 ou de l'année 2009. Ces données ont été analysées pour établir un portrait sommaire de la qualité de l'eau des principaux cours d'eau de la région d'étude et de l'évolution potentielle de cette qualité. Le COGESAF réalise un portrait beaucoup plus détaillé de la qualité d'eau de surface grâce à un suivi de qualité d'eau de plusieurs lacs de la région d'étude.

5.4.1 Sources de données

Seules les données provenant des stations d'échantillonnage localisées sur les cours d'eau de la région d'étude pour les bassins versants principaux (de niveau 1) des rivières Chaudière, Saint-François et Richelieu ont été compilées. Les données disponibles pour les stations de suivi sur les autres cours d'eau n'étant pas suffisamment complètes pour y effectuer une analyse significative. La localisation des stations de suivi considérées est présentée sur la carte du livrable n° 26 dans l'atlas hydrogéologique. Seules les stations avec dix enregistrements ou plus ont été prises en compte pour l'analyse décrite dans la présente section. Le tableau 5.5 résume les caractéristiques des stations de suivi. Pour simplifier le texte et les graphiques des identifications (ID) ont été assignées aux stations. Ainsi une station est disponible dans la région d'étude pour le bassin de la rivière Richelieu, neuf (9) stations pour le bassin de la rivière Saint-François et une station pour le bassin de la rivière Chaudière. Dans le cas de la rivière Saint-François, l'ordre des stations dans le tableau 5.5 est d'amont vers l'aval des bassins versants à l'intérieur de la zone d'étude. De plus, pour le grand bassin de la rivière Saint-François, six secteurs ont été considérés afin d'associer les stations présentes dans le même sous-bassin versant. Ces secteurs sont les mêmes que ceux utilisés par le COGESAF et ils sont aussi ordonnés de l'amont du bassin de la rivière Saint-François vers son exutoire dans la région d'étude :

- Le secteur du lac Saint-François et de la rivière au Saumon (station SF9; au Saumon) se trouve le plus à l'est de la région d'étude;
- Le secteur de la rivière Eaton est au centre de la région d'étude mais n'a pas de station de suivi de la qualité retenu pour notre étude;
- Le secteur de la rivière Massawippi est à la limite sud de la région d'étude et comprend les stations SF3 (Coaticook) et SF4 (Massawippi);
- Le secteur de la rivière Magog et Sherbrooke est à l'ouest de la région d'étude et comprend à l'ouest les stations SF1 (Magog) et SF2 (aux Cerises) et au centre nord les stations SF5 (Saint-François), SF6 (Magog) et SF7 (Saint-François);
- Le secteur de Windsor-Ulverton est au nord-ouest de la région d'étude et comprend la station SF8 (Saint-François) qui est la plus en aval du bassin de la rivière Saint-François de toutes les stations considérées dans nos travaux;
- Le secteur de L'Avenir-Lac Saint-Pierre est situé hors de la région d'étude et aucune station n'a été considérée pour ce secteur.

Tableau 5.5 : Stations considérées pour le suivi de la qualité d'eau de surface

Cours d'eau	ID (no)	Municipalité	Lat.	Long.	Nb.	Début	Fin
Bassin de la rivière Richelieu (Baie Missisquoi)							
Missisquoi	R1 (03040108)	Potton	45.01	-72.39	331	1998-10-14	2020-10-06
Bassin de la rivière Saint-François							
Magog	SF1 (03020073)	Magog	45.26	-72.15	344	1998-05-03	2020-10-14
aux Cerises	SF2 (03020187)	Magog	45.28	-72.16	359	1998-05-04	2020-10-14
Coaticook	SF3 (03020333)	Waterville	45.31	-71.88	229	2007-05-07	2020-10-14
Massawippi	SF4 (03020082)	Sherbrooke	45.36	-71.85	361	1998-05-03	2020-10-14
Saint-François	SF5 (03020040)	Sherbrooke	45.36	-71.84	360	1998-05-03	2020-10-14
Magog	SF6 (03020176)	Sherbrooke	45.39	-71.89	369	1998-05-04	2020-10-14
Saint-François	SF7 (03020035)	Sherbrooke	45.47	-71.94	374	1998-05-04	2020-10-14
Saint-François	SF8 (03020081)	Richmond	45.65	-72.14	356	1998-07-05	2020-10-12
au Saumon	SF9 (03020042)	Weedon	45.68	-71.40	363	1998-05-04	2020-10-05
Bassin de la rivière Chaudière							
Chaudière	Ch1 (02340006)	Lac-Drolet	45.69	-70.78	366	1998-05-03	2020-10-13

5.4.2 Nitrites, nitrates et phosphore

Les figures 5.6 à 5.10 illustrent l'évolution des concentrations moyennes annuelles en nitrites et nitrates (exprimées en mg d'azote (N)) pour des stations d'échantillonnage localisées sur les cours d'eau des principaux bassins versants (niveau 1) des rivières Chaudière, Saint-François et Richelieu. L'ordre des graphiques illustre les concentrations observées de l'amont à l'aval pour le bassin de la rivière Saint-François.

Les figures 5.6 à 5.8 montrent les concentrations pour les stations les plus en amont des trois bassins. On constate que les concentrations en nitrites et nitrates sont faibles, sous 0,2 ou même 0,1 mg/L, et demeurent stables ou montrent même une légère tendance à la baisse pour les dernières années. La figure 5.9 montre les concentrations pour les stations en position intermédiaire dans le bassin de la rivière Saint-François. Par rapport aux graphiques des figures précédentes, on note des concentrations plus importantes et qui augmentent de l'amont vers l'aval. Les concentrations sont plus importantes pour les stations SF3 et SF4 qui sont en aval d'importantes terres agricoles dans la MRC de Coaticook, ce qui montre un impact des activités agricoles sur la qualité de l'eau des cours d'eau. La figure 5.10 montre les concentrations mesurées pour la station la plus en aval du bassin de la Saint-François dans la région d'étude. Les concentrations observées ont des valeurs intermédiaires par rapport aux concentrations des stations à la figure 5.9 qui sont plus en amont, ce qui montre l'effet d'un possible mélange des eaux provenant des différents cours d'eau en amont de la station SF8.

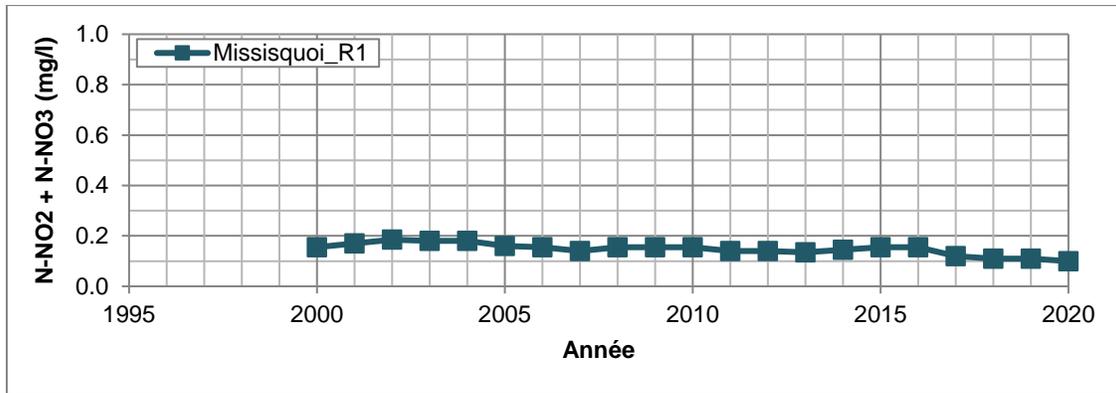


Figure 5.6 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N-(NO₂+NO₃) pour la station R1 dans le bassin de la rivière Richelieu

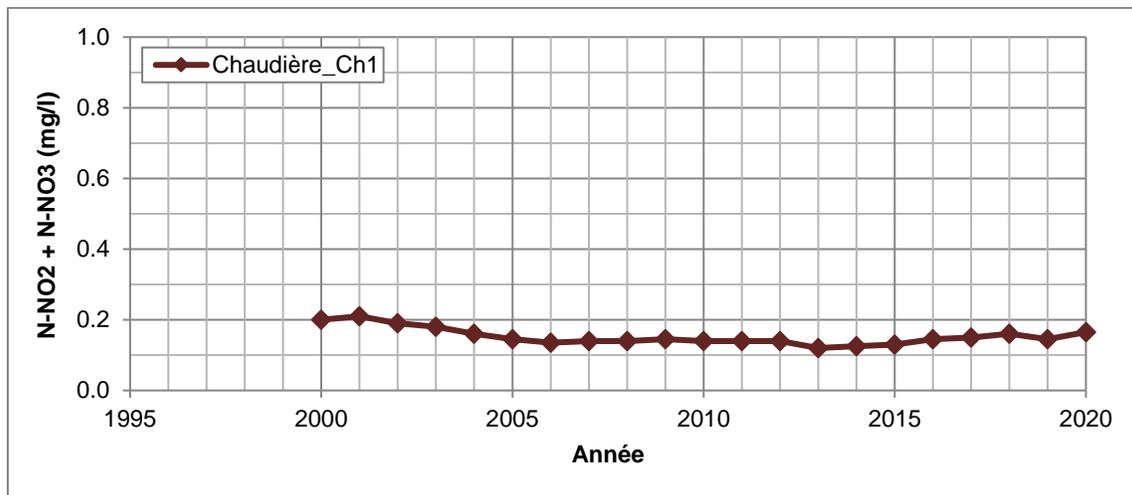


Figure 5.7 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N-(NO₂+NO₃) pour la station CH1 dans le bassin de la rivière Chaudière

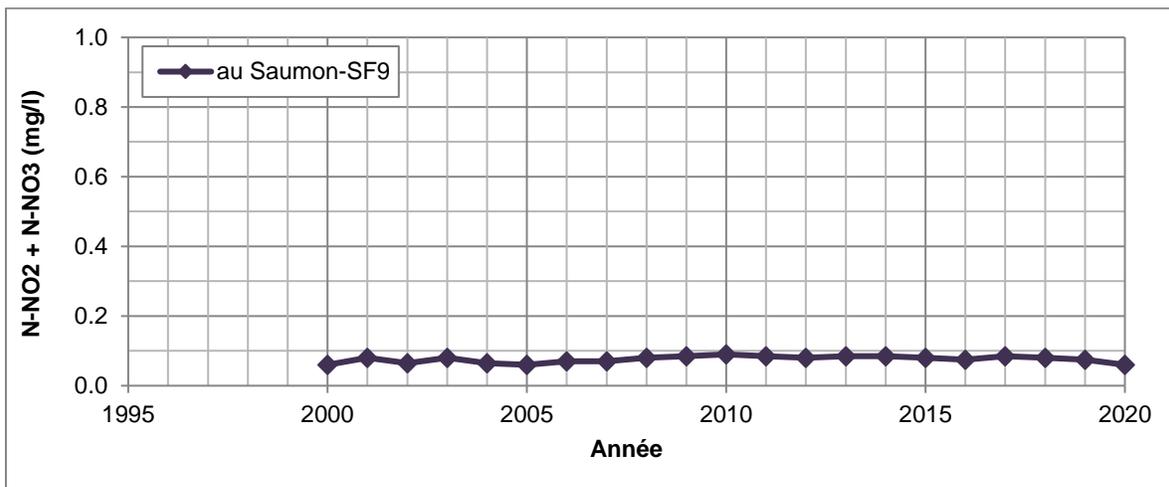


Figure 5.8 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N-(NO₂+NO₃) pour la station SF9 en amont du bassin de la rivière Saint-François

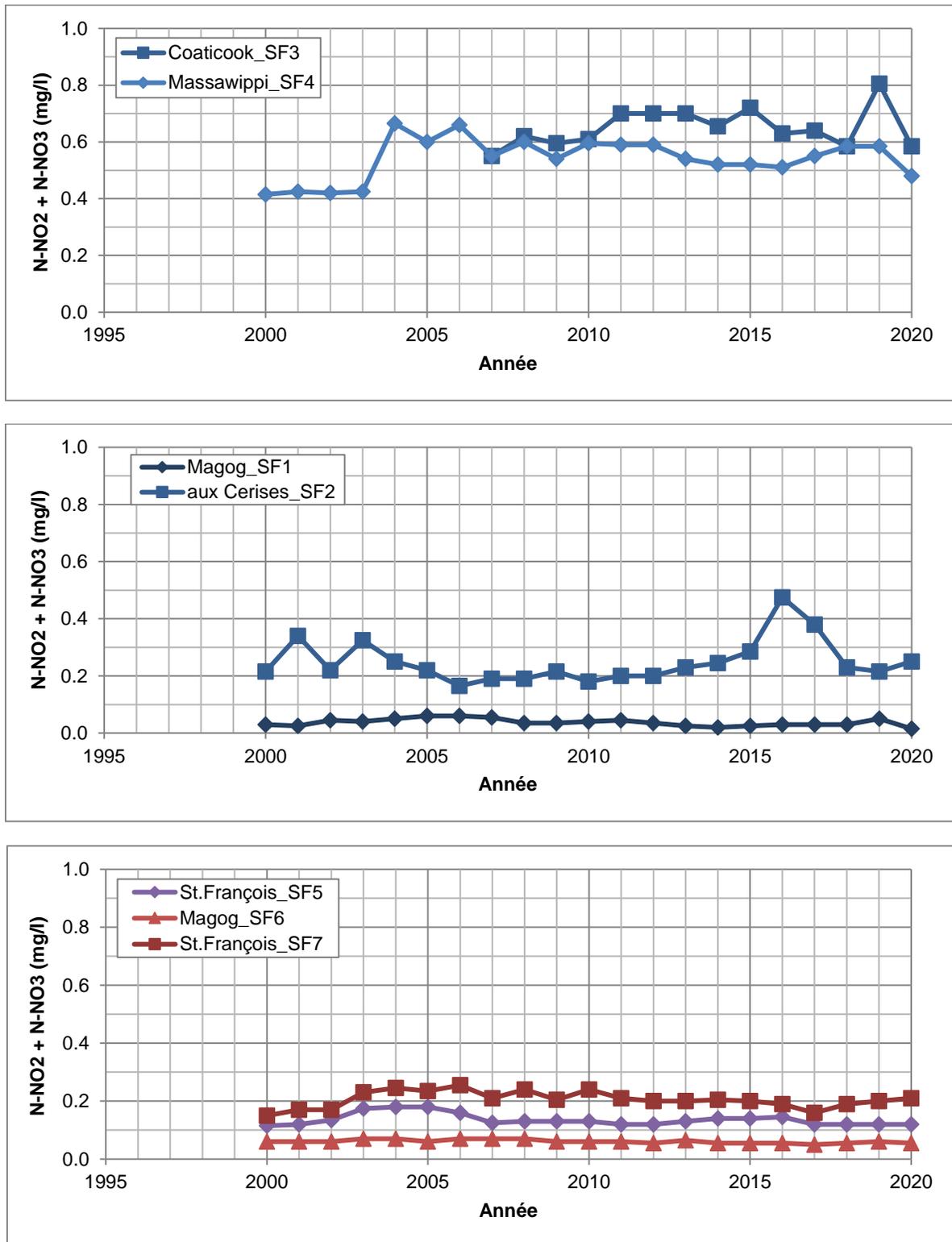


Figure 5.9 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N-(NO₂+NO₃) pour des stations à des positions intermédiaires du bassin de la rivière Saint-François

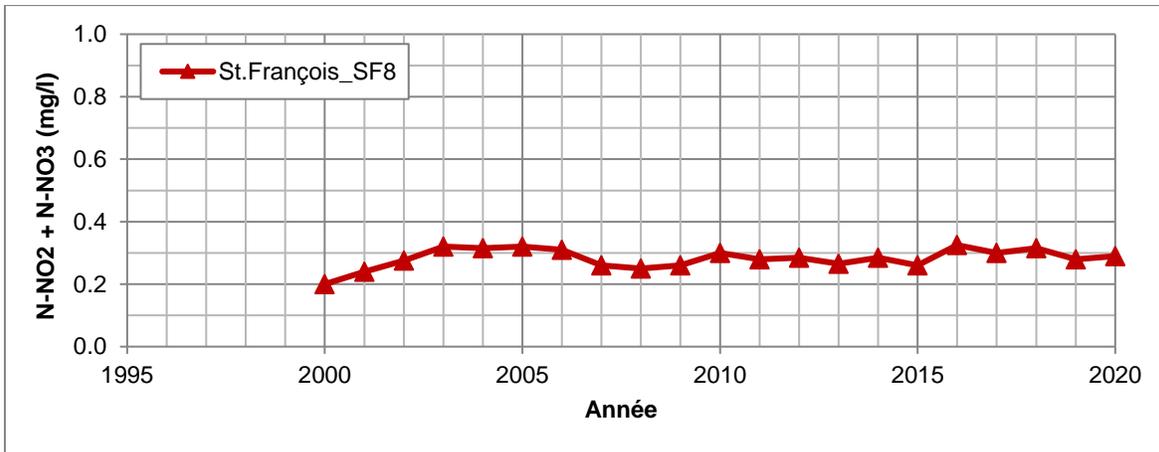


Figure 5.10 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en nitrites et nitrates (N- (NO_2+NO_3)) pour la station la plus en aval dans le bassin de la rivière Saint-François

Les figures 5.11 à 5.15 montrent les concentrations moyennes annuelles en phosphore total dissous pour les stations des trois bassins. Contrairement aux concentrations en nitrites et nitrates qui montraient une certaine augmentation de l'amont à l'aval, les concentrations en phosphore total montrent peu d'augmentation, même si les concentrations à la station la plus en aval du bassin de la rivière Saint-François (figure 5.15) a tout de même des concentrations supérieures à celles observées à la station la plus en aval (figure 5.8).

5.4.3 Indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQBF)

L'indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau, nommé IQBP, correspond à une cote adimensionnelle, variant entre 0 et 100, permettant de quantifier la qualité des eaux de surface (Hébert, 1997). La qualité de l'eau définie par l'IQBF a 5 classes :

- **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 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 pour la DBO₅, la saturation en O₂ et le pH dans la base de données du MDDEFP. 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.

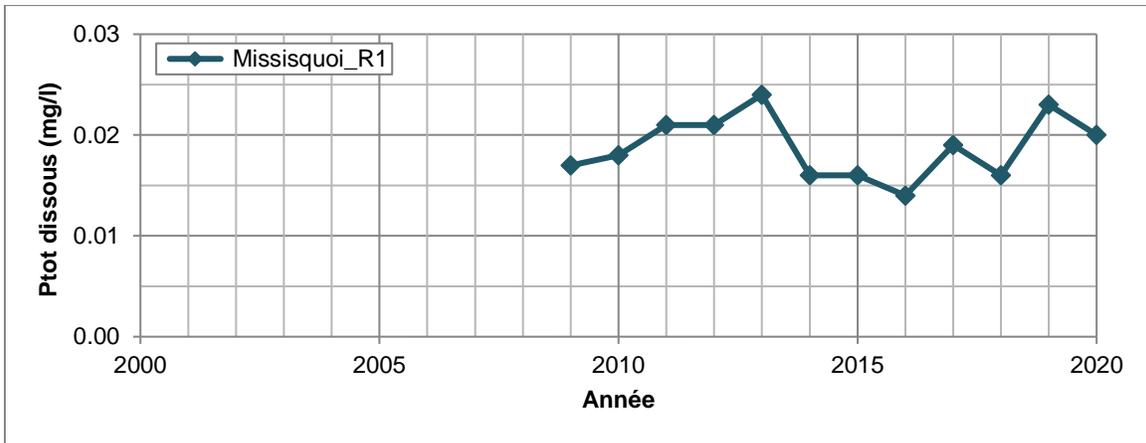


Figure 5.11 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (Ptot dissous) pour la station R1 dans le bassin de la rivière Richelieu

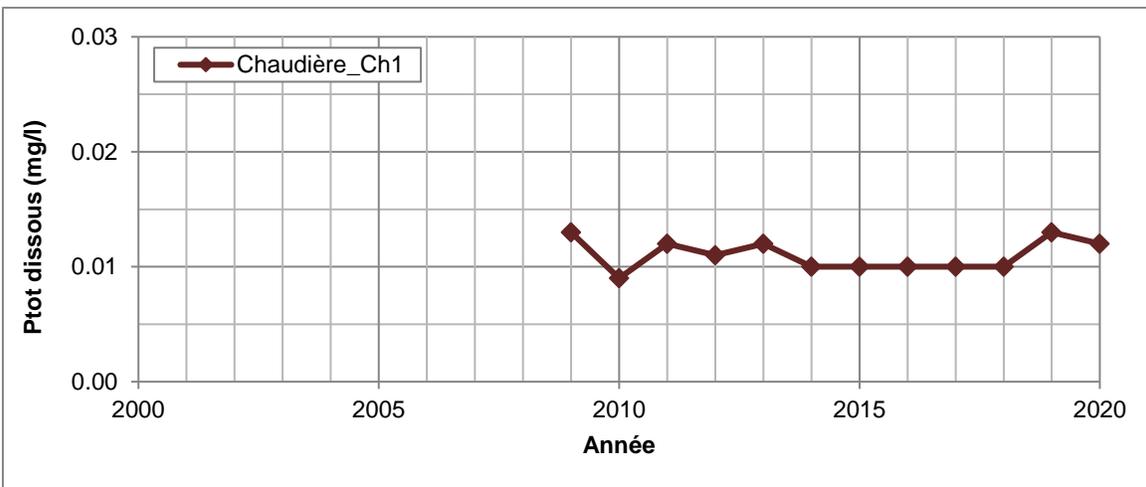


Figure 5.12 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (Ptot dissous) pour la station CH1 dans le bassin de la rivière Chaudière

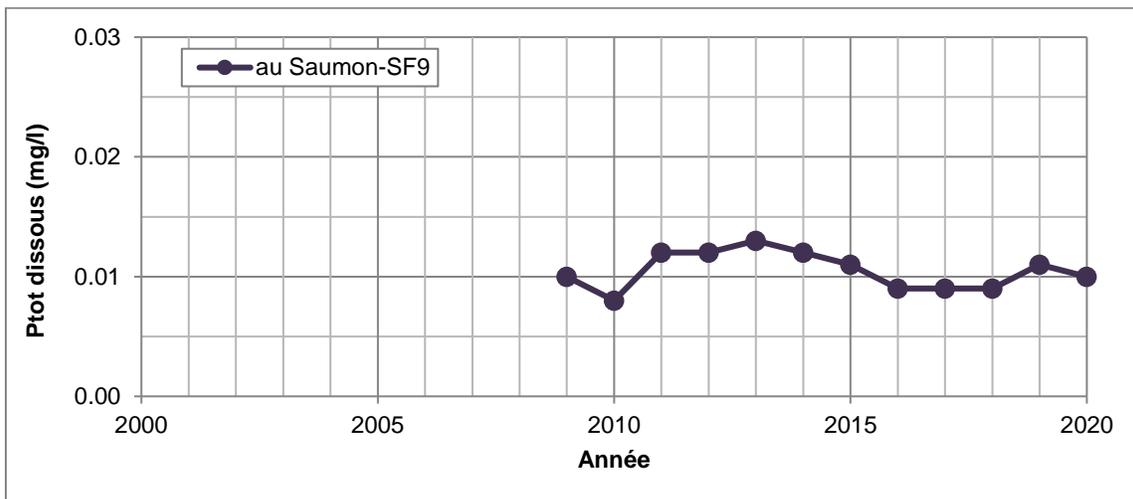


Figure 5.13 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (Ptot dissous) pour la station SF9 en amont du bassin de la rivière Saint-François

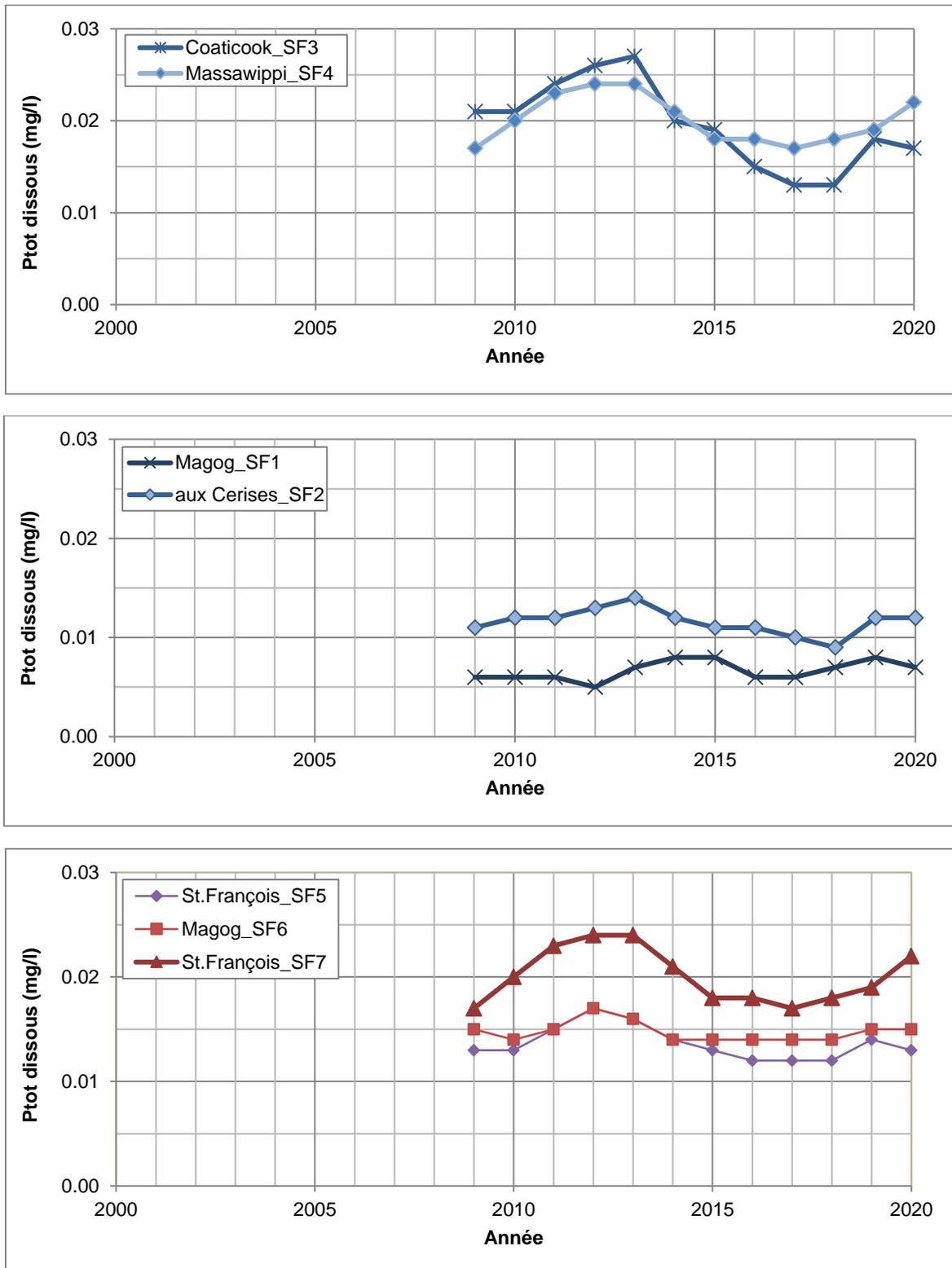


Figure 5.14 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (Ptot dissous) pour des stations à des positions intermédiaires du bassin de la rivière Saint-François

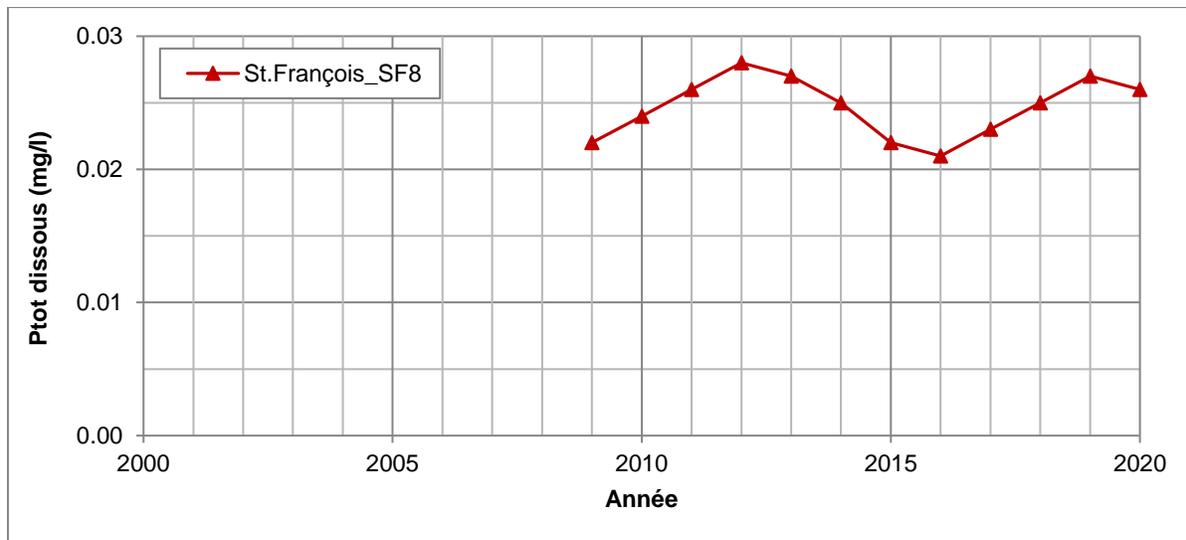


Figure 5.15 : Évolution des concentrations annuelles moyennes en phosphore total dissous (Ptot dissous) pour la station la plus en aval dans le bassin de la rivière Saint-François

Les figures 5.16 à 5.18 montrent les IQBP pour les stations les plus en amont des trois bassins. On constate que les valeurs des IQBP correspondent généralement à la meilleure qualité d'eau (cote A) pour les stations des rivières Chaudière et Saint-François alors que l'eau a parfois une cote légèrement inférieure de B pour la station du bassin de la rivière Richelieu. Les stations à une position intermédiaire dans le bassin à la figure 5.19 montrent qu'il y a eu une certaine dégradation de la qualité d'eau, mais il y a une amélioration notable des cotes depuis environ 2015. La station la plus en aval du bassin de la rivière Saint-François montre à la figure 5.20 que la qualité d'eau telle qu'indiquée par l'IQBF était mauvaise au début des années 2000 (cote D) mais qu'il y a eu une amélioration importante de la qualité globale de l'eau dans le bassin, avec des cotes moyennes annuelles de B depuis 2014.

En conclusion, les indicateurs de qualité d'eau de surface analysés montrent une excellente qualité d'eau de surface en amont des trois bassins versants de niveau 1 présents dans la région d'étude. Toutefois, ces indicateurs montrent bien qu'il y a une certaine dégradation de la qualité de l'eau de surface de l'amont à l'aval du bassin de la rivière Saint-François. Toutefois, cette dégradation s'est atténuée considérablement depuis environ 2015 de sorte que la qualité d'eau à l'exutoire du bassin dans la région d'étude est présentement de bonne qualité (cote B de l'IQBF). Des améliorations seraient toutefois requises dans le bassin de la rivière Coaticook où l'effet des activités agricoles est encore notable au niveau des concentrations en nitrites et nitrates.

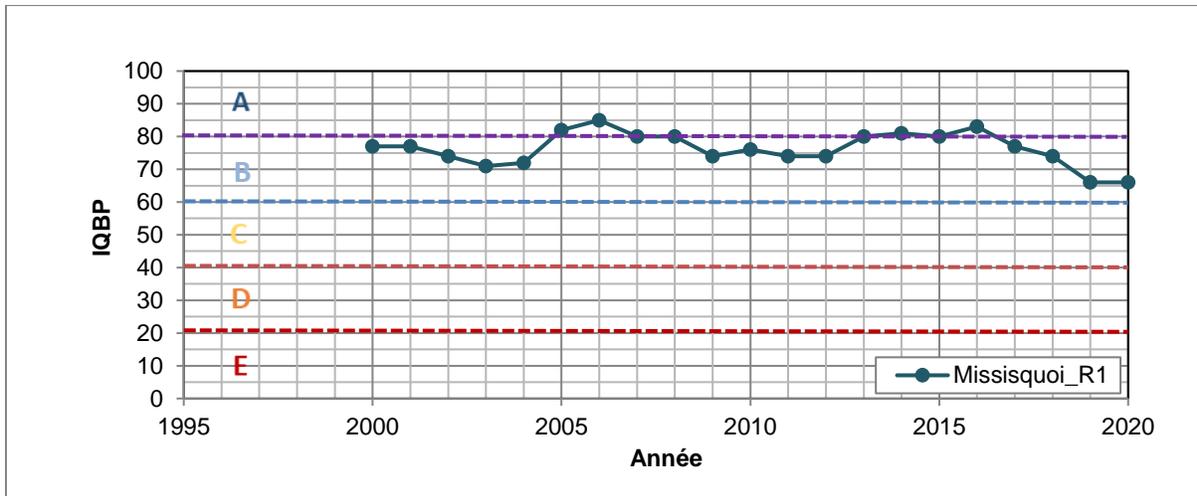


Figure 5.16 : Évolution des IQBP moyens annuels pour la station R1 dans le bassin de la rivière Richelieu

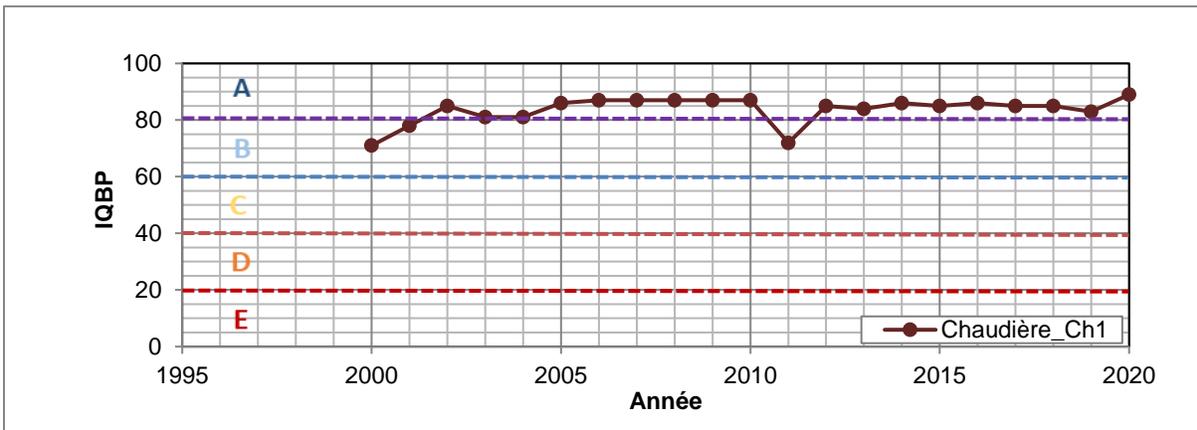


Figure 5.17 : Évolution des IQBP moyens annuels pour la station CH1 dans le bassin de la rivière Chaudière

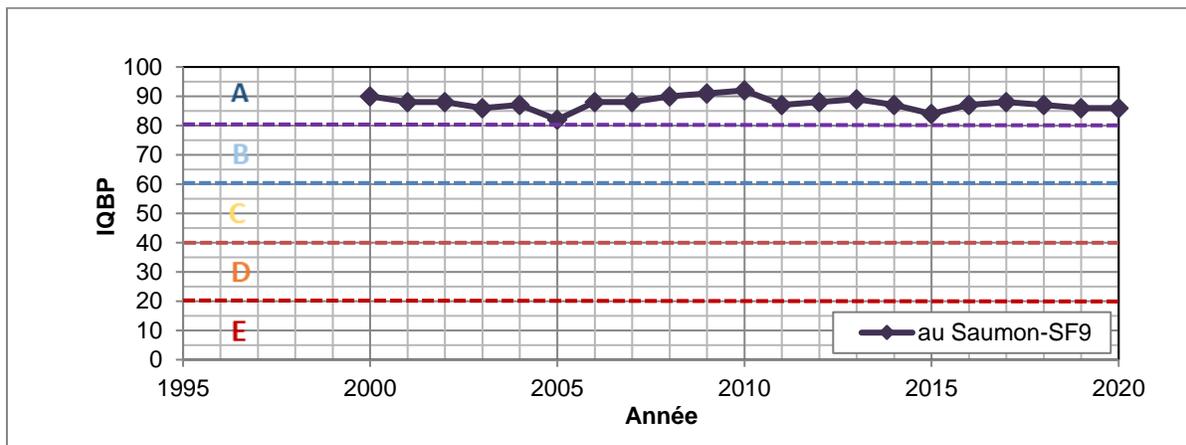


Figure 5.18 : Évolution des IQBP moyens annuels pour la station SF9 en amont du bassin de la rivière Saint-François

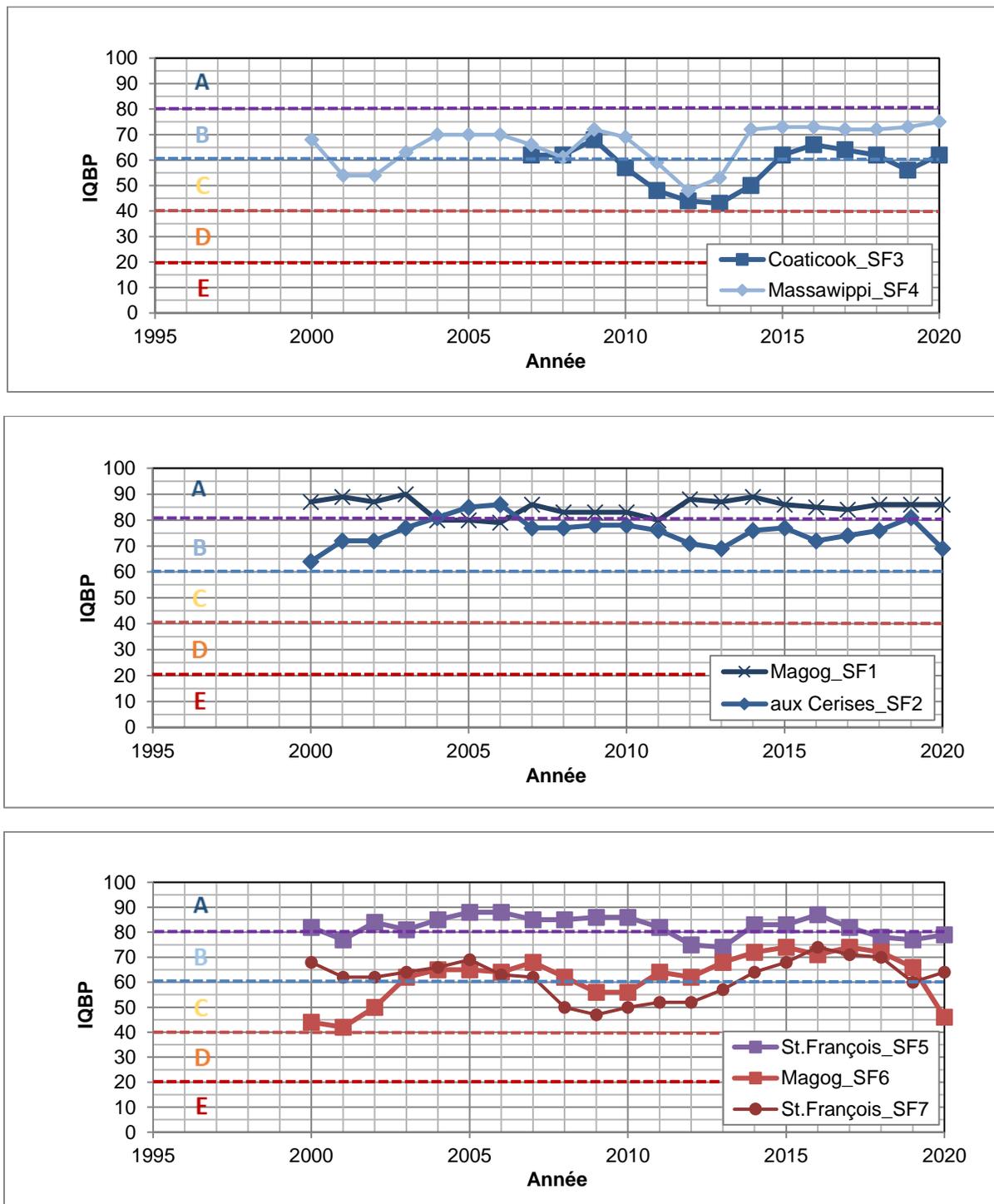


Figure 5.19 : Évolution des IQBP moyens annuels pour des stations à des positions intermédiaires du bassin de la rivière Saint-François

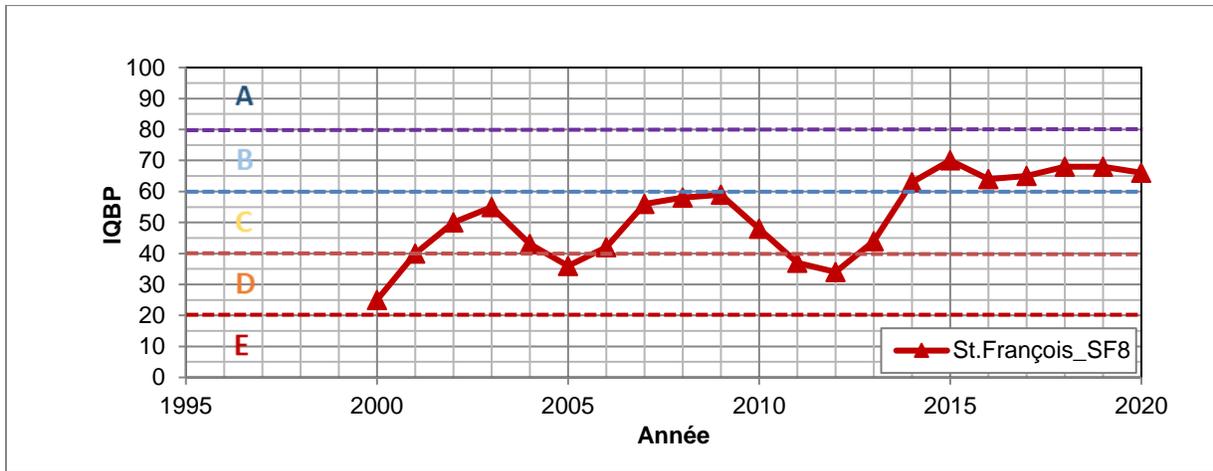


Figure 5.20 : Évolution des IQBP moyens annuels pour la station la plus en aval dans le bassin de la rivière Saint-François

5.5 Gestion durable des ressources en eau souterraine

De nombreux travaux spécifiques au PACES Estrie ont été réalisés afin de soutenir une gestion durable des ressources en eau souterraine dans la région d'étude. La description détaillée de ces travaux est faite dans les autres sections du rapport.

D'abord, des travaux ont été réalisés pour aider à comprendre et à résoudre les questions scientifiques reliées aux ressources en eau souterraine dans la région d'étude. Ainsi, des travaux ont été réalisés afin de mieux définir le potentiel aquifère dans les vallées enfouies de l'Estrie (section 6.1). Ces travaux étaient d'autant plus nécessaires que l'aquifère de roc fracturé ne permet généralement pas d'installer des puits qui ont des débits importants (section 4.1). Ces travaux, ainsi que plusieurs autres du projet, ont grandement profité du développement d'un modèle géologique détaillé de la distribution spatiale des épaisseurs des unités géologiques dans la région d'étude (section 3.2). Ces travaux portant sur le potentiel d'exploitation de l'eau souterraine ont été complétés par des travaux visant à mieux définir et comprendre la problématique naturelle de qualité de l'eau souterraine reliée à la présence d'arsenic et de manganèse (section 6.3). De plus, des modélisations numériques ont permis d'avoir à la fois une meilleure compréhension de l'écoulement de l'eau souterraine dans le système aquifère et de son incidence sur l'âge de l'eau souterraine qui est fortement reliée à la présence d'arsenic et de manganèse dans l'eau souterraine (section 6.2). Enfin, des travaux définissant le risque de contamination des puits municipaux sur la base d'analyses chimiques et isotopiques a permis de définir l'importance relative de la protection des puits d'approvisionnement en eau (section 6.4).

Comme l'ensemble des projets du PACES réalisés entre 2018 et 2022, le PACES Estrie a profité de quatre ateliers de transfert des connaissances du RQES pendant la réalisation du projet (RQES, 2018, 2020, 2021c et 2022). Toutefois, des travaux spécifiques au PACES Estrie ont été réalisés afin de développer un plan d'actions reliées aux ressources en eau souterraine qui pourra être intégré aux Plans directeurs de l'eau (PDE) des Organismes de bassin versant de la région d'étude (COGESAF et COBARIC) (section 6.5). Ces travaux ont permis des échanges beaucoup plus importants avec les acteurs de l'eau régionaux. Ces travaux ont été poursuivis afin d'accompagner deux MRC de la région d'étude dans l'amorce de l'intégration de l'eau souterraine en aménagement du territoire et l'élaboration des schémas d'aménagement et de développement (SAD) (section 6.6). Les démarches développées en relation avec les PDE et les SAD pourraient servir d'exemples pour la réalisation de démarches similaires dans d'autres régions couvertes par un projet PACES.

Enfin, le PACES Estrie a servi de base à d'autres initiatives. Notamment, un projet Osmoz nommé « Mon propre puits en Estrie » a été amorcé en 2022 afin de soutenir l'échantillonnage de l'eau des puits résidentiels dans deux municipalités présentes dans les secteurs les plus touchés par la présence d'arsenic et de manganèse dans l'eau souterraine. Le MAPAQ a aussi initié des travaux pour soutenir les meilleures pratiques agricoles dans les zones de recharge afin d'assurer leur protection.

5.6 Réseau de surveillance et programme de suivi

La carte du livrable n° 26 montre les localisations des différentes stations de suivi environnemental dans la région d'étude du PACES Estrie. Ces stations comprennent les stations hydrométriques pour mesurer les débits des cours d'eau, les stations d'échantillonnage pour la qualité de l'eau des cours d'eau, les stations météorologiques et les stations de mesure des niveaux d'eau souterraine.

5.6.1 Stations de jaugeage et de qualité des cours d'eau

Suivant l'approche développée par Croteau et al. (2010), les débits des cours d'eau ont été utilisés pour caler les estimations de la recharge faites à l'aide du modèle d'infiltration HELP, comme pour les projets antérieurs (Carrier et al., 2013 ; Lefebvre et al., 2015 ; Raynauld et al., 2018; section 4.3). Le tableau 4.3 a présenté des informations sur les stations de jaugeage des neuf bassins jaugés choisis pour la calibration de HELP. Ces bassins ont été sélectionnés puisqu'ils possèdent une série de mesures suffisamment complète pour servir à la calibration de HELP. De plus, la période de couverture de ces stations chevauche la période de couverture des données météo sur grille disponibles. La section 5.4 a aussi décrit les données disponibles à onze (11) stations de suivi qui alimentent la *Banque de données sur la qualité du milieu aquatique* (BQMA). La localisation de ces stations est aussi indiquée sur la carte du livrable n° 26.

5.6.2 Données météorologiques

Les données météorologiques sont requises pour faire l'estimation de la recharge. Bien que les données des stations météorologiques aient été obtenues du MELCCFP ou soient disponibles via Environnement Canada, il s'avère plus avantageux d'utiliser plutôt les données météorologiques sous forme de grilles. En effet, l'usage des grilles météorologiques évite d'avoir à combler les données manquantes des stations météo. De plus, les grilles météo font une interpolation des conditions entre les stations météorologiques et fournissent ainsi des données plus représentatives de la distribution spatiale des conditions météorologiques. La grille produite par Info-Climat a été retenue puisque les données sont comblées pour tous les points de la grille et que les données récentes sont également disponibles (détails à la section 4.3 et à l'annexe 4E). Ces conditions, particulièrement les précipitations, ont une incidence sur la recharge.

5.6.3 Puits d'observation (RSESQ)

Malgré l'importance de l'alimentation en eau souterraine dans la région d'étude et sa grande superficie, on n'y trouvait que 5 puits d'observation du *Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec* (RSESQ) dans le bassin versant de la rivière Saint-François non couvert par les anciens projets PACES. Quatre de ces puits sont au centre du bassin dans la MRC du Haut-Saint-François et le cinquième est au nord de la MRC de Memphrémagog. Quelques puits du RSESQ se trouvent dans des secteurs couverts par des projets PACES antérieurs. Quatre puits d'observation du RSESQ sont présents du côté ouest de la zone cartographiée du PACES Estrie (deux dans la MRC du Val-Saint-François et deux dans la MRC de Memphrémagog). Trois de ces puits avaient été installés dans le cadre du PACES Montérégie Est et un dans le cadre du PACES Nicolet-Bas-Saint-François. Un autre puits est situé à l'extrémité est du lac Aylmer dans la MRC Les Appalaches. Dans le cadre du PACES Estrie, 10 nouveaux puits d'observation du RSESQ ont été mis en place par le MELCCFP à des localisations recommandées par l'équipe de projet afin d'assurer une meilleure couverture de la région d'étude (section 2.3.1).

6 TRAVAUX SPÉCIFIQUES

6.1 Potentiel aquifère dans les vallées enfouies

6.1.1 Problématique et objectifs

Les travaux de caractérisation indiquent une transmissivité limitée pour l'aquifère rocheux fracturé en Estrie (section 4.1; voir aussi la section 6.2). Cependant, les travaux de Caron (2013) sur les dépôts meubles suggèrent qu'il pourrait y avoir un potentiel aquifère plus important dans les épaisses accumulations de sédiments qui peuvent se retrouver sous les vallées de l'Estrie (voir section 3.2). On retrouve d'ailleurs plusieurs puits municipaux captant de l'eau souterraine à partir d'un aquifère granulaire dans les vallées de l'Estrie (section 5.1). Toutefois, les assemblages de sédiments retrouvés dans les vallées sont complexes et les aquifères granulaires qui y sont présents ne sont pas bien caractérisés. Les coupes régionales du livrable n° 14 et la carte du livrable n° 15A montrent que les plus fortes accumulations de dépôts meubles se retrouvent effectivement dans les vallées dont une grande partie est enfouie sous les sédiments (voir l'Atlas hydrogéologique du PACES Estrie). La nature des accumulations de sédiments est complexe, c'est d'autant plus le cas pour l'unité de Quaternaire ancien qui est souvent présente en profondeur à la base des accumulations de sédiments dans les vallées de l'Estrie (Caron, 2013; section 3.2). En effet, cette unité englobe plusieurs sous-unités de dépôts meubles datant d'avant la dernière glaciation et qui n'ont pas été érodées par les derniers glaciers qui ont recouvert la région. Certaines de ces unités de dépôts meubles ont les propriétés hydrauliques d'un aquifère alors que d'autres unités constituent plutôt des aquitards (section 3.2; figure 3.3; tableau 3.4).

Ainsi, des travaux supplémentaires étaient requis pour mieux définir le potentiel aquifère des grandes accumulations de sédiments retrouvées dans les vallées enfouies de l'Estrie. Même si plusieurs municipalités s'approvisionnent à partir d'un aquifère granulaire, les caractéristiques hydrogéologiques des sédiments ne sont pas bien connues. Conséquemment, les principaux objectifs des travaux étaient de mieux définir les caractéristiques hydrogéologiques des vallées enfouies et d'identifier les secteurs avec un plus fort potentiel aquifère. Les résultats obtenus pourront ainsi guider de futures recherches en eau souterraine en Estrie. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet de fin d'études de Raphaël Mathis (2020) à la fin de son baccalauréat en génie géologie à l'Université Laval. Le rapport documentant ces travaux plus en détail se retrouve à l'annexe 4H.

6.1.2 Méthodologie

Tout d'abord, des informations ont été extraites de rapports de consultants en hydrogéologie sur des puits d'approvisionnement municipaux en Estrie, incluant les caractéristiques physiques des puits, la stratigraphie des forages et les propriétés hydrauliques estimées par des essais de pompage. Afin d'uniformiser les différentes descriptions des sédiments, les descriptions stratigraphiques des forages ont été simplifiées et standardisées selon un code de matériaux (code CGQ; Parent et al., 2008). Par la suite, des hydrofaciès ont été définis pour regrouper les sédiments avec des propriétés hydrogéologiques semblables en fonction de la granulométrie.

Six hydrofaciès ont ainsi été définis, soit HF1, HF2, HF3, HF4, HFX et ROC. HF1 regroupe des argiles, des silts et des silts sableux, HF2 des sables silteux, HF3 des sables à grains fins à moyens et HF4 des sables grossiers et du gravier. Les hydrofaciès HF1 à HF4 représentent ainsi une gradation de la conductivité hydraulique, allant de mauvaise pour HF1 à très bonne pour HF4. L'hydrofaciès HFX correspond au till qui est composé d'une granulométrie variable (diamicton) et possède généralement une faible perméabilité. L'hydrofaciès ROC représente tout simplement l'aquifère rocheux sans distinguer les différentes lithologies.

Après l'attribution des hydrofaciès, des conductivités hydrauliques issues des essais de pompages des rapports de consultants ont été assignées à l'hydrofaciès de l'unité dominante située au niveau de la crépine du puits. Par la suite, une analyse statistique a été réalisée pour chaque hydrofaciès et aussi pour chaque unité quaternaire afin de définir la plage de leur conductivité hydraulique.

Finalement, les hydrofaciès attribués aux couches géologiques ont été comparés aux unités du modèle 3D des dépôts quaternaires (Caron, 2013) afin d'utiliser par la suite ce modèle pour définir le potentiel aquifère. Ainsi, puisque le modèle géologique donne la distribution des unités pour l'ensemble de la région d'étude, la mise en relation des résultats ponctuels aux puits avec le modèle géologique permet de faire l'évaluation du potentiel aquifère pour toute la région. La comparaison des forages a été faite avec l'ancien modèle géologique avant sa mise-à-jour dans le cadre du PACES Estrie (voir les sections 3.2.2 et 3.2.4).

D'abord, les forages ont été classés selon leur potentiel aquifère qui a été établi à partir des informations stratigraphiques. Ensuite, les forages ayant un potentiel aquifère négligeable ont été comparés au modèle géologique afin de déterminer le pourcentage de ces forages qui se trouvent dans une zone avec une épaisseur totale de sédiments supérieure à 10 m ainsi que dans une zone avec une épaisseur de sédiments du Quaternaire ancien supérieure à 5 m. Le même exercice a été effectué pour les forages ayant un potentiel aquifère afin de voir la proportion des forages ayant un potentiel aquifère situés dans les deux zones. Par la suite, des statistiques sur les hydrofaciès perméables et sur les unités quaternaires ont été produites afin d'avoir une meilleure idée des tendances définies par les forages. Finalement, à l'aide de cette analyse statistique, une carte des cibles d'exploration en eau souterraine dans les dépôts meubles basée sur l'épaisseur de quaternaire ancien du modèle géologique a été produite de façon à indiquer les secteurs avec un bon potentiel aquifère. Ces secteurs pourraient être ciblées lors de futures recherches en eau visant l'installation de puits avec des débits importants.

6.1.3 Principaux résultats

Suite à l'attribution des conductivités hydrauliques des essais de pompage à l'hydrofaciès dominant au niveau de la crépine du puits, des statistiques ont été réalisées. Le tableau 6.1 présente ainsi les statistiques de la conductivité hydraulique pour les hydrofaciès HF4, HFX et ROC. La figure 6.1 montre graphiquement la distribution des valeurs de conductivité hydraulique associées à ces trois mêmes hydrofaciès. Les hydrofaciès HF1, HF2 et HF3 n'ont pas été représentés puisqu'aucune donnée n'est liée à ces classes car il n'est pas pertinent de faire des essais de pompages dans des couches avec des perméabilités faibles.

Tableau 6.1 : Statistiques du log de la conductivité hydraulique (K , m/s) des hydrofaciès

Hydrofaciès	Nombre	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Écart-type
HF4	12	-4.8	-2.5	-3.6	-3.5	0.66
HFX	2	-4.4	-3.4	-3.9	-	-
ROC	29	-6.5	-3.7	-5.2	-5.2	0.80

Le tableau 6.1 indique une conductivité moyenne de 2.5×10^{-4} m/s ($10^{-3.6}$) pour l'hydrofaciès HF4 et de 6.3×10^{-6} m/s ($10^{-5.2}$) pour l'aquifère rocheux. Une valeur aberrante jugée trop élevée de la conductivité hydraulique du roc n'a pas été considérée pour le calcul des statistiques. Ces moyennes suggèrent que les dépôts meubles classés comme étant représentatifs de l'hydrofaciès HF4 possèdent un potentiel aquifère beaucoup plus grand que le roc. Aussi, le tableau 6.1 indique seulement deux valeurs de conductivité hydraulique disponibles pour l'hydrofaciès HFX (till ou diamicton), ce qui ne permet pas une interprétation des statistiques pour cet hydrofaciès.

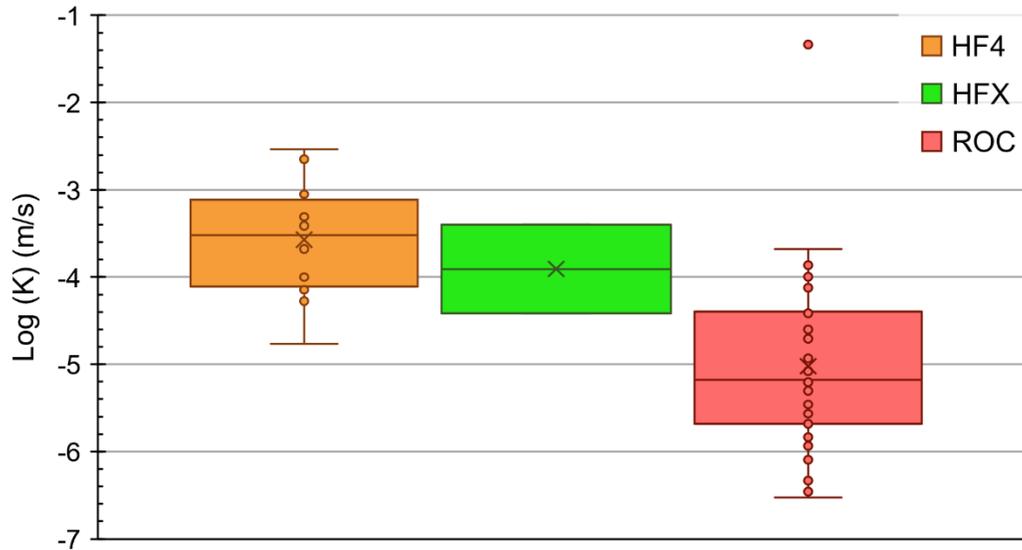


Figure 6.1 : Distributions de la conductivité hydraulique (K) des principaux hydrofaciès

Le tableau 6.2 présente les statistiques de la conductivité hydraulique en fonction de l'unité géologique à laquelle les valeurs de K sont associées. Ce tableau montre que les conductivités hydrauliques des unités de dépôts meubles sont beaucoup plus grandes que celles du roc. Il est aussi important de noter que la moitié des puits qui ont fait l'objet d'un essai de pompage sont crépinés dans des sédiments présents dans l'unité de Quaternaire ancien. La comparaison entre les différentes unités de dépôts meubles reste toutefois restreinte puisque, sauf pour le Quaternaire ancien, seulement 2 ou 3 valeurs de K sont disponibles pour chaque unité.

Tableau 6.2 : Statistiques du log de la conductivité hydraulique (K , m/s) des unités géologiques

Unité quaternaire	Nombre	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Écart-type
Alluvions et colluvions	2	-3.4	-2.7	-3.0	-	-
Sédiments fluvioglaciaires	3	-4.0	-3.1	-3.5	-	-
Sédiments glaciaires (till)	2	-4.4	-3.4	-3.9	-	-
Quaternaire ancien	7	-4.8	-2.5	-3.8	-3.7	0.73
Roc	29	-6.5	-3.7	-5.2	-5.2	0.80

Les hydrofaciès ont aussi été comparés avec le modèle géologique 3D. D'abord, les forages de la base de données ont été regroupés en fonction de leur potentiel aquifère dans les dépôts meubles selon les hydrofaciès rencontrés. Les forages ayant un potentiel aquifère négligeable sont ceux ayant atteint le roc sans traverser une couche ayant un hydrofaciès HF3 ou HF4. À l'inverse, les forages avec un potentiel aquifère sont ceux qui ont atteint le roc, ou au moins 60% de la profondeur jusqu'au roc, et qui ont traversé au moins 5 m d'hydrofaciès HF3 et/ou HF4. Les forages ayant un potentiel aquifère négligeable et ceux ayant un potentiel aquifère significatif ont ensuite été comparés au modèle géologique. La localisation de ces forages a été associée aux zones du modèle géologique montrant une épaisseur totale de sédiments supérieure à 10 m ainsi qu'aux zones où il y a plus de 5 m de Quaternaire ancien. Le tableau 6.3 présente la comparaison des forages avec les deux zones d'épaisseur du modèle géologique 3D.

Tableau 6.3 : Comparaison du potentiel aquifère des forages avec les épaisseurs du modèle géologique 3D de Caron (2013)

Type de forage	Nombre de forage	Pourcentage de forages	> 10 m de sédiments	> 5 m de quaternaire ancien
Ayant un potentiel aquifère négligeable	255	Dans la zone	5%	3%
		En dehors de la zone	95%	97%
Ayant un potentiel aquifère significatif	82	Dans la zone	37%	26%
		En dehors de la zone	63%	74%

Le tableau 6.3 montre ainsi que seulement 5% des forages ayant un potentiel aquifère négligeable sont situés dans une zone où le modèle géologique indique une épaisseur totale de sédiments excédant 10 m, alors que 37% des forages avec un potentiel aquifère significatif sont présents dans une telle zone. La proportion de forages avec un potentiel aquifère négligeable passe à 3% dans une zone avec plus de 5 m d'épaisseur de Quaternaire ancien où se trouvent 26% des forages avec un potentiel aquifère significatif. Les résultats montrent que les zones avec une épaisseur totale de sédiments excédant 10 m représentent des cibles d'exploration en eau souterraine intéressantes, mais que les zones d'étendue plus restreinte avec plus de 5 m d'épaisseur de Quaternaire ancien sont aussi des cibles intéressantes. Ces résultats suggèrent en fait que le Quaternaire ancien est une cible légèrement préférable pour la recherche en eau puisqu'elle représente un meilleur ratio du nombre de forages avec potentiel aquifère significatif par rapport aux forages avec potentiel aquifère négligeable.

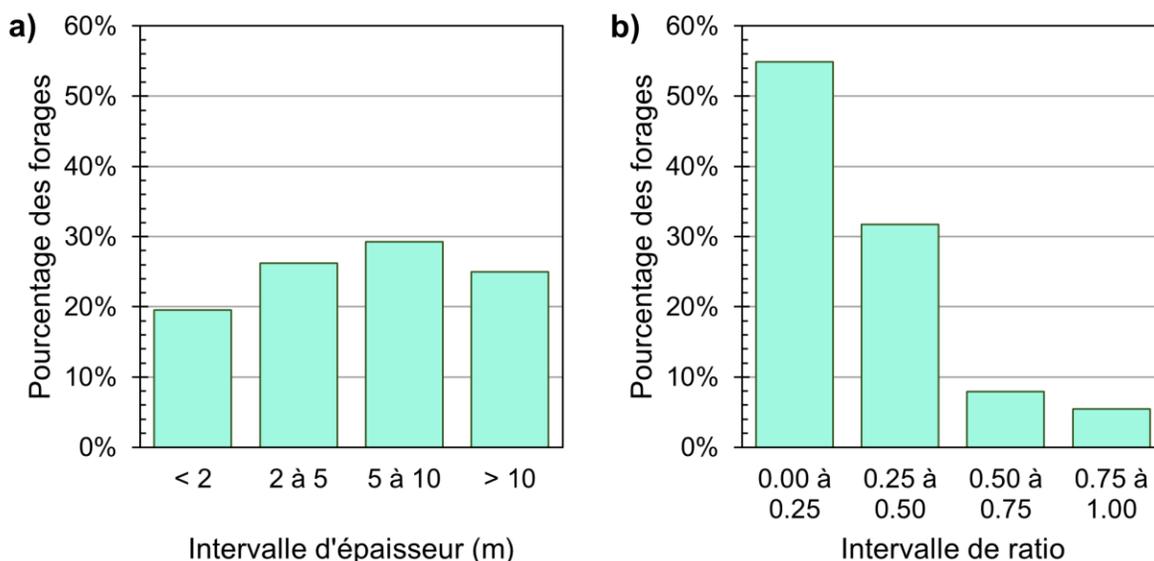


Figure 6.2 : Caractéristiques des hydrofaciès perméables (HF3 et HF4) dans les forages ayant atteint le roc où ces hydrofaciès ont été rencontrés : a) épaisseur d'hydrofaciès perméables; b) proportion de l'épaisseur d'hydrofaciès perméables par rapport à l'épaisseur totale de sédiments

D'autres statistiques ont été produites afin de préciser le potentiel aquifère dans les dépôts meubles. Ces statistiques ont été faites à partir des 164 forages qui atteignent le roc et qui rencontrent au moins une couche d'hydrofaciès perméable (HF3 et HF4). La figure 6.2 présente ainsi les histogrammes de l'épaisseur d'hydrofaciès perméable et du ratio de l'épaisseur d'hydrofaciès perméable par rapport à l'épaisseur totale de sédiments. La figure 6.2a montre qu'un peu plus de la moitié des forages avec un potentiel aquifère ont au moins 5 m d'épaisseur de

couches perméables. La figure 6.2b montre que près de la moitié des forages ont au moins 25% d'épaisseur de couches perméables sur l'épaisseur totale de sédiments.

Des statistiques similaires ont également été calculées pour les 71 forages ayant atteint le roc et traversé au moins une couche de quaternaire ancien. La figure 6.3 présente les histogrammes de l'épaisseur des couches de Quaternaire ancien, du ratio de l'épaisseur de quaternaire ancien par rapport à l'épaisseur totale de sédiments et de l'épaisseur de quaternaire ancien selon sa perméabilité.

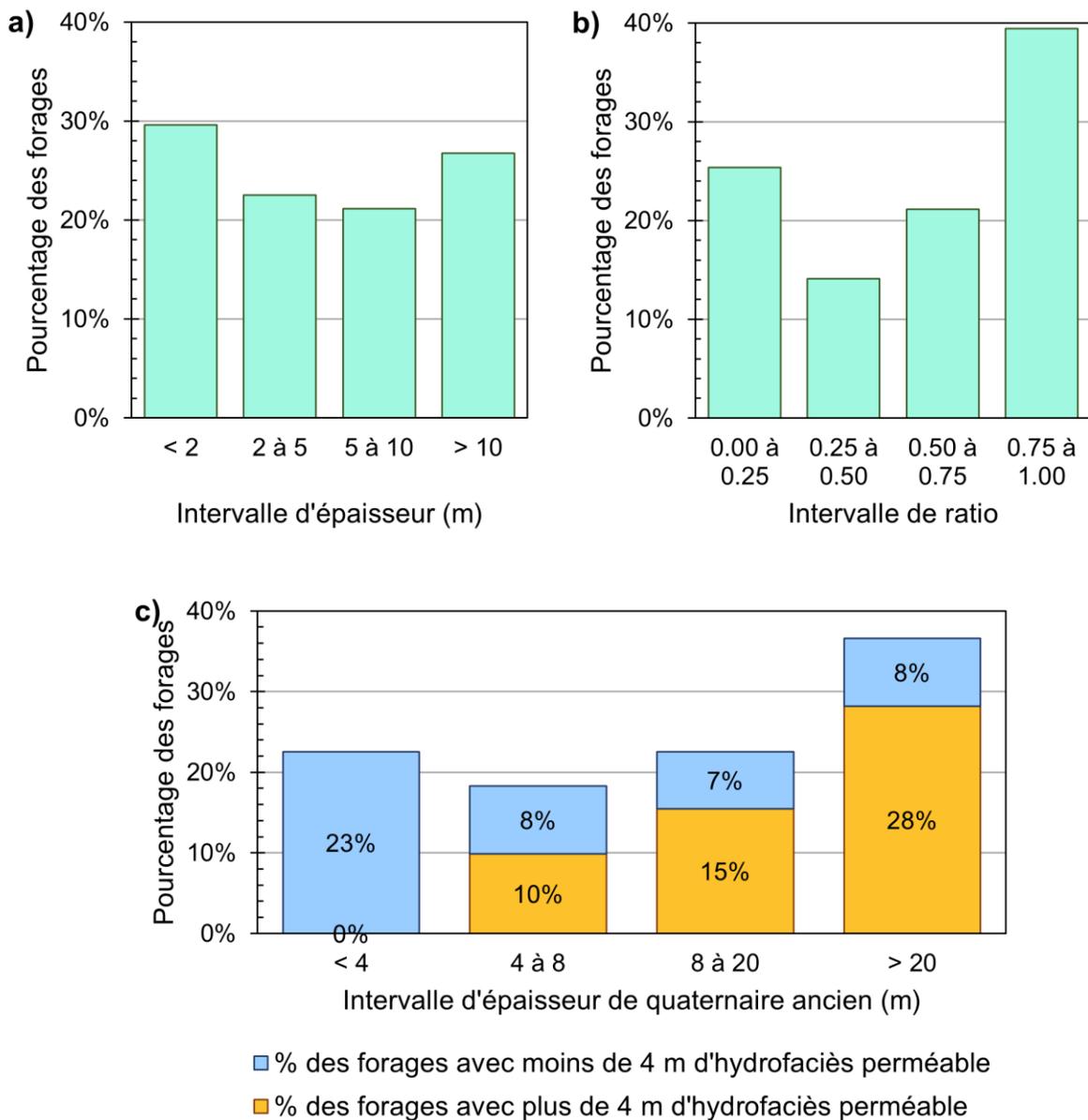


Figure 6.3 : Caractéristiques de l'unité de Quaternaire ancien dans les forages ayant atteint le roc : a) distribution de son épaisseur; b) proportion de son épaisseur par rapport à l'épaisseur totale de sédiments; c) probabilité d'avoir au moins 4 m d'hydrofaciès perméable en fonction de l'épaisseur de Quaternaire ancien

La figure 6.3a montre qu'environ la moitié des forages avec du Quaternaire ancien ont au moins 5 m d'épaisseur de cette unité. La figure 6.3b montre que près de 60% des forages ont au moins 50% d'épaisseur de Quaternaire ancien sur l'épaisseur totale de sédiments. La figure 6.3c montre que près de 70% des forages ayant entre 8 et 20 m d'épaisseur de Quaternaire ancien possèdent au moins 4 m d'hydrofaciès perméables. Puisqu'une épaisseur de 4 m de sédiments perméables est souvent suffisante pour approvisionner une petite municipalité (voir les schémas des puits municipaux de catégorie 1 à l'annexe 4H), une épaisseur de 8 m de quaternaire ancien peut être utilisée comme cible d'exploration en eau souterraine. Ainsi, la figure 6.4 présente les cibles d'exploration sur la base d'une épaisseur de Quaternaire ancien supérieure à 8 m selon le modèle géologique 3D. L'épaisseur du till y est également présentée afin de montrer le confinement du quaternaire ancien indiquant les aquifères avec une moins grande vulnérabilité. À noter que la figure 6.4 a été produite à l'aide du modèle géologique révisé (section 3.2), alors que les statistiques citées dans cette section ont été faites avec le modèle géologique original.

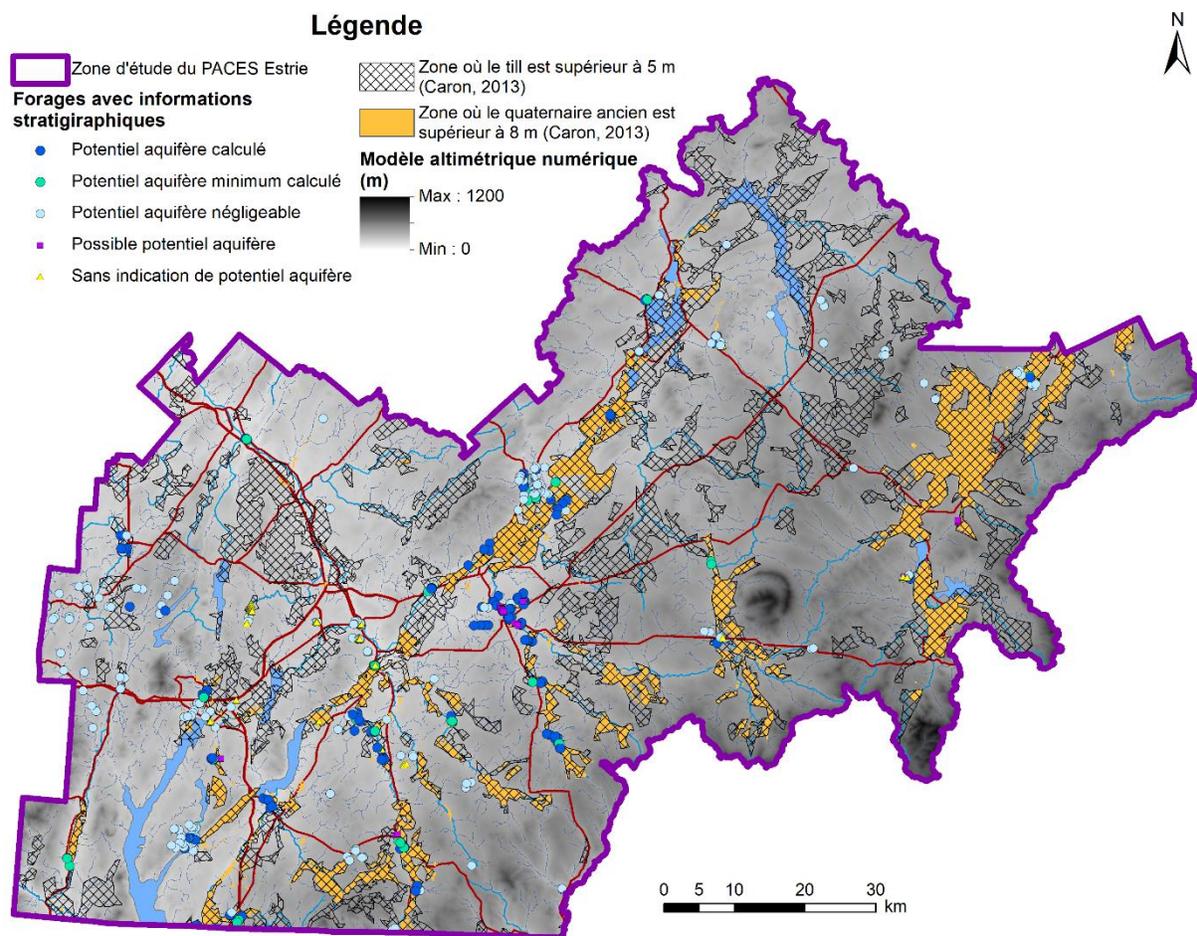


Figure 6.4 : Cibles d'exploration avec une épaisseur supérieure à 8 m de Quaternaire ancien

Bien qu'il y ait une étendue limitée de zones avec une épaisseur de Quaternaire ancien excédant 8 m, la majorité de la population en Estrie se trouve dans des municipalités localisées dans les vallées où se trouvent ces zones cibles d'exploration en eau souterraine. Il y a tout de même une incertitude sur les résultats obtenus parce que les forages disponibles avec des descriptions stratigraphiques sont bien souvent localisés dans les mêmes secteurs et ne sont pas répartis de façon uniforme sur tout le territoire. Il est donc possible que les statistiques produites à l'aide de ces forages ne soient pas représentatives des secteurs sans forages disponibles.

6.1.4 Conclusions et recommandations

Les travaux sur le potentiel aquifère dans les vallées enfouies de l'Estrie ont d'abord permis d'estimer les propriétés hydrauliques des dépôts meubles classés en hydrofaciès ayant des propriétés similaires. Ainsi, une conductivité hydraulique moyenne de 2.5×10^{-4} m/s ($10^{-3.6}$) a été estimée pour l'hydrofaciès HF4 (sables grossiers et graviers), ce qui est bien supérieur à la conductivité hydraulique moyenne du roc fracturé qui a été estimée à 6.3×10^{-6} m/s ($10^{-5.2}$). Quant aux sédiments de l'unité de Quaternaire ancien, une conductivité hydraulique moyenne de 1.6×10^{-4} m/s ($10^{-3.8}$) a été estimée. Ces résultats montrent clairement un potentiel aquifère supérieur dans les dépôts meubles par rapport à l'aquifère rocheux.

L'inventaire des puits municipaux installés dans les dépôts meubles a montré qu'une épaisseur d'au moins 4 m de sédiments perméables permettait d'avoir un débit exploitable suffisant pour une petite municipalité. Les forages ayant atteint le roc ont ainsi été regroupés en deux classes ayant un potentiel négligeable ou significatif selon que l'épaisseur d'hydrofaciès perméables HF3 et/ou HF4 excédait 5 m. La localisation de ces forages avec ou sans potentiel aquifère a été comparée aux zones avec plus de 10 m d'épaisseur totale de dépôts meubles et avec plus de 5 m d'épaisseur de Quaternaire ancien. Ensuite, des statistiques ont été produites afin d'estimer l'épaisseur totale de sédiments ou de Quaternaire ancien qui correspondaient à de fortes probabilités d'intercepter une épaisseur significative d'hydrofaciès perméable. Les résultats suggèrent qu'une épaisseur de 8 m de quaternaire ancien représente une bonne cible d'exploration en eau souterraine puisque 70% des forages montrant entre 8 et 20 m de quaternaire ancien possèdent au moins 4 m d'hydrofaciès perméable. Une carte de zones cibles basée sur cette épaisseur de 8 m de Quaternaire ancien a été produite afin de fournir un outil pour la recherche en eau souterraine en Estrie. De façon un peu plus conservatrice, le livrable n° 18 présentant les contextes hydrostratigraphiques indique les secteurs avec des épaisseurs de Quaternaire ancien dépassant 10 m comme ayant un bon potentiel aquifère dans cette unité.

6.2 Modélisation 2D de l'écoulement et de l'âge de l'eau souterraine

6.2.1 Problématique et objectifs

Les travaux réalisés dans le cadre du PACES Estrie ont montré que l'aquifère rocheux fracturé régional a généralement de faibles conductivités hydrauliques (section 4.1) et que le potentiel aquifère est meilleur dans les vallées enfouies (section 6.1). Toutefois, l'aquifère rocheux régional est important parce qu'il alimente la grande majorité des puits privés ainsi que plusieurs réseaux municipaux. De plus, la recharge est plus importante dans les hauts topographiques où il y a peu de sédiments sur le roc (section 4.3), de sorte que c'est l'écoulement dans l'aquifère rocheux qui apporte l'eau souterraine retrouvée dans les vallées enfouies. La géochimie de l'eau souterraine montre qu'on retrouve effectivement des eaux de recharge dans le système aquifère, mais aussi des eaux évoluées avec de longs temps de résidence allant de 3000 à 10000 ans (âge ^{14}C corrigé; section 4.6). Ces eaux évoluées montrent de fréquents dépassements des normes de potabilité relativement à la présence naturelle en arsenic (As) et manganèse (Mn) (sections 5.3 et 6.3). Dans ce contexte, il est donc important de bien comprendre l'écoulement régional de l'eau souterraine et les conditions qui mènent à des eaux évoluées avec de longs temps de résidence et ayant de fortes concentrations en As et Mn.

Les objectifs des travaux documentés dans la présente section étaient donc de mieux comprendre l'écoulement régional de l'eau souterraine et les conditions qui mènent à de longs temps de résidence. À cette fin, des modèles numériques hydrogéologiques ont été développés. D'abord, des modèles 2D ont été produits le long de coupes verticales jugées représentatives des conditions rencontrées dans la région d'étude, notamment au niveau de la variation de la topographie. Ces modèles 2D ont permis d'avoir une idée initiale de la nature des écoulements régionaux et des temps de résidence, tout en explorant des plages de valeurs plausibles de conductivité hydraulique, de degré d'anisotropie et de profondeur du système aquifère régional. La plausibilité du système d'écoulement modélisé avec ces plages de paramètres a été évaluée en comparant les flux en surface à l'estimation de la recharge (section 4.3.1) et les temps de résidence simulés aux âges de l'eau souterraine obtenus des analyses isotopiques (section 4.6; Colléau, 2020). La modélisation régionale 2D a aussi permis de mieux définir les conditions et les propriétés hydrogéologiques à utiliser dans un modèle hydrogéologique 3D qui a été développé subséquemment.

La présente section donne un aperçu des travaux de modélisation numérique 2D qui ont été réalisés dans le cadre des travaux de maîtrise de Raphaël Mathis à l'INRS. Les travaux sont présentés plus de détails dans le mémoire de maîtrise (Mathis, 2023). On trouve aussi dans le mémoire la description des travaux de modélisation numérique 3D qui ne sont pas décrits ici.

6.2.2 Méthodologie

La modélisation 2D a été faite le long de quatre coupes verticales dans la zone d'étude. La figure 6.5 présente la localisation de ces coupes. Les coupes ont été positionnées de façon à être le plus possible perpendiculaires à la topographie pour être dans le sens probable de l'écoulement de l'eau souterraine. Les coupes ont aussi été disposées pour couvrir une bonne partie de la superficie de l'Estrie et pour être à proximité des échantillons d'eau souterraine pour lesquels les analyses ont permis une estimation du temps de résidence (section 4.6; Colléau, 2020). Les coupes sont présentées en tant que livrable n° 14 dans l'atlas hydrogéologique. Ce livrable combine 1) les coupes géologiques montrant l'épaisseurs des unités de dépôts meubles (section 3.2), 2) les coupes hydrogéologiques conceptuelles (section 4.7), et les résultats des travaux de modélisation décrits dans la présente section pour 3) l'écoulement et 4) le temps de résidence (âge) de l'eau souterraine.

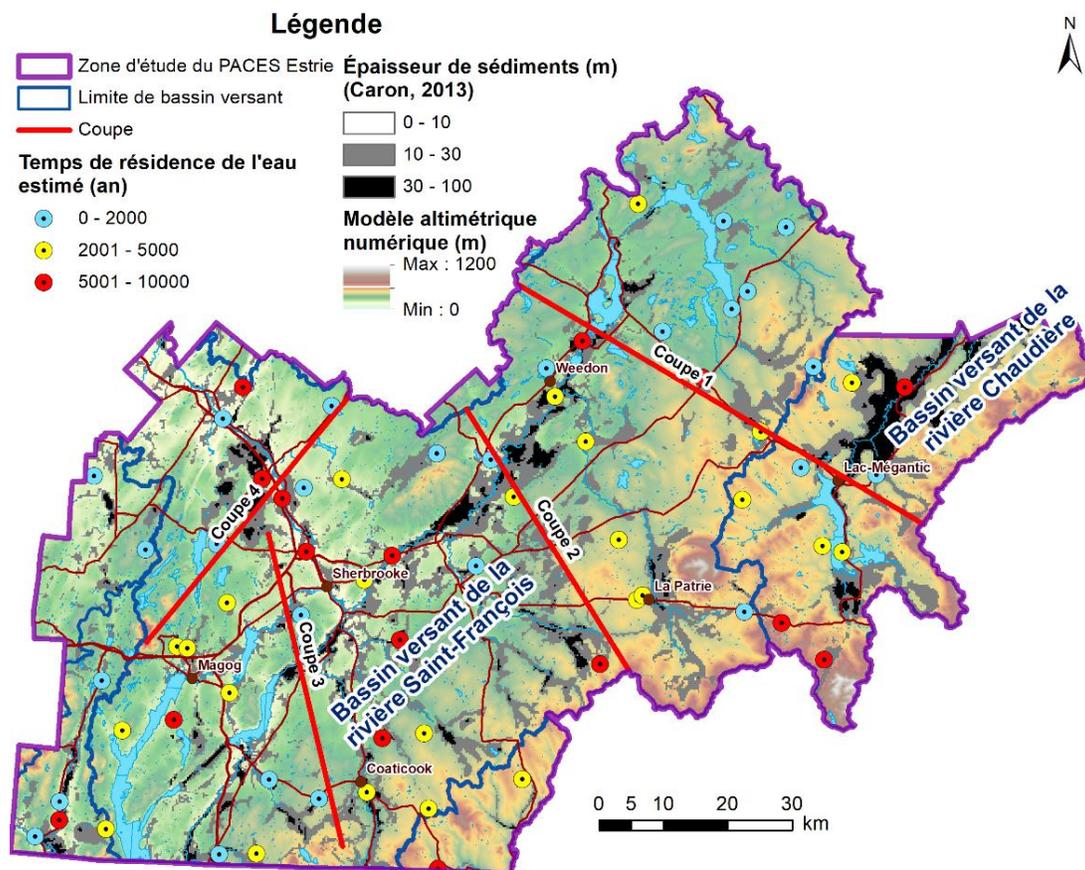


Figure 6.5 : Localisation des coupes des modèles 2D dans la région d'étude du PACES Estrie

Les simulations de l'écoulement ont été faites en régime permanent et celles de transport d'âge en régime transitoire avec le simulateur numérique FLONET/TR2 (Molson et Frind, 2019). La zone non saturée a été négligée puisque le niveau de l'eau souterraine est généralement près de la surface du sol (section 4.2). Les unités représentées dans le modèle sont les dépôts meubles et l'aquifère rocheux régional. Les différentes unités quaternaires ont été regroupées sous une même unité équivalente de façon à simplifier le modèle. L'épaisseur totale de sédiments a été obtenue du modèle géologique 3D de Caron (2013) (section 3.2). Le roc fracturé est représenté par un milieu poreux équivalent avec une conductivité hydraulique qui décroît en fonction de la profondeur. La discrétisation spatiale horizontale est de 50 m et celle verticale varie entre 0,005 et 25 m, augmentant avec la profondeur. La discrétisation temporelle est de 50 jours, ce qui est assez court, pour assurer la stabilité numérique et la convergence de la solution mais assez long pour ne pas que le temps requis pour faire les simulations soit excessivement long.

La charge hydraulique a été imposée à la topographie du sol puisque pour la majorité des puits le niveau de l'eau est à quelques mètres de la surface. Des flux nuls sont imposés aux trois autres limites latérales et inférieure. Les limites latérales sont les limites naturelles des bassins versants (sauf pour la coupe 3 où des hauts topographiques locaux sont utilisés). Pour les simulations de transport d'âge de l'eau souterraine, l'âge de l'eau entrant dans le domaine (recharge) est fixé à zéro. Quant à l'eau sortant du domaine (résurgence) ainsi que pour les trois autres limites, des conditions de gradient d'âge nul sont appliquées. Aussi, l'âge initial dans l'ensemble du domaine est fixé à zéro. Les propriétés hydrogéologiques et physiques utilisées dans les modèles 2D sont résumées au tableau 6.4. Le tableau indique les valeurs retenues qui ont été jugées les plus plausibles suite aux nombreuses simulations réalisées en faisant varier systématiquement les paramètres à l'intérieur de la plage indiquée au tableau (Mathis, 2023).

Tableau 6.4 : Propriétés utilisées dans la modélisation et intervalle de valeurs exploré

	Propriété	Unité	Valeur retenue	Intervalle exploré
Dépôts meubles	Conductivité hydraulique horizontale (K_x)	m/s	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7} à 1.0×10^{-5}
	Ratio d'anisotropie (K_x/K_z)	-	100	-
	Porosité efficace	-	0.20	-
Roc fracturé	Profil $K(z)$	-	PACES CA	Plusieurs types de profils $K(z)$
	Conductivité hydraulique horizontale maximale ($K_{x \max}$)	m/s	2.7×10^{-5}	1.0×10^{-7} à 1.0×10^{-4}
	Ratio de conductivité hydraulique maximale sur minimale (K_{\max} / K_{\min})	-	3000	15 à 3000
	Taux de décroissance exponentiel de K	m^{-1}	0.025	0.01 à 0.04
	Ratio d'anisotropie (K_x/K_z)	-	100	10 à 1000
	Porosité efficace	-	0.02	0.005 à 0.04
Élévation de la base du système aquifère		m	0	0 à -750
Recharge		mm/a	200	80 à 380
Dispersivité longitudinale		m	50	25 à 200
Dispersivité transversale		m	0.5	0.25 à 2
Coefficient de diffusion		m^2/s	10^{-10}	-

Les travaux réalisés par Laurencelle (2018) en Montérégie Est et en Estrie (section 4.1) ont montré que la conductivité hydraulique $K(z)$ du roc fracturé diminuait avec la profondeur (z) sous la surface du roc. Laurencelle (2018) a développé une approche permettant d'estimer le profil $K(z)$ sur la base des données de capacités spécifiques Q_s obtenues du rapport entre le débit (Q) et le rabattement (s) ($Q_s = Q \div s$) obtenus des essais de courte durée réalisés par les puisatiers lors de l'installation d'un puits. Pour obtenir un profil $K(z)$ représentatif, il est nécessaire de tenir compte du biais d'échantillonnage des foreurs qui ne vont forer à de plus grandes profondeurs que si la partie supérieure de l'aquifère rocheux est peu perméable. Plusieurs profils $K(z)$ du roc fracturé ont été considérés dans les simulations 2D (figure 6.6). Ces profils comprennent le profil estimé à partir des données de capacités spécifiques en Estrie (section 4.1) ainsi que le profil estimé avec le même type de données dans le cadre du PACES Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015). L'utilisation du profil en Chaudière-Appalaches est justifiée parce que cette région est adjacente à l'Estrie et recouvre le même contexte géologique appalachien.

La stratégie de validation des modèles 2D a d'abord impliqué la calibration de la courbe $K(z)$ de la conductivité hydraulique sur la base de la recharge de l'aquifère au roc. Lors de cette calibration, la forme de la courbe du profil $K(z)$ est restée inchangée, mais les conductivités hydrauliques maximales et minimales ont été variées. Le critère de calibration était que les flux à la surface du modèle soient du même ordre que la recharge moyenne. La valeur de la recharge moyenne d'environ 200 mm/an a été estimée par la séparation d'hydrogrammes de cours d'eau avec l'application de filtre et le débit d'étiage en fin d'été (section 4.3; Mathis, 2023). La figure 6.6 montre ainsi les deux profils $K(z)$ initiaux pour l'Estrie et Chaudière-Appalaches qui ont été modifiés afin de reproduire la recharge. Les valeurs de la conductivité hydraulique maximale de ces profils après calibration sont similaires et se retrouvent à l'intérieur de la plage des mesures de K obtenues d'essais de pompage dans le roc (rectangle surligné à la figure 6.6).

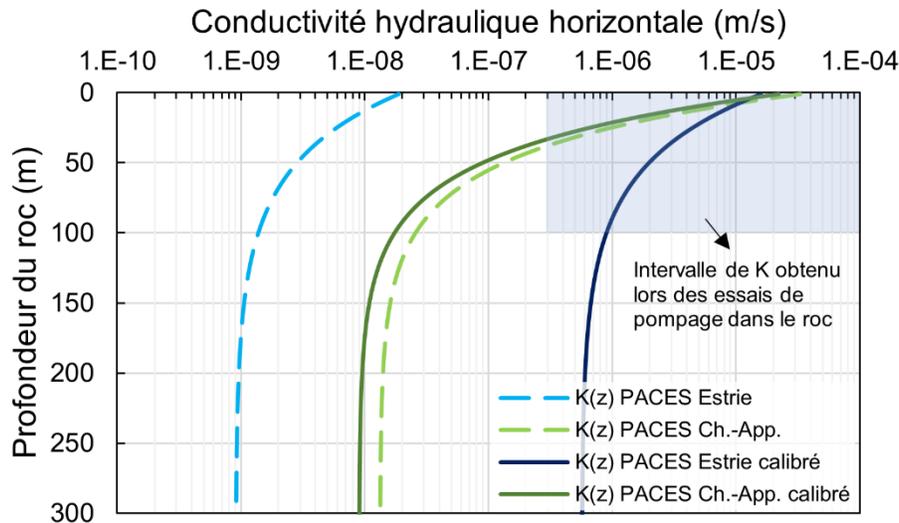


Figure 6.6 : Profils $K(z)$ considérés lors des modélisations 2D

Le profil $K(z)$ pour l'Estrie a ainsi exigé une augmentation majeure tandis que le profil pour Chaudière-Appalaches a nécessité une légère modification. La très faible diminution de K avec la profondeur pour le profil $K(z)$ de l'Estrie n'a pas été jugée représentative, de sorte que c'est finalement le profil $K(z)$ calibré de Chaudière-Appalaches qui a été jugé le plus plausible. La deuxième phase de calibration du modèle a été faite en vérifiant la concordance des âges simulés de l'eau souterraine par rapport aux âges estimés à l'aide des âges ^{14}C corrigés de l'eau souterraine (section 4.6). Plusieurs paramètres ont été variés pour évaluer leur effet sur les âges simulés, notamment l'élévation de la base du système et le ratio d'anisotropie des composantes horizontale et verticale de la conductivité hydraulique du roc (K_H/K_V).

6.2.3 Principaux résultats

La présente section ne montre que les résultats finaux des simulations 2D qui semblent les plus plausibles et représentatifs. Plus de détails sur l'ensemble des simulations sont présentés dans le mémoire de Mathis (2023). L'analyse de sensibilité a été effectuée à l'aide du profil $K(z)$ issu du PACES Estrie (figure 6.6; détails dans Mathis, 2023). Toutefois, tel que mentionné, les résultats les plus plausibles ont été obtenus avec un profil $K(z)$ issu du PACES Chaudière-Appalaches. Le choix de ce profil $K(z)$ a été fait parce que les valeurs de conductivité hydraulique du roc obtenues des rapports de consultants (K moyen de 6×10^{-6} m/s; voir la section 4.1) concordent plus avec les conductivités hydrauliques de la partie supérieure de ce profil (figure 6.6). En effet, le profil $K(z)$ du PACES Estrie semble avoir des valeurs de conductivité très faibles dans la partie supérieure du roc, ce qui semble peu crédible. Il est cependant difficile de tirer une conclusion définitive sur le profil $K(z)$ qui représente le mieux les véritables conditions puisqu'aucune donnée de conductivité à grande profondeur dans le roc n'est disponible. Le choix du profil $K(z)$ a une grande incidence sur la profondeur de la circulation active de l'écoulement de l'eau dans les simulations, mais les âges au niveau des puits dans les premiers 100 m du roc restent assez semblables puisque le plancher du système est systématiquement varié pour avoir des âges simulés plausibles par rapport à ceux observés.

Les figures 6.7 et 6.8 présentent les simulations d'écoulement et de transport d'âge pour les coupes 1 à 4. Les exagérations verticales sur ces figures sont de 55. Des symboles représentatifs de classes d'âge des puits échantillonnés et datés situés à proximité des coupes sont placés sur les coupes afin de comparer les âges simulés et observés. Ces échantillons ont été projetés sur les coupes et peuvent être jusqu'à 6 km de distance des coupes (position des échantillons à la figure 6.5). Quelques échantillons sont situés au-delà de cette distance lorsque le contexte

géologique est similaire à l'emplacement projeté sur la coupe. Il y a donc une incertitude supplémentaire puisque la géologie et la topographie dans la 3^e dimension ne sont pas prises en compte. Les âges simulés étaient tout de même cohérents avec les âges observés (Mathis, 2023).

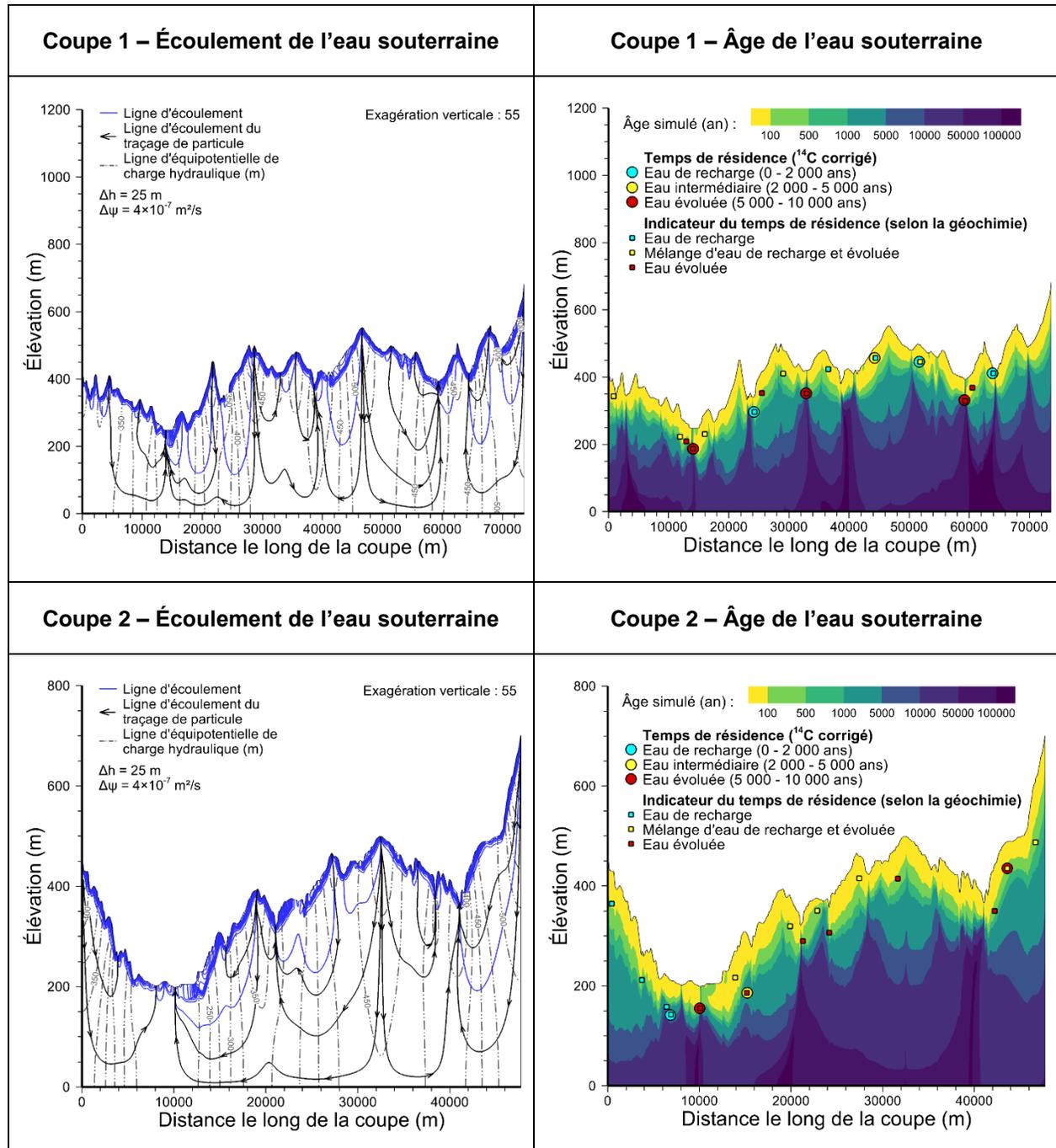


Figure 6.7 : Résultats des simulations d'écoulement et de transport d'âge des coupes 1 et 2

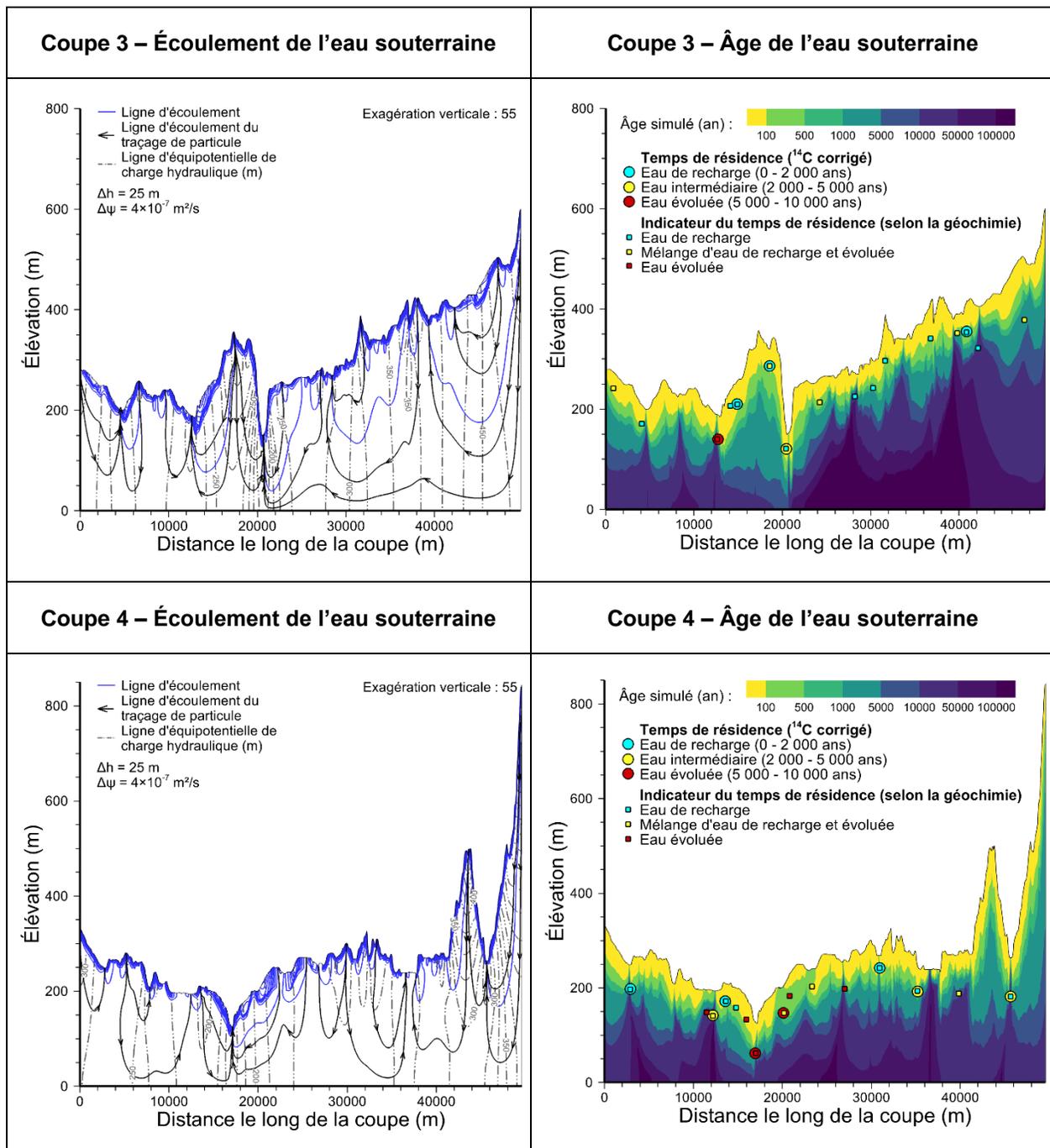


Figure 6.8 : Résultats des simulations d'écoulement et de transport d'âge des coupes 3 et 4

La partie gauche des coupes montre les réseaux d'écoulement qui ont été simulés. Ces graphiques montrent les charges hydrauliques (isopièzes) ainsi que les lignes d'écoulement qui ont un débit d'eau constant entre chaque ligne. Des lignes d'écoulement supplémentaires issues du traçage de particules ont aussi été ajoutées à ces coupes afin de mieux montrer les directions d'écoulement en profondeur.

Les résultats montrent que la majorité de l'écoulement de l'eau souterraine se concentre dans la partie supérieure du roc qui est plus perméable. En effet, 65 % des flux vont circuler dans les 10 premiers mètres du roc. Cet écoulement plus important est indiqué par les lignes de courant rapprochées près de la surface. Même si l'écoulement superficiel domine, il y a tout de même une composante d'écoulement régionale ou semi-régionale à l'intérieur du roc. Les hauts topographiques sont généralement à l'origine de l'écoulement alors que les vallées sont les exutoires de l'écoulement dont l'origine peut être locale ou régionale. On retrouve ainsi des composantes d'écoulement locales, semi-régionales et régionales qui sont emboîtées, ce qui correspond à un système d'écoulement tel que décrit par Toth (1963). Toth (1999) avait d'ailleurs souligné que ce type d'écoulement mène à des eaux souterraines avec des compositions chimiques reflétant des temps de résidence court, intermédiaire et long, tel que ceux observés en Estrie (Colléau, 2020; section 4.6). Ces conditions d'écoulement contrôlent la distribution spatiale des temps de résidence qui ont été simulés.

La partie droite des coupes montre les simulations du transport de l'âge de l'eau souterraine. Les graphiques montrent les plages d'âge allant de moins de 100 ans jusqu'à plus de 100 000 ans. Ces graphiques montrent aussi des symboles correspondant aux plages d'âges observés dans les échantillons d'eau datés au radiocarbone. Les plages d'âges correspondent à des eaux de recharge, des eaux d'âge intermédiaire et des eaux évoluées dont l'âge excède 5000 ans. Des indications qualitatives du temps de résidence sont aussi montrées par les groupes d'eau souterraine (section 4.6; Colléau, 2020). La distribution spatiale de l'âge simulé est généralement cohérente avec les âges observés. Ainsi, dans les hauts topographiques et dans la partie supérieure du roc on a des âges plus jeunes alors que dans certaines vallées l'eau souterraine ayant circulé en profondeur fait émergence avec des âges importants. Il y a ainsi une stratification de l'âge qui est généralement plus jeune près de la surface et avec un âge plus important en profondeur, mais il y a émergence d'eau plus ancienne dans les principales vallées.

Même si les résultats suggèrent que les âges observés sont de façon générale bien représentés par la modélisation 2D, il faut considérer que les âges observés proviennent de puits ouverts au roc sur une certaine profondeur et qui peuvent ainsi contribuer à « mélanger » des eaux avec des âges différents. De plus, les puits atteignent en majorité 100 m de profondeur, ce qui ne permet pas d'observer les âges des eaux souterraines situées à une plus grande profondeur. Ceci engendre des incertitudes concernant la validité du modèle à grande profondeur. C'est d'ailleurs la raison principale de la difficulté à choisir le profil de conductivité hydraulique $K(z)$ le plus plausible. Contrairement à la conductivité hydraulique du roc, les résultats des simulations ont montré que la conductivité hydraulique des sédiments n'a pas une grande incidence sur les âges simulés. En effet, même si on retrouve de grandes accumulations de sédiments dans les vallées, ces vallées constituent des exutoires de l'écoulement de l'eau souterraine et elles n'affectent donc pas la circulation régionale et le temps de résidence. Cependant, la variation de conductivité hydraulique des sédiments peut engendrer un déplacement des zones d'émergence d'eau évoluée. Si les sédiments sont peu perméables, les zones de résurgence vont plutôt se déplacer sur les côtés des vallées où l'épaisseur de sédiments est moins importante.

6.2.4 Conclusions et recommandations

La modélisation 2D a permis de définir des valeurs plausibles pour certaines caractéristiques hydrogéologiques et physiques du système d'écoulement régional. La conductivité hydraulique horizontale maximale du roc serait de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} m/s dans sa partie supérieure, le ratio d'anisotropie entre les composantes horizontales et verticales de la conductivité hydraulique à environ 100 et l'élévation de la base du système aquifère à 0 m par rapport au niveau moyen de la mer.

Les travaux de modélisation ont également permis d'expliquer les plages d'âges observées de l'eau souterraine qui vont de moins de 100 ans à plus de 10 000 ans et qui sont respectivement associées à des écoulements locaux et régionaux. Aussi, des analyses de sensibilité (voir Mathis, 2023) ont permis de cibler les paramètres avec une grande incidence sur le temps de résidence de l'eau souterraine : l'élévation de la base du système, le ratio d'anisotropie, la recharge et la porosité efficace du roc. Le profil de la conductivité hydraulique avec la profondeur dans le roc $K(z)$ est également un aspect très important de la modélisation puisqu'il a un impact majeur sur les âges simulés en profondeur et dans les zones de résurgence d'eau évoluée.

La modélisation 2D a permis de définir les conditions générales de l'écoulement régional de l'eau souterraine en Estrie. Cette modélisation a aussi montré que l'écoulement régional permet de générer des eaux ayant de longs temps de résidence. Ces eaux ont généralement une extension limitée et se situent dans les zones d'émergence de l'eau souterraine sous les vallées. Ces résultats indiquent que la modélisation pourrait ainsi aider à définir les secteurs les plus susceptibles d'avoir de fortes concentrations en arsenic et en manganèse en Estrie, puisqu'elles sont associées à des eaux évoluées à long temps de résidence (sections 4.6, 5.3 et 6.3; Colléau, 2020). Les résultats de ces travaux ont aussi permis le développement d'un modèle d'écoulement et de transport d'âge en 3D pour le bassin versant de la rivière Saint-François. Des paramètres semblables aux paramètres retenus dans ces travaux en 2D ont été utilisés dans ce modèle 3D. Ce modèle 3D a permis de définir la distribution spatiale du temps de résidence de l'eau souterraine dans le bassin-versant. Ces résultats sont documentés dans le mémoire de maîtrise de Mathis (2023).

6.3 Présence d'arsenic et de manganèse dans l'eau souterraine

6.3.1 Problématique et objectif

Des travaux réalisés par la Direction de la santé publique de l'Estrie (Boivin, 2015) ainsi que des données du MELCCFP sur la qualité des approvisionnements municipaux (MDDELCC, 2016) donnaient des indications que l'arsenic est souvent présent dans l'eau souterraine de l'Estrie en concentrations dépassant la norme de potabilité. La revue des travaux antérieurs et des données disponibles faite par Colléau (2019) a montré que plusieurs sources naturelles d'arsenic étaient présentes dans les sédiments, surtout les tills, et les unités rocheuses de l'Estrie. Les données historiques sur les concentrations en arsenic (As) et manganèse (Mn) dans l'eau souterraine ont confirmé l'importance des problématiques de qualité d'eau reliées à ces composés (Colléau, 2019). Ainsi, un des objectifs spécifiques de la caractérisation géochimique de l'eau souterraine dans le cadre du PACES Estrie était d'identifier les processus géochimiques à l'origine des fortes concentrations en arsenic et en manganèse dans certains secteurs de la région d'étude.

La section 4.6 a déjà décrit la géochimie de l'eau souterraine et la définition de groupes d'eau aux caractéristiques distinctes et comprenant quatre groupes d'eau de type « recharge » d'âge moderne (moins de 50 ou 60 ans) et quatre groupes de type « évolué géochimiquement » pouvant avoir des âges de plusieurs milliers d'années. La section 5.3 sur la qualité de l'eau souterraine a montré que 8,2% des 219 échantillons couvrant la région d'étude du PACES Estrie dépassaient la concentration maximale acceptable (CMA) de 0,01 mg/L pour l'arsenic et que 26% dépassaient la recommandation de CMA de 0,12 mg/L pour le manganèse. Les dépassements de CMA pour l'As et le Mn sont observés surtout dans les eaux évoluées, mais aussi dans le groupe d'eau de recharge B1a ayant subi un fort impact anthropique. La présente section fait un résumé des travaux réalisés dans le cadre de la maîtrise de Colléau (2020) et plus de détails sont présentés dans son mémoire.

6.3.2 Méthodologie

La revue des données historiques faite par Colléau (2019) sur les concentrations en As et Mn dans l'eau souterraine ont notamment permis d'orienter le programme d'échantillonnage d'eau souterraine réalisé à l'été 2019 en ciblant six secteurs problématiques où l'échantillonnage a été densifié (section 2.3) : (1) Waterloo vers Coaticook, (2) Windsor, (3) Dudswell vers Cookshire-Eaton, (4) Disraeli, (5) La Patrie – Mont-Mégantic et (6) Lac-Mégantic vers Saint-Ludger.

Afin de mieux comprendre les conditions qui contrôlent la présence d'arsenic dans l'eau souterraine, Vincent Cloutier et Raphaël Bondu de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) ont suggéré l'emploi d'une méthode d'échantillonnage particulière afin de procéder à la séparation des diverses espèces d'arsenic (Bondu, 2017 ; Bondu et al., 2017 ; Watts et al., 2010). Cette approche a été utilisée sur tous les points de prélèvements mais l'analyse au laboratoire de l'INRS des diverses espèces n'a été faite que sur les échantillons contenant le plus d'arsenic (voir détails à la section 2.3). La spéciation de l'arsenic montre le type d'arsenic présent et permet une interprétation plus fine des processus géochimiques impliqués.

Sur la base des concentrations en As et Mn obtenues des 219 échantillons d'eau souterraine couvrant la région d'étude, une analyse des résultats a été faite pour comprendre les conditions qui contrôlent la présence de ces composés. Ainsi, les concentrations en As et Mn ont été compilées pour les groupes d'eau souterraine, en relation avec les conditions physicochimiques (Eh et pH), par rapport aux autres paramètres chimiques ainsi qu'en relation avec les secteurs où se retrouvent des eaux de recharge ou des eaux évoluées. De même, les résultats de la spéciation de l'As ont été mis en relation avec les conditions physicochimiques, les autres paramètres chimiques, les groupes d'eau et les concentrations en manganèse.

6.3.3 Principaux résultats

6.3.3.1 Facteurs contrôlant la présence d'As et Mn

Tel que vu à la section 5.3, les eaux souterraines dans la région de l'Estrie présentent de fortes concentrations en arsenic et manganèse au-delà des normes de potabilité. La figure 6.9 montre la distribution des concentrations en As et Mn selon les groupes d'eau. Au niveau de l'arsenic, les eaux de recharge des groupes A2b et B1b1 qui sont les moins impactées par les activités anthropiques ainsi que les eaux du groupe A2a qui est impacté possèdent les plus faibles concentrations et n'ont aucun dépassement de CMA. Toutefois, les eaux de recharge du groupe B1a qui est le plus impacté ont des concentrations en As plus élevées et représentent 16,7% des dépassements de CMA en Estrie (3 sur 18; tableau 5.4). Ce sont toutefois les eaux évoluées géochimiquement qui ont les concentrations maximales les plus élevées avec une concentration médiane plus importante dans les eaux purement sodiques (groupe A1). Ces groupes d'eau évoluée représentent plus de 80% des dépassements de CMA (15 sur 18; tableau 5.4).

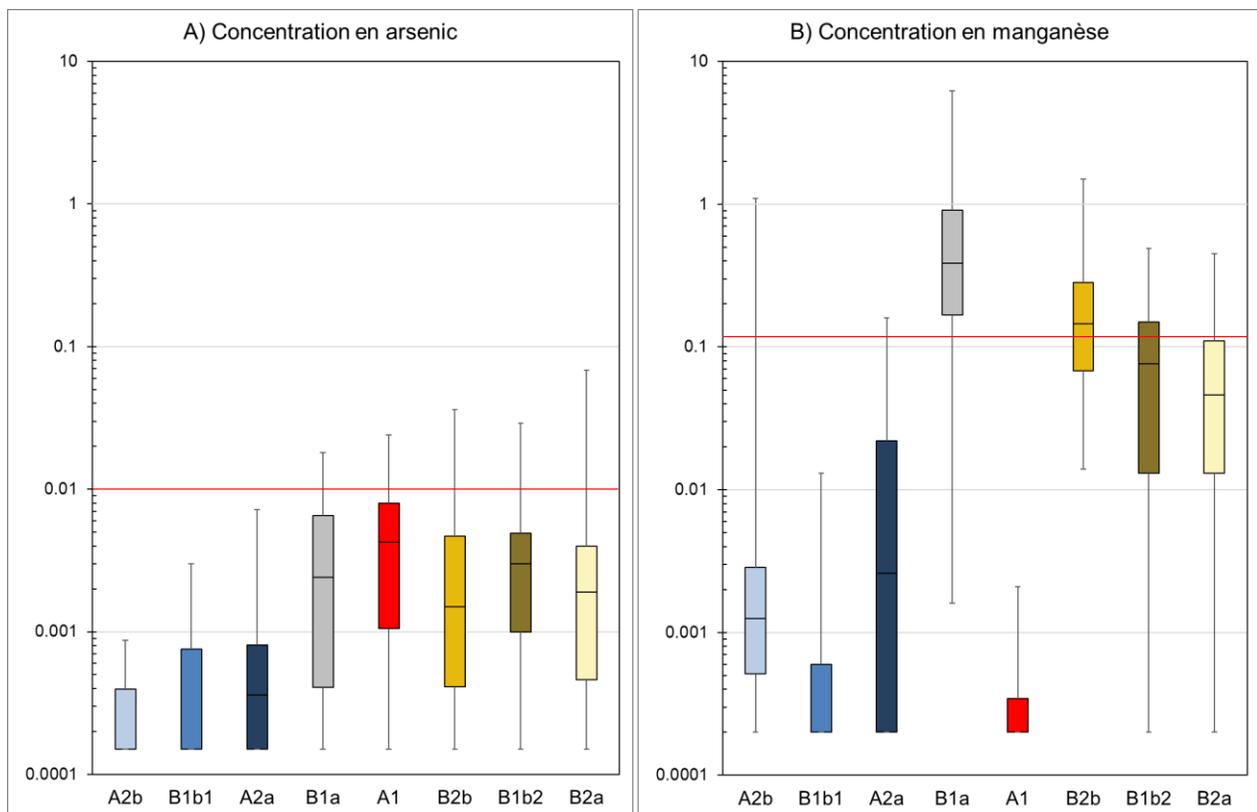


Figure 6.9 : Concentration en arsenic (A) et en manganèse (B) des groupes d'eau (CMA indiquée par la ligne rouge : As = 0,01 mg/L et Mn = 0,12 mg/L) (tiré de Colléau, 2020)

Au niveau du manganèse, on constate que les effets anthropiques sur la concentration en Mn est plus importante que pour As pour les eaux du groupe A2a mais surtout pour les eaux du groupe le plus impacté B1a qui ont les plus fortes concentrations en Mn de tous les groupes d'eau. Les eaux du groupe B1a représentent 28,1% des dépassements de CMA du Mn (16 sur 57; tableau 5.4). L'autre particularité du Mn par rapport à l'As est que le groupe d'eau évoluée purement sodique A1 a les plus faibles concentrations en Mn et aucun dépassement de la CMA pour le Mn. Par contre, les eaux des autres groupes d'eau évoluée (B1b2, B2a et particulièrement B2b) ont de fortes concentrations en Mn et représentent ensemble 68,4% des dépassements de la CMA du Mn (39 sur 57; tableau 5.4).

La figure 6.10 montre que les concentrations médianes en arsenic et en manganèse sont plus élevées dans des conditions alcalines et réductrices qui sont typiques des eaux évoluées géochimiquement. Aussi, les concentrations d'arsenic et de manganèse ne sont pas fortement corrélées, mais l'As et le Mn sont tous deux présents en conditions alcalines et réductrices, bien que les concentrations en manganèse puissent être élevées aussi dans un milieu acide.

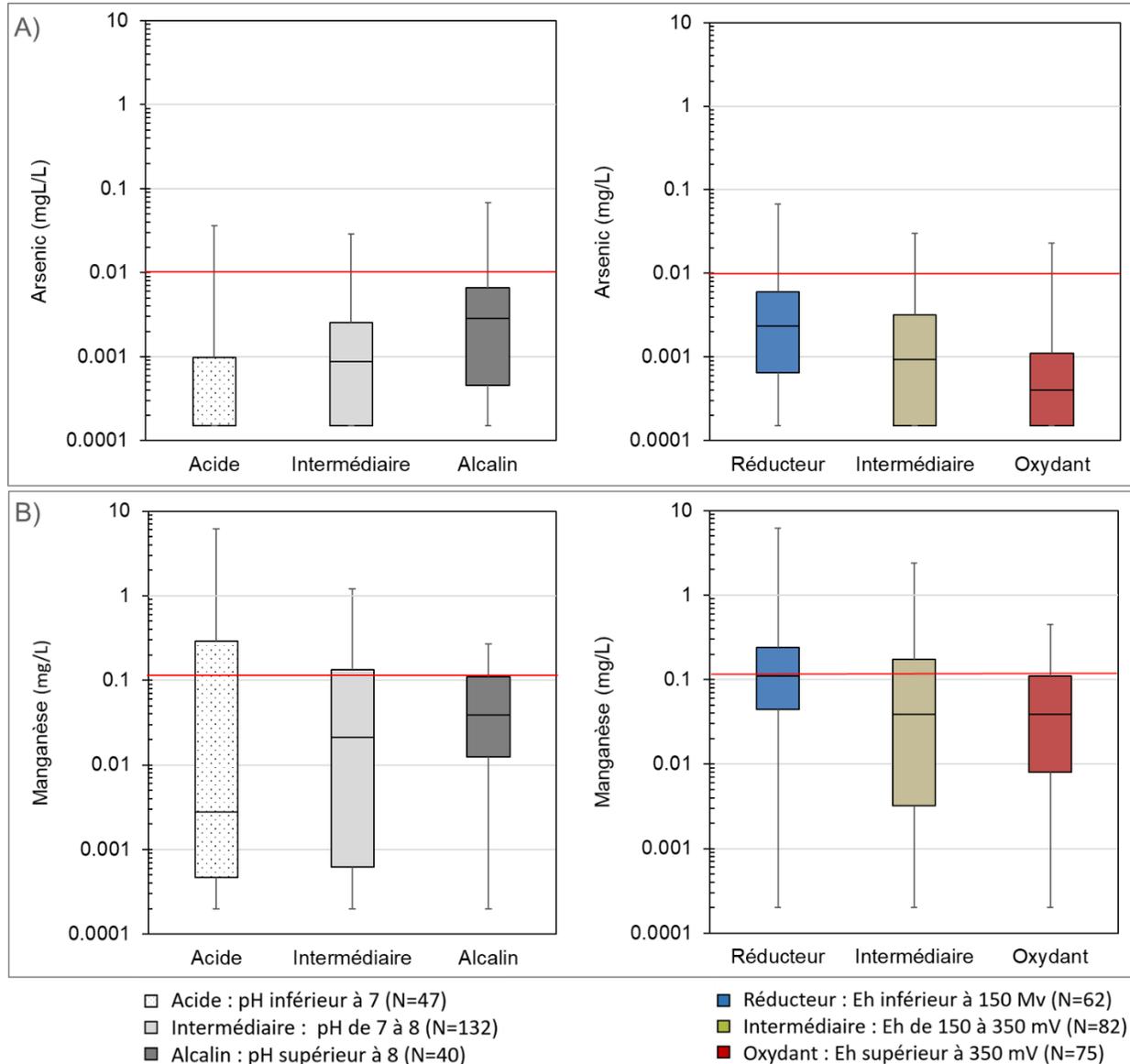


Figure 6.10 : Concentration en arsenic (A) et manganèse (B) selon les conditions de pH et d'Eh (la ligne rouge correspond à la CMA : As = 0,01 mg/L et Mn = 0,12 mg/L) (tiré de Colléau, 2020)

Colléau (2020) a aussi estimé la corrélation des concentrations en arsenic et en manganèse avec les concentrations des autres composés chimiques. Ainsi, l'arsenic est corrélé négativement à l'azote total, au calcium, au cuivre, aux nitrites-nitrates, au plomb et au potassium et il est corrélé positivement à l'azote ammoniacal, au phosphore inorganique et à la silice. Le manganèse est présent en milieu plus chargé (MDT, dureté) contenant du calcium, du cobalt, du fer, des sulfates et du zinc.

Colléau (2020) a noté qu'il est difficile d'associer une lithologie précise à la présence d'arsenic ou de manganèse dans les eaux souterraines. La région de l'Estrie est riche en pyrite (dans laquelle As peut se substituer à Fe), ce qui pourrait expliquer la présence d'arsenic libéré lors de la dissolution de ces oxydes de fer ou de minéraux sulfurés tel que la pyrite. L'arsenic adsorbé sur des composés organiques et argileux peut être relargué dans le milieu en conditions réductrices (Campredon, 2013; Smedley et Kinniburgh, 2002).

Le manganèse présent dans de nombreuses roches et minéraux est libéré sous sa forme dissoute en condition anaérobie (Adam et al., 2005). Ces conditions alcalines et réductrices favorables à la présence de Mn et As étant typique des eaux évoluées, la présence de ces composés a été mise en relation avec les secteurs où les types d'eau évoluées et les types d'eau de recharge dominant (figures 6.11 et 6.12). Ces cartes montrent la distribution spatiale des 219 échantillons du PACES Estrie selon les CMA d'As et du Mn.

Pour les deux composés, les fortes concentrations et les dépassements de CMA sont localisés surtout dans les zones d'eaux évoluées. Toutefois, le groupe d'eau de recharge fortement impacté B1a se trouve dans les secteurs des eaux de recharge même s'il représente une proportion significative des dépassements de CMA d'As et Mn. Colléau (2019) a aussi pu mieux définir la distribution spatiale des fortes concentrations d'As et Mn grâce à une compilation des données historiques (aussi documenté dans Colléau, 2020).

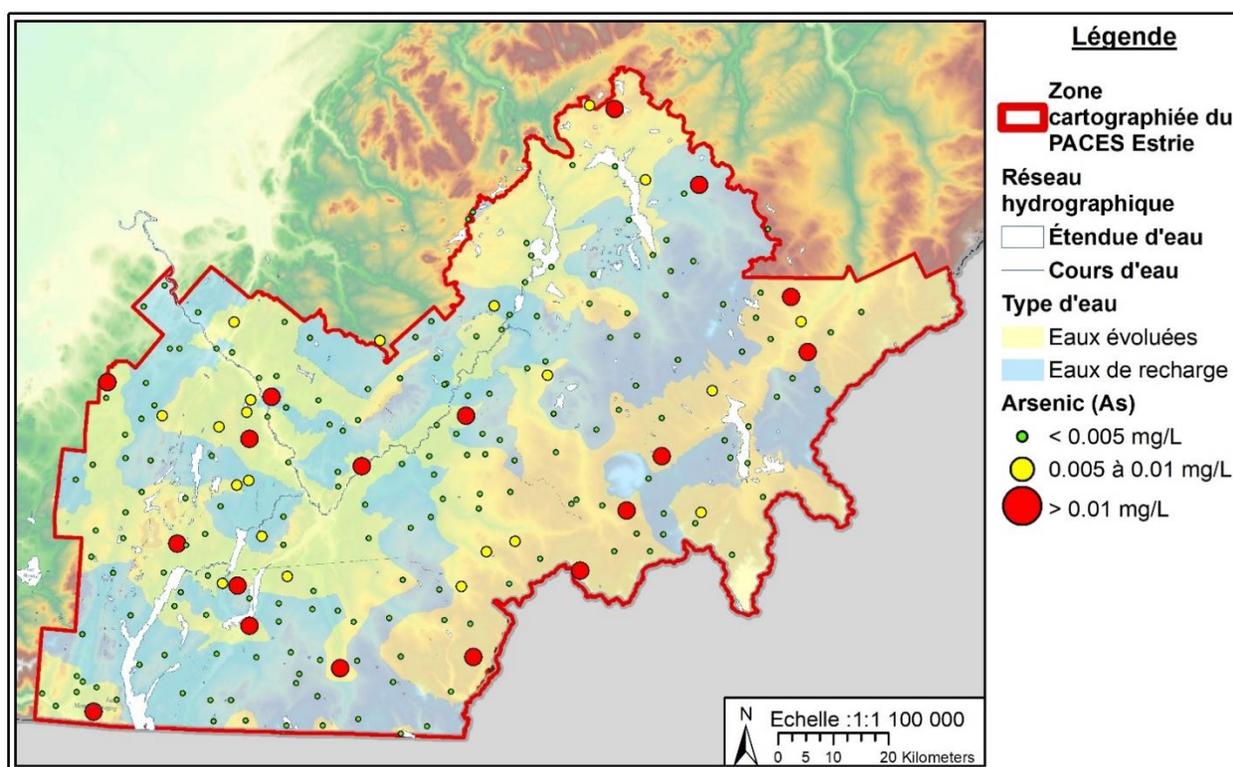


Figure 6.11 : Répartition spatiale des concentrations en arsenic avec les zones d'eau de recharge et évoluées (tiré de Colléau, 2020)

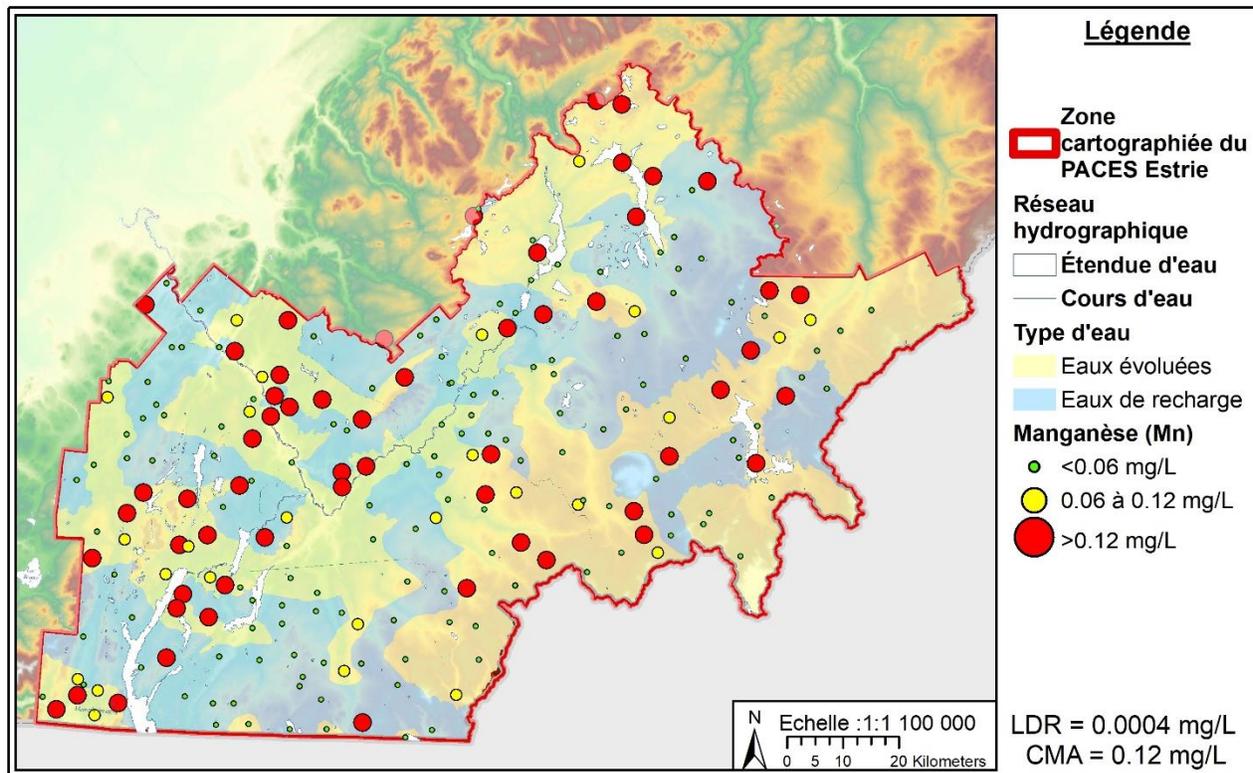


Figure 6.12 : Répartition spatiale des concentrations en manganèse avec les zones d'eau de recharge et évoluées (tiré de Colléau, 2020)

6.3.3.2 Facteurs contrôlant la forme de As dans l'eau souterraine

La spéciation de l'arsenic a été réalisée sur 88 échantillons de la campagne d'été 2019 présentant une concentration en arsenic supérieure à 0,001 mg/L. Les quatre formes de l'arsenic ont été séparées en utilisant le protocole de Watts et al. (2010) : acide diméthylarsinique (DMA), acide monométhylarsonique (MA), arséniate (As^{5+}) et arsénite (As^{3+}). La toxicité de l'arsenic varie en fonction des espèces, alors que l'arsénite As^{3+} qui est plus mobile est aussi considérée plus toxique que l'arséniate As^{5+} (Gulens et al., 1979; Squibb et Fowler, 1983).

La proportion des espèces d'arsenic par échantillon est présentée sur la carte de la figure 6.13 qui mets les proportions en relation avec les secteurs ayant des eaux de recharge ou évoluées. La carte montre que les fortes concentrations en As qui ont permis la spéciation se trouvent généralement dans les secteurs avec des eaux évoluées. Il y a tout de même des échantillons dans les zones avec des eaux de recharge, probablement en relation avec le groupe d'eau B1a qui a subi un fort impact anthropique et a des concentrations élevées en As et Mn. L'arséniate (As^{5+}) est généralement la forme dominante d'arsenic, mais l'arsénite (As^{3+}) prédomine dans les zones montagneuses au sud de la région ainsi qu'au niveau de Windsor et de Magog.

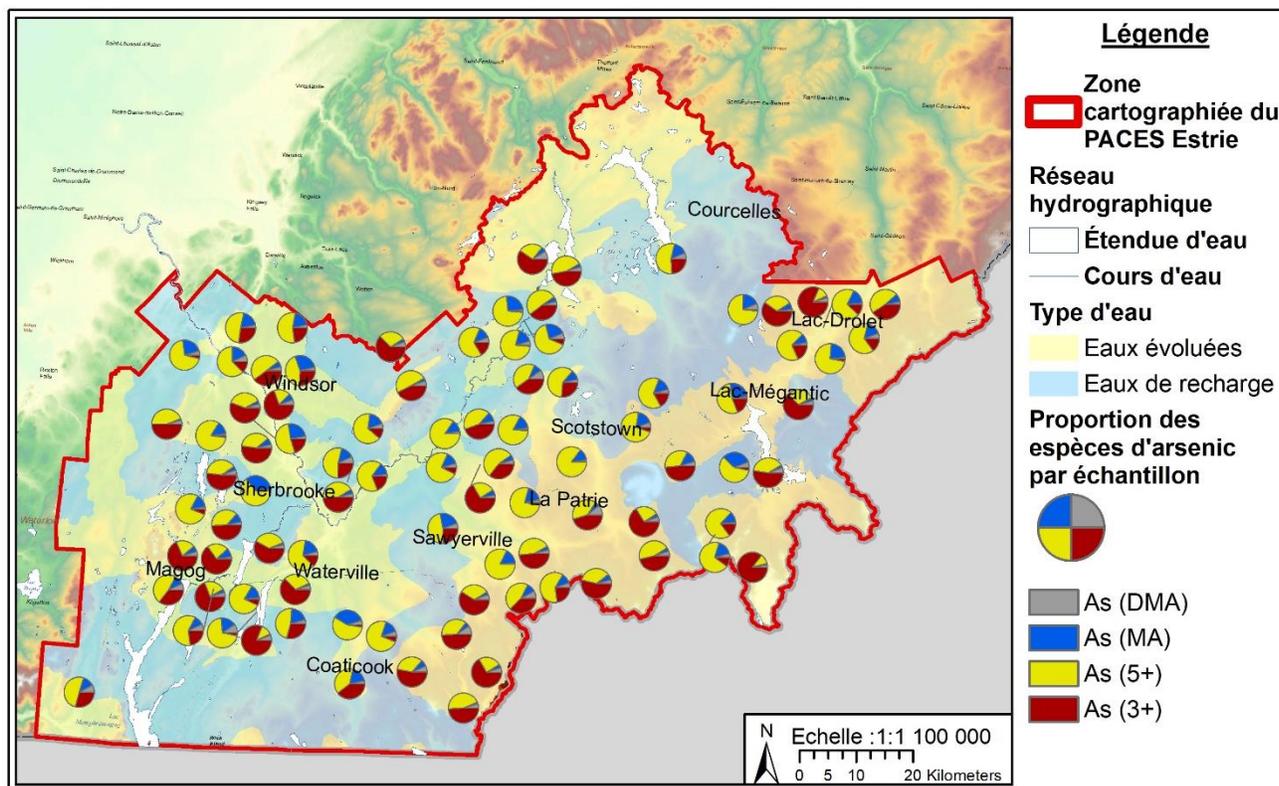


Figure 6.13 : Proportion des espèces d'arsenic déterminées dans 88 échantillons en relation avec les secteurs avec des eaux recharge et évoluées (tiré de Colléau, 2020)

Colléau (2020) a produit une matrice de corrélation entre les espèces d'arsenic et les autres composés chimiques. L'acide diméthylarsinique (DMA) et l'arsénite (As^{3+}) sont très fortement corrélés (0,991). L'acide monométhylarsonique (MA) et l'arséniate (As^{5+}) le sont aussi avec un coefficient un peu plus faible (0,875). Le DMA et l' As^{3+} sont présents lorsque les concentrations en As sont les plus importantes et en conditions plus réductrices. Le DMA et l' As^{3+} ont une corrélation positive avec le COD, le pCO_2 , le fer et le Mn alors que le MA et l' As^{5+} sont anti-corrélés à ces paramètres. La relation avec la silice, indicateur du temps de résidence, montre que le MA et l' As^{5+} sont présents dans des eaux moins évoluées contrairement au DMA et l' As^{3+} liés à des eaux plus évoluées. Cette indication est également visible entre les formes d'arsenic et l'alcalinité qui est aussi un indicateur d'évolution géochimique.

Le tableau 6.5 résume des statistiques de la concentration totale en As et des concentrations des espèces d'As pour les types d'eau et pour les 88 analyses de spéciation. La figure 6.14 illustre les proportions des espèces d'As pour les types d'eau. Les eaux de recharge non affectées par les activités anthropiques (A2b) pauvres en arsenic n'ont pas fait l'objet de spéciation. Les cellules bleues indiquent les valeurs minimales qui sont toutes observées pour le type d'eau de recharge B1b1. Les cellules orange montrent les groupes d'eau qui ont les valeurs les plus élevées. Ce sont les eaux fortement impactées par les activités anthropiques (B1a) qui ont les plus fortes concentrations en DMA et en As^{3+} , alors que le groupe d'eau évoluée sodique A1 a les plus fortes concentrations médianes d'As total et d' As^{5+} . Toutefois, beaucoup plus de détections de fortes concentrations ont été faites pour les autres groupes d'eau évoluée (B2b, B2a et surtout B1b2). Les valeurs soulignées indiquent les espèces d'As avec les médianes les plus grandes pour les groupes d'eau, soit l' As^{5+} pour tous les groupes d'eau, sauf pour B1a où l' As^{3+} est plus concentrée. Les valeurs en italiques indiquent les plus faibles médianes par groupe d'eau, et qui correspondent au DMA pour tous les groupes d'eau, sauf pour le groupe A2a où l' As^{3+} est moins présent.

Tableau 6.5 : Percentiles de la concentration totale et de celles des espèces d'arsenic pour les groupes d'eau et pour toutes les 88 analyses de spéciation du As (modifié de Colléau, 2020)

Paramètres	Centile	B1b1	A2a	B1a	A1	B2b	B1b2	B2a	Total
		N=4	N=7	N=9	N=6	N=16	N=28	N=18	N=88
Arsenic total (mg/L)	10	1.1E-03	1.2E-03	1.2E-03	1.8E-03	1.3E-03	1.2E-03	6.8E-02	1.2E-03
	50	1.5E-03	1.9E-03	5.4E-03	7.0E-03	4.6E-03	3.3E-03	3.7E-03	3.4E-03
	90	2.6E-03	7.0E-03	1.6E-02	1.6E-02	2.3E-02	1.2E-02	9.4E-03	1.5E-02
As(DMA) mg/L	10	6.6E-05	7.0E-05	6.8E-05	8.0E-05	8.7E-05	5.2E-05	3.6E-03	6.6E-05
	50	6.9E-05	9.0E-05	1.9E-04	1.8E-04	1.8E-04	1.6E-04	1.3E-04	1.3E-04
	90	1.2E-04	1.2E-04	8.0E-04	8.2E-04	1.0E-03	4.2E-04	2.5E-04	5.2E-04
As(MA) mg/L	10	1.9E-04	2.7E-04	1.3E-04	1.5E-04	1.4E-04	9.6E-05	1.9E-03	1.1E-04
	50	2.4E-04	4.2E-04	2.5E-04	3.8E-04	2.5E-04	2.8E-04	3.2E-04	3.0E-04
	90	3.8E-04	2.0E-03	1.1E-03	1.0E-03	1.5E-03	2.4E-03	1.1E-03	1.8E-03
As(5+) mg/L	10	8.1E-04	7.1E-04	5.6E-04	1.2E-03	7.1E-04	4.8E-04	9.9E-03	6.1E-04
	50	1.0E-03	1.1E-03	1.9E-03	3.0E-03	2.0E-03	1.8E-03	1.9E-03	1.8E-03
	90	2.0E-03	4.7E-03	2.8E-03	6.1E-03	5.0E-03	6.5E-03	5.9E-03	5.3E-03
As(3+) mg/L	10	2.1E-05	4.8E-05	3.5E-04	5.0E-05	2.1E-04	1.4E-04	5.5E-02	5.4E-05
	50	4.1E-05	7.1E-05	3.1E-03	1.7E-03	1.2E-03	1.1E-03	8.0E-04	7.6E-04
	90	2.1E-04	2.3E-04	1.1E-02	1.1E-02	1.3E-02	4.5E-03	2.7E-03	6.5E-03

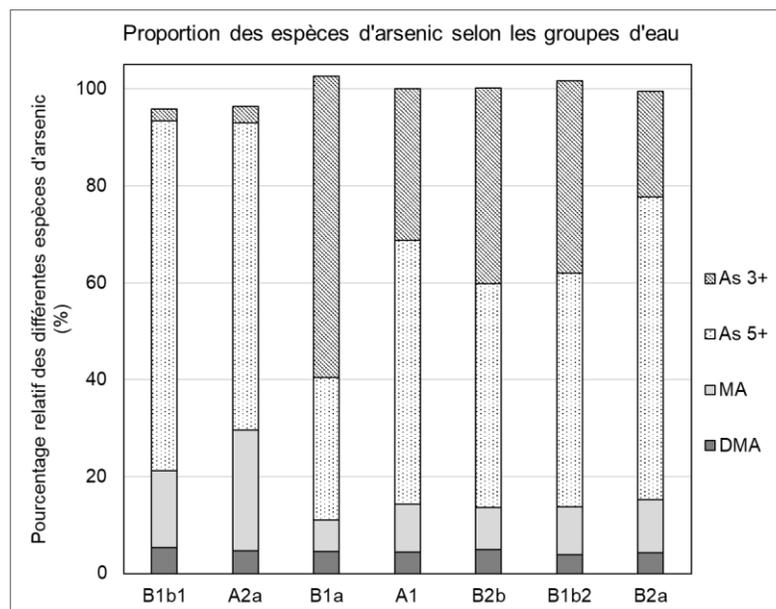


Figure 6.14 : Pourcentage relatif médian des espèces d'arsenic (DMA, MA, As⁵⁺ et As³⁺) par rapport à l'arsenic total pour les groupes d'eau (tiré de Colléau, 2020)

Au niveau des proportions des espèces d'As montrées à la figure 6.14, les eaux de recharge B1b1 et A2a présentent de faibles proportions en DMA et As³⁺, contrairement aux eaux fortement impactées par les activités anthropiques (B1a) et aux eaux évoluées géochimiquement. L'espèce As⁵⁺ est dominante pour tous les groupes d'eau, sauf pour les eaux de recharge fortement impactées par les activités anthropiques (B1a) où l'As³⁺ prédomine.

Les eaux de recharge (B1b1 et A2a) et les eaux purement sodiques (A1) sont présentes en conditions oxydantes alors que les autres groupes d'eau sont en conditions plus réductrices. Les différentes espèces d'arsenic sont présentes quelles que soient les conditions de pH et d'oxydoréduction. Cependant les plus fortes proportions en DMA et l'As³⁺ sont présentes en conditions plus réductrices. Les espèces dominantes sont l'arséniate (As⁵⁺) et l'arsénite (As³⁺) mais ces deux formes sont anti-corrélées (voir Colléau, 2020). Les statistiques montrent beaucoup de variabilité mais ces espèces sont complémentaires : lorsque les eaux contiennent beaucoup d'As⁵⁺ il y a peu d'As³⁺ et inversement. Colléau (2020) a aussi montré qu'il n'y avait pas de relation apparente entre les concentrations en manganèse et l'As⁵⁺, mais que de fortes concentrations en As³⁺ sont corrélées aux fortes concentrations en manganèse. Ainsi, les conditions favorables à la présence de manganèse semblent similaires à celles de l'As³⁺. Donc, un milieu avec des conditions plus réductrices (Eh à moins de 150 mV) est nécessaire pour retrouver de plus fortes concentrations en As³⁺ et en manganèse dans les eaux souterraines.

6.3.3.3 Modèle conceptuel des conditions contrôlant la présence de As et Mn en Estrie

Les eaux échantillonnées en Estrie proviennent majoritairement de l'aquifère rocheux fracturé. L'oxydation de minéraux sulfurés tels que la pyrite (FeS₂) est l'une des sources principales d'arsenic dans les eaux souterraines (Bondu, 2017). Des phénomènes de dissolution des oxyhydroxydes de fer et d'altération de composés argileux libèrent aussi de l'arsenic dans les eaux. En Estrie, les eaux souterraines naturellement riches en arsenic sont évoluées géochimiquement avec des temps de résidence intermédiaire ou long. Le parcours le long des voies d'écoulement à travers de couches riches en arsenic entraîne une évolution géochimique. L'évolution géochimique des eaux souterraines durant leur trajet dans l'aquifère mène à des conditions de plus en plus alcalines et réductrices qui favorisent la mobilisation de l'arsenic (Boyle et al., 1998; Lipfert et al., 2006; Smedley et Knniburgh, 2002; Yang et al., 2015). Ces mécanismes de mobilisation de l'arsenic sont peu connus au sein des aquifères fracturés dont les conditions sont très hétérogènes (O'Shea et al., 2015). Les eaux de recharge ont généralement des conditions plus oxydantes et acides qui limitent la mobilisation de l'arsenic. Cependant, certaines eaux de recharge avec un impact anthropique important créent des conditions propices à la mobilisation de l'arsenic dans l'aquifère. Ces eaux de recharge anthropisées riches en COD vont se mélanger et entraîner des conditions très réductrices libérant de l'arsenic qui était immobilisé sous forme minérale (Harte et al., 2012).

En Estrie, les eaux évoluées géochimiquement et les eaux de recharge fortement impactées par les activités anthropiques sont également riches en manganèse. Ce métal est l'un des plus abondants dans la croûte terrestre (ATSDR, 2012). La circulation des eaux souterraines à travers les couches géologiques induit un enrichissement en manganèse. Tout comme pour l'arsenic, la dissolution du manganèse est favorisée dans des conditions réductrices (Groschen et al., 2009). Le manganèse est omniprésent dans les sols du Québec et notamment dans la région de l'Estrie, et il est donc courant d'observer la présence naturelle de manganèse dans les eaux brutes (Bondu et al., 2018; Flanagan et al., 2018). D'ailleurs de nombreux résidents et municipalités possèdent des systèmes de traitement de l'eau souterraine pour le manganèse.

Ainsi, en Estrie, les eaux souterraines présentent de fortes concentrations en arsenic et manganèse. Certains secteurs sont touchés par des dépassements au-dessus de la concentration maximale acceptable de 0,01 mg/L pour l'arsenic et de la recommandation de 0,12 mg/L pour le manganèse dans l'eau potable (Québec, 2019; Santé Canada, 2006, 2019a et 2019b). C'est notamment le cas pour les municipalités de Windsor, Orford, Coaticook, Mont Mégantic, Disraeli, Dudswell, Sawyerville, Lac-Mégantic et Saint-Ludger.

La figure 6.15 illustre le modèle conceptuel des processus contrôlant la présence d'As et Mn en Estrie qui a été développé à partir de la caractérisation géochimique de l'eau souterraine dans le cadre du PACES Estrie. L'évolution géochimique à partir des eaux de recharge (A2b) le long des voies d'écoulement va entraîner un enrichissement en arsenic et manganèse dans les eaux évoluées (B2a, B2b, B1b2). Les conditions de plus en plus réductrices et alcalines favorisent la présence de ces composés dans les eaux souterraines. De plus, les eaux de recharge les plus impactées par les activités anthropiques (B1a) sont riches en COD, dont la dégradation entraîne une diminution du potentiel redox et la mobilisation de l'arsenic et manganèse. Au niveau des différentes espèces d'arsenic, la prédominance d'arsénite (As^{3+}) est observée uniquement dans ce groupe (B1a) qui a également la plus forte teneur en manganèse. L'arséniate (As^{5+}) est l'espèce d'arsenic dominante pour les autres groupes d'eau.

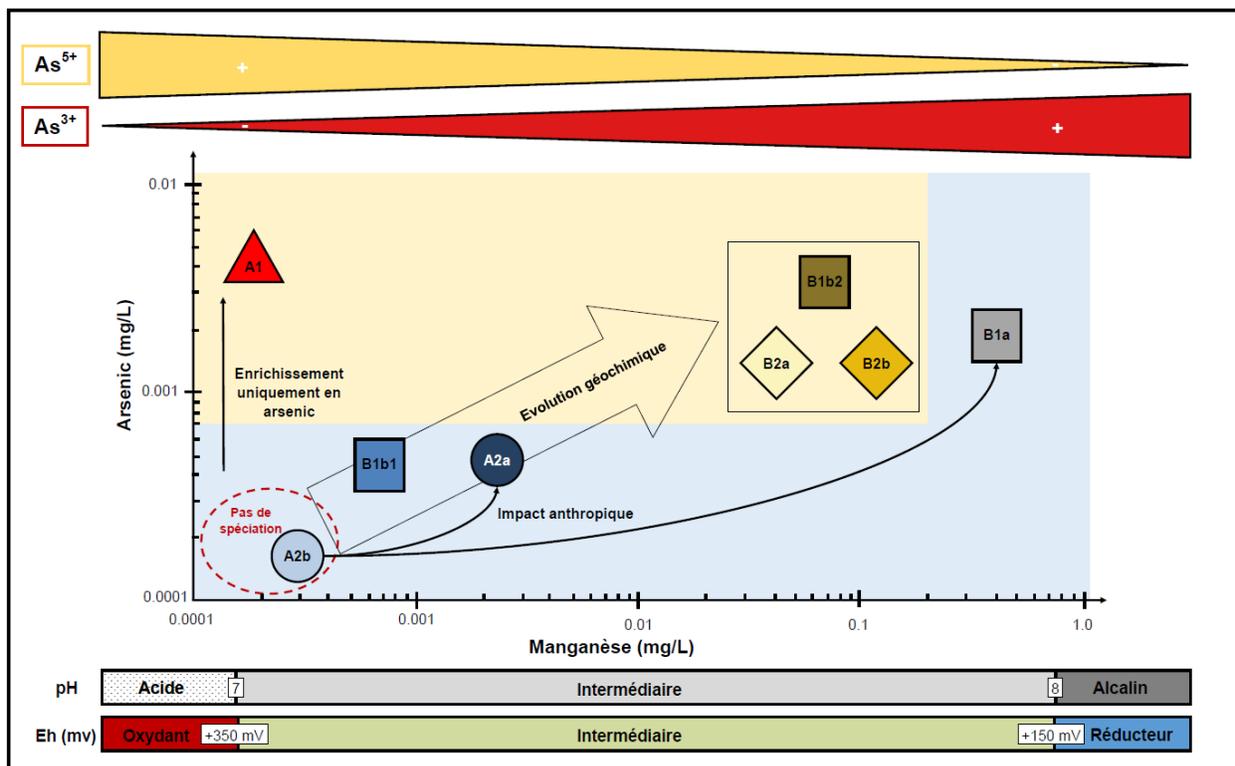


Figure 6.15 : Modèle conceptuel des conditions contrôlant la présence d'arsenic et du manganèse en Estrie (tiré de Colléau, 2020)

6.3.4 Conclusions et recommandations

Les conditions alcalines et réductrices favorisent la mobilisation de l'arsenic et du manganèse dans les eaux souterraines. Les analyses de spéciation de l'arsenic permettant de séparer les formes inorganiques (As^{5+} et As^{3+}) et organiques (DMA et MA) ont mis en évidence les corrélations entre ces formes et les autres composés géochimiques. L'arséniate (As^{5+}) est l'espèce prédominante dans tous les groupes d'eau sauf pour le groupe d'eau de recharge le plus impacté par les activités anthropiques, où l'arsénite (As^{3+}) est dominant. Il s'agit d'une eau de recharge fortement anthropisée avec de fortes concentrations en manganèse et des conditions réductrices. L'arsenic et le manganèse sont très sensibles aux conditions d'oxydoréduction et des conditions de plus en plus réductrices favorisent la présence de ces composés dans les eaux souterraines. L'Estrie est impactée par de nombreux dépassements en arsenic et manganèse qui sont nocifs pour la santé. L'analyse de l'eau des puits permettrait aux résidents de vérifier la présence de ces éléments et d'envisager des mesures de protection si nécessaires.

6.4 Risque de contamination des puits municipaux

6.4.1 Problématique et objectifs

Les eaux souterraines sont susceptibles de contenir des éléments nocifs pour la santé. Ceux-ci peuvent être soit d'origine naturelle, tels que l'arsenic et le manganèse en Estrie (section 6.3), ou d'origine anthropique en relation avec les émissions de contaminants par les activités agricoles (pesticides, fongicides, engrais), industrielles (hydrocarbures, plastifiants, sels déglacant) ou domestiques (rejets de fosses septiques, engrais). Certaines zones sont plus susceptibles de permettre aux contaminants émis en surface d'atteindre l'aquifère, il s'agit des zones dites « vulnérables ». Le concept de vulnérabilité d'un aquifère se réfère sa sensibilité à être affecté par une pression (ou une charge) de contamination imposée à la surface du sol (Foster et al., 2013). La vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional en Estrie a été évaluée au moyen de l'indice DRASTIC qui considère plusieurs caractéristiques hydrogéologiques (section 4.5).

L'évaluation de la vulnérabilité d'un aquifère à l'échelle régionale permet d'élaborer des mesures de protection, notamment via l'aménagement du territoire ou la modulation des pratiques agricoles (sections 6.5 et 6.6). Il est aussi important d'évaluer la vulnérabilité d'un puits d'approvisionnement afin de protéger les usagers de la pollution de l'eau qui alimente les systèmes de distribution (Frind et al., 2006). Comme nous l'avons vu grâce à la caractérisation géochimique de l'eau souterraine en Estrie (section 4.6) et à l'évaluation de sa qualité (section 5.3), les eaux souterraines peu profondes et récentes sont plus vulnérables aux contaminations anthropiques que les eaux profondes et anciennes. En plus des conditions hydrogéologiques reflétées par la géochimie de l'eau souterraine, le risque de contamination va aussi dépendre de la présence de sources potentielles de contamination anthropique en amont des puits d'approvisionnement.

Au Québec, le *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* (RPEP) définit, entre autres, les normes à suivre pour le prélèvement des eaux destinées à la consommation humaine et utilisées pour la transformation alimentaire (Québec, 2014). Les puits d'approvisionnement en eau sont divisés en 3 catégories selon le nombre de consommateurs desservis et le type d'usage, incluant la catégorie 1 pour les puits alimentant 500 personnes ou plus et au moins une résidence. Le RPEP exige aussi l'évaluation de la vulnérabilité des sources d'approvisionnement en eau de catégorie 1 (MELCC, 2018a). Pour ces derniers, cette évaluation implique la révision des aires de protection, l'estimation de la vulnérabilité DRASTIC dans ces aires ainsi que l'inventaire des menaces à la qualité de l'eau souterraine approvisionnant les puits. Cette évaluation a été complétée en 2021 pour la majorité des municipalités concernées.

À l'échelle régionale, la géochimie de l'eau souterraine peut aussi être utilisée pour donner des indications de la vulnérabilité d'un aquifère. Par exemple, les travaux d'hydrogéochimie de Cloutier (2004) dans les basses terres du Saint-Laurent ont été utilisés par Ross et al. (2004) pour valider l'évaluation de la vulnérabilité d'un aquifère rocheux recouvert par des sédiments du quaternaires. À l'échelle plus locale, des études ont aussi démontré l'utilité de la géochimie pour définir la vulnérabilité des captages d'eau (USGS, 2018; Mendizabal et Stuyfzand, 2011). Le principe est que la présence d'eaux jeunes et peu évoluées géochimiquement impliquerait une recharge à proximité du puits et ainsi une vulnérabilité du puits et un risque de contamination significatif si des activités polluantes sont présentes en amont du puits. À l'inverse, des eaux évoluées géochimiquement et ayant eu un long temps de résidence impliquent que le risque de contamination est plus faible. Considérant les incertitudes sur la délimitation des aires de protection et leur vulnérabilité, la caractérisation géochimique vient ainsi apporter un complément d'information sur le risque de contamination, sans remplacer les analyses de vulnérabilité des sites d'approvisionnement.

Ainsi, l'objectif des travaux spécifiques documentés dans la présente section était de mieux définir la vulnérabilité et le risque de contamination de l'eau captée par des puits municipaux de l'Estrie grâce à une caractérisation géochimique et isotopique détaillée de l'eau captée, incluant son temps de résidence (âge). Les résultats de ces travaux devraient aider à prendre des décisions concernant la gestion des activités potentiellement polluantes dans les aires d'alimentation en eau des puits municipaux. Ces résultats vont ainsi compléter les travaux exigés par le RPEP. Ces travaux visaient aussi à permettre une meilleure implication des municipalités dans le PACES Estrie grâce à un contact direct avec les acteurs locaux.

Les travaux présentés dans cette section ont été réalisés dans le cadre de la maîtrise d'Élise Colléau (2020) qui a été faite dans un cheminement bidiplômant à l'INRS et à l'Université de Rennes 1. Plus de détails sur l'ensemble des travaux se trouvent dans le mémoire.

6.4.2 Méthodologie

La géochimie et datation réalisées sur 27 puits, incluant 15 puits d'approvisionnement municipaux, a permis de définir leur vulnérabilité et leur risque de contamination. Pour les puits municipaux (tableau 6.6), 9 prélèvements sont de catégorie 1, 5 prélèvements sont de catégorie 2 et 1 prélèvement est de catégorie 3. Ces puits municipaux desservent généralement de petites municipalités, avec en moyenne 1500 habitants pour un maximum de 6000. Les débits des puits sont modérés, avec une moyenne de 850 m³/jour et un maximum de 4000 m³/jour. Neuf (9) des puits s'approvisionnent dans l'aquifère rocheux et six (6) d'un aquifère granulaire. Les conditions de confinement des puits sont variables, avec 5 puits en condition libre, 7 puits en condition semi-confinée et 3 puits en condition confinée.

Tableau 6.6 : Caractéristiques générales des puits municipaux échantillonnés

Municipalité	MRC	Catégorie	Population desservie	Débit (m ³ /j)	Aquifère
Richmond	Val-Saint-François	1	4000	2400	Granulaire
Austin	Memphrémagog	3	100	<75	Roc
Canton d'Orford	Memphrémagog	1	8000	>75 & <379	Granulaire
Potton	Memphrémagog	1	1192	350	Granulaire
Stanstead	Memphrémagog	1	4110	>75 & <379	Roc
Coaticook	Coaticook	1	6700	1440	Granulaire
Sainte-Edwidge-de-Clifton	Coaticook	2	128	<75	Roc
Saint-Herménégilde	Coaticook	2	90	<75	Roc
Ascot Corner	Haut-Saint-François	1	640	>75 & <379	Granulaire
Dudswell	Haut-Saint-François	2	270	<75	Roc
La Patrie	Haut-Saint-François	2	395	140	Roc
Weedon	Haut-Saint-François	1	1073	900	Granulaire
Lac-Drolet	Le Granit	1	700	<75	Roc
Lambton	Le Granit	1	1100	171	Roc
Piopolis	Le Granit	2	120	231	Roc

L'eau échantillonnée a été analysée pour les mêmes paramètres que les puits résidentiels, en plus de faire l'objet d'analyses isotopiques détaillées afin de préciser le temps de résidence de l'eau et définir les proportions d'eaux jeunes (moins de 50 ans) et plus anciennes. Les échantillons d'eau souterraine ont été prélevés en septembre 2019. Les méthodes analytiques sont décrites brièvement à la section 2.3 et en détail par Colléau (2020).

L'évaluation de la vulnérabilité et du risque de contamination se fait en 4 étapes (tableau 6.7) :

- 1) Identification du type d'eau (eau de recharge ou évoluée) : la composition chimique permet de classer l'eau dans un groupe d'eau qui appartient soit à un type d'eau de recharge ou à un type d'eau évoluée géochimiquement (section 4.6.3). Normalement, un type d'eau de recharge indiquerait une vulnérabilité plus grande qu'un type d'eau évoluée. Cette information n'est pas directement utilisée pour évaluer la vulnérabilité, mais elle permet d'évaluer la cohérence de l'âge de l'eau par rapport au type d'eau souterraine.
- 2) Les indicateurs d'âge de l'eau souterraine sont considérés pour d'abord définir la classe d'âge radiocarbone-tritium (section 4.6.3) entre « eau moderne », « mélange » et « eau ancienne ». La classification de la vulnérabilité elle-même se fait sur la base de la proportion d'eau moderne indiquée par l'interprétation des concentrations des CFC et du SF₆ (tableau 6.8) qui peut être « faible », « modérée » ou « élevée ».
- 3) Une vérification est faite de la présence ou non de composés qui peuvent être d'origine anthropique afin de déterminer si l'eau a été « impactée » par les activités anthropiques qui auraient dégradé sa qualité. Une dégradation est définie en référence aux concentrations observées dans une eau de recharge non impactée (groupe A2b), ce qui n'implique pas nécessairement un dépassement des normes de potabilité.
- 4) L'importance des activités anthropiques en amont du puits est évaluée pour juger du risque de dégradation de la qualité de l'eau du puits en tenant compte de la vulnérabilité et de l'importance des activités (tableau 6.8).

Tableau 6.7 : Paramètres considérés pour établir la vulnérabilité et le risque de contamination des puits d'approvisionnement (modifié de Colléau, 2020)

Indicateurs	Paramètres
Type d'eau vs composition géochimique	Groupe d'eau – Eau de recharge ou évoluée
Concentration en tritium	Valeur (en TU)
Temps de résidence	Âge ¹⁴ C corrigé (yBP)
Classe d'âge radiocarbone-tritium	Eau moderne / Mélange / Eau ancienne
CFCs et SF ₆	Pôle récent _____ %
	Âge (ans)
	Pôle ancien _____ %
	Âge (ans)
¹⁴ C	Âge du pôle ancien (yBP)
Vulnérabilité géochimique liée à la proportion d'eau récente	Faible / Modérée / Élevée
Composés anthropiques (mg/L)	Chlorures : Cl ⁻
	Nitrites et Nitrates : NO ₂ ⁻ et NO ₃ ⁻
	Sulfates : SO ₄ ²⁻
	MDT
Eau impactée par les composés anthropiques	Un signe par composé : oui (+) et non (-)
Activités anthropiques	Présence/Absence ; type ; localisation
Niveau de risque pour la qualité	Niveau de très faible à majeur

Pour mettre en évidence la présence ou non d'une contamination par des composés anthropiques, les concentrations en Cl^- , NO_2^- et NO_3^- , SO_4^{2-} et MDT du groupe d'eau de recharge non affecté par les activités anthropiques (A2b) ont été utilisées comme référence. Le 90^e centile des concentrations de ces composés est multiplié par 2. Ainsi, les échantillons dépassant le seuil pour un ou plusieurs de ces 4 paramètres sont considérés comme étant impactés par une pollution d'origine anthropique.

Le tableau 6.8 montre la grille utilisée pour caractériser les niveaux de vulnérabilité (faible, modérée, élevée, impactée) sur la base du pourcentage d'eau récente indiqué par l'interprétation des analyses des CFC et du SF₆ (voir détails dans Colléau, 2020). Ensuite, l'intensité des activités anthropiques (absentes ou faibles, modérées, importantes) en amont du puits est prise en compte puisque ces dernières représentent un risque de contamination significatif. Ainsi, le niveau de vulnérabilité et les activités anthropiques permettent de définir le niveau de risque qui comporte 6 classes : très faible, faible, modéré, significatif, important, majeur.

Tableau 6.8 : Grille d'évaluation de la vulnérabilité et du risque (tiré de Colléau, 2020)

Vulnérabilité	Activités anthropiques		
	<i>Absentes ou faibles</i>	<i>Modérées</i>	<i>Importantes</i>
<i>Faible (<20% eau moderne)</i>	Risque très faible	Risque faible	Risque modéré
<i>Modérée (20-50%)</i>	Risque faible	Risque modéré	Risque significatif
<i>Élevée (>50%)</i>	Risque modéré	Risque significatif	Risque important
<i>Impactée</i>	Risque significatif (source à identifier)	Risque important (actions de gestion requises)	Risque majeur (actions de protection requises)

Les analyses complètes regroupant des données géochimiques et de datation (¹⁴C, ³H, CFCs/SF₆) ont permis d'évaluer la vulnérabilité et les risques face à une contamination pour 27 puits (15 puits municipaux, 8 puits privés et 4 puits du réseau de suivi). La géochimie et la présence d'eau moderne ont défini la vulnérabilité (faible, modérée, élevée, ou impactée) et les photos aériennes ont montré la présence ou non d'activités anthropiques (absentes, modérées, ou importantes) pour chaque puits. Le risque de contamination a pu ensuite être évalué, en se basant à la fois sur le niveau de vulnérabilité (intrinsèque au puits), et sur le niveau des activités anthropiques.

En plus de la documentation détaillée des travaux retrouvée dans Colléau (2020), des « fiches » documentent les résultats spécifiques obtenus pour les 15 puits municipaux. Ces fiches sont compilées à l'annexe 4I du présent rapport. Ces fiches décrivent (1) la méthodologie employée pour évaluer le niveau de risque du captage, (2) le contexte géologique et hydrogéologique du prélèvement d'eau municipal, (3) les conditions géochimiques de l'eau du puits analysée, puis (4) une interprétation des résultats. Ces fiches contiennent aussi (1) les résultats analytiques, (2) une évaluation géochimique de la vulnérabilité et du risque de contamination du point de prélèvement sous forme de tableaux et enfin (3) des cartes et des figures permettant de replacer le captage dans son contexte local. Enfin, puisque l'objectif de ces fiches est de rendre l'information le plus largement compréhensible, un glossaire expliquant les termes techniques y est présenté.

6.4.3 Principaux résultats

A l'aide de la grille d'évaluation (tableau 6.8), la vulnérabilité, le niveau des activités anthropiques et le risque de contamination des 27 puits ont été évalués. Le tableau 6.9 compile les résultats ainsi obtenus. Au niveau de la vulnérabilité, 5 puits ont un niveau faible et 6 puits présentent un niveau modéré, ce qui représente un peu plus de 40% des puits, alors que 10 puits ont un niveau élevé et 6 puits ont des eaux impactées par les activités anthropiques, pour près de 60% des puits avec une vulnérabilité importante. Toutefois, le fait que les activités anthropiques sont généralement faibles (11 puits) ou modérées (13 puits) fait en sorte de limiter le risque de contamination puisque seulement 3 puits ont des activités importantes en amont. Ainsi, le niveau de risque de contamination va de très faible à faible ou à modéré pour 63% des puits (17 puits), alors que le risque est significatif, important ou majeur pour 37% des puits (10 puits). Lorsque le risque est modéré, faible ou très faible, les activités anthropiques en amont du captage doivent tout de même être gérées même si leur incidence est moins susceptible de mener à une dégradation de la qualité de l'eau captée. Par contre, si le risque est significatif, important ou majeur, une gestion active des activités anthropiques en amont du captage devrait être faite. C'est particulièrement important si la qualité de l'eau du puits a été considérée impactée par des activités anthropiques. Dans ce cas, les activités susceptibles d'avoir causé cet impact devraient être identifiées et des mesures de mitigation mises en place.

Tableau 6.9 : Évaluation de la vulnérabilité et du risque de contamination pour tous les 27 puits ayant fait l'objet d'une analyse complète (modifié de Colléau, 2020)

Vulnérabilité	Activités anthropiques			Total
	Faibles	Modérées	Importantes	
Faible (<20% moderne)	1	4	0	5
Modérée (20-50%)	3	2	1	6
Élevée (>50%)	7	2	1	10
Impactée	0	5	1	6
Total	11	13	3	27

Risque	Très faible	Faible	Modéré	Significatif	Important	Majeur
	1	7	9	3	6	1

Note : Les lignes indiquent la vulnérabilité, les colonnes indiquent le niveau des activités anthropiques et les couleurs indiquent le niveau de risque

Le tableau 6.10 permet de mettre en relation la vulnérabilité, les activités anthropiques et le niveau de risque avec les conditions hydrogéologiques, soit le type d'aquifère (rocheux ou granulaire) et le niveau de confinement du puits (libre, semi-captif ou captif). La vulnérabilité des puits est majoritairement élevée à impactée pour les puits au roc et dans des conditions de confinement libre. La vulnérabilité est plutôt faible à modérée pour les puits situés dans les matériaux granulaires et dans des conditions de confinement captif. Les activités anthropiques ne sont pas directement reliées aux conditions hydrogéologiques, mais leur niveau, combiné à la vulnérabilité, va influencer le niveau de risque de contamination. Les risques sont considérés être de très faibles à modérés pour les puits dans les matériaux granulaires et dans les conditions de confinement semi-captif à captif. Les puits au roc avec des conditions de confinement libre présentent les risques les plus élevés, allant de modérés à importants.

Tableau 6.10 : Évaluation de la vulnérabilité et du risque selon les conditions hydrogéologiques (type d'aquifère et confinement) (modifié de Colléau, 2020)

Indicateurs et classes		Type d'aquifère		Type de confinement			Total
		Roc	Granulaire	Libre	Semi-Captif	Captif	
		19	8	14	9	4	
Vulnérabilité	Faible	3	2	1	2	2	5
	Modérée	3	3	2	2	2	6
	Elevée	9	1	8	2	0	10
	Impactée	4	2	3	3	0	6
Activités anthropiques	Faibles	9	2	7	3	1	11
	Modérées	7	6	5	5	3	13
	Importantes	3	0	2	1	0	3
Risque	Très faible	1	0	0	0	1	1
	Faible	4	3	2	4	1	7
	Modéré	6	3	6	1	2	9
	Significatif	3	0	2	1	0	3
	Important	4	2	4	2	0	6
	Majeur	1	0	0	1	0	1

Le tableau 6.11 met en relation les groupes d'eau avec la vulnérabilité, les activités anthropiques et le niveau de risque. On constate que ce sont les eaux de type recharge qui ont les vulnérabilités et les risques importants alors que généralement les vulnérabilités et les risques sont faibles à modérés pour les eaux évoluées.

Tableau 6.11 : Évaluation de la vulnérabilité et du risque selon les groupes d'eau (tiré de Colléau, 2020)

Indicateurs et classes		Eaux de type « recharge »				Eaux de type « évolué »			
		A2b	B1b1	A2a	B1a	A1	B2b	B1b2	B2a
		N=4	N=3	N=6	N=2	N=2	N=3	N=3	N=4
Vulnérabilité	Faible	-	-	-	-	1	1	-	3
	Modérée	-	1	-	-	-	1	3	1
	Elevée	4	2	2	-	1	1	-	-
	Impactée	-	-	4	2	-	-	-	-
Activités anthropiques	Absentes	3	2	1	-	2	2	1	-
	Modérées	1	-	4	2	-	1	2	3
	Importantes	-	1	1	-	-	-	-	1
Risque	Très faible	-	-	-	-	1	-	-	-
	Faible	-	1	-	-	-	2	1	3
	Modéré	3	1	1	-	1	1	2	-
	Significatif	1	-	1	-	-	-	-	1
	Important	-	1	3	2	-	-	-	-
	Majeur	-	-	1	-	-	-	-	-

On note particulièrement que la totalité des échantillons des groupes B1a et A2a ont des vulnérabilités élevées ou des eaux impactées par des composés anthropiques. En revanche, les groupes d'eau évoluée présentent généralement une vulnérabilité faible ou modérée et seulement dans deux cas une vulnérabilité élevée. Parmi ces groupes, les eaux avec le plus long temps de résidence (B2a) présentent une vulnérabilité généralement faible. En termes de risques, les groupes d'eau impactés par les activités anthropiques (A2a et B1a) ont un niveau de risque important, voire majeur, alors que les groupes non affectés (A2b et B1b1) présentent plutôt un risque modéré. Les groupes d'eau évoluée géochimiquement ont un risque modéré (B1b2) ou faible (B2b et B2a), voire très faible (A1), lorsque les eaux très anciennes prédominent. Il existe donc une relation claire entre la géochimie régionale, la vulnérabilité et les risques de contamination. Les groupes d'eau représentent ainsi de bons indicateurs de la vulnérabilité et du risque de contamination des puits d'approvisionnement.

Le tableau 6.12 compile les résultats obtenus spécifiquement pour les 15 puits municipaux. Le tableau indique le type d'aquifère (roc ou granulaire), le groupe d'eau et les évaluations de la vulnérabilité, des activités anthropiques et du risque de contamination. Encore une fois, on constate que ce sont les puits avec des eaux de recharge (B1b1 et A2a) qui ont les plus fortes vulnérabilités à des niveaux élevées ou impactées, sauf pour Austin avec une vulnérabilité modérée. Ainsi, sauf pour les puits avec des activités anthropiques faibles, les puits avec des eaux de recharge ont un niveau de risque généralement important ou à tout le moins significatif. Au contraire, les puits avec des eaux évoluées (B2a, B2b, B1b2, A1) ont généralement des vulnérabilités et des risques faibles ou modérés, sauf pour La Patrie où la vulnérabilité a été jugée élevée. On constate finalement que, logiquement, les puits au roc sont plus susceptibles d'avoir des eaux de recharge et donc des vulnérabilités et des risques importants, alors que les puits exploitant des aquifères granulaires ont plus souvent des eaux évoluées qui sont reliées à des vulnérabilités et des risques faibles ou modérés.

Tableau 6.12 : Évaluation de la vulnérabilité et du risque pour les puits municipaux

Municipalité	Aquifère	Groupe d'eau	Vulnérabilité	Activités anthropiques	Risque
Austin	Roc	B1b1	Modérée	Faibles	Faible
Saint-Herménégilde	Roc	B1b1	Élevée	Faibles	Modéré
Lambton	Roc	B1b1	Élevée	Importantes	Important
Richmond	Granulaire	A2a	Impactée	Modérées	Important
Stanstead	Roc	A2a	Élevée	Modérées	Significatif
Sainte-Edwidge-de-Clifton	Roc	A2a	Élevée	Faibles	Modéré
Dudswell	Roc	A2a	Impactée	Modérées	Important
Piopolis	Roc	A2a	Impactée	Modérées	Important
Ascot Corner	Granulaire	B2a	Faible	Modérées	Faible
Weedon	Granulaire	B2a	Faible	Modérées	Faible
Potton	Granulaire	B2b	Modérée	Faibles	Faible
Orford	Granulaire	B1b2	Modérée	Modérées	Modéré
Coaticook	Granulaire	B1b2	Modérée	Modérées	Modéré
Lac-Drolet	Roc	B1b2	Modérée	Faibles	Faible
La Patrie	Roc	A1	Élevée	Faibles	Modéré

6.4.4 Conclusions et recommandations

Les résultats obtenus avec les différents indicateurs d'âge utilisés donnent une bonne idée de la vulnérabilité et du risque pour les puits d'approvisionnement. Les CFCs/SF₆ permettent d'estimer les proportions d'eau moderne et ancienne qui sont prises en compte dans l'estimation de la vulnérabilité. L'interprétation couplée du tritium dans le pôle récent et du ¹⁴C pour le pôle ancien avec les CFCs/SF₆ a permis de sélectionner l'hypothèse la plus vraisemblable de mélange d'eau moderne et ancienne tout en jugeant du niveau d'incertitude de l'estimation. La géochimie et les outils de datation (¹⁴C, ³H, CFCs/SF₆) utilisés dans cette étude donnent ainsi des indications sur le besoin relatif de protéger les aires de protection des puits d'approvisionnement municipaux.

La vulnérabilité et les activités anthropiques ont été considérés conjointement pour établir le risque de contamination de l'eau souterraine approvisionnant un puits. La vulnérabilité et le risque des puits d'approvisionnement face à une contamination ont été établis pour 27 puits, et plus particulièrement pour 15 puits municipaux. Selon la proportion d'eau moderne et la présence de composés anthropiques (Cl, NO₂-NO₃, SO₄, solides dissous totaux) la vulnérabilité est classée de faible à impactée. La présence d'activités anthropiques modérées à importantes entraîne un risque de contamination accru pour les puits d'approvisionnement. Une gestion active des activités anthropiques en amont des puits serait recommandée lorsque le niveau de risque a été jugé significatif, important ou majeur. Dans le cas d'un risque modéré, une surveillance des paramètres physico-chimiques serait tout de même souhaitable.

Ces travaux montrent l'intérêt d'utiliser des analyses géochimiques et des indicateurs d'âge pour obtenir directement la vulnérabilité et le risque de contamination de puits d'approvisionnement. Cette méthode relativement facile à mettre en œuvre et peu coûteuse peut aider les prises de décisions dans les programmes de gestion des aires de protection en fournissant des informations complémentaires aux évaluations de la vulnérabilité des sources d'approvisionnement en eau souterraine.

Au niveau du développement de la méthode, les classes de vulnérabilité et de risque ont été bien définies, mais l'évaluation de la présence d'activités anthropiques reste à améliorer pour qu'elle soit applicable quantitativement et non seulement qualitativement. L'utilisation de la méthode de datation tritium-hélium pourrait aussi être utile car elle permettrait de vérifier les proportions d'eau récente évaluées à l'aide des CFCs/SF₆. Des analyses supplémentaires de bactériologie et de pesticides pourraient également être envisagées afin d'affiner l'évaluation de la vulnérabilité et du risque de contamination des puits d'approvisionnement ainsi que pour aider à préciser la nature des activités anthropiques pouvant être responsables d'une dégradation de qualité.

6.5 Démarche d'élaboration du plan d'action sur les eaux souterraines

6.5.1 Problématique et objectifs

Au début des années 2000, conscients des menaces qui pèsent sur les ressources en eau, les gouvernements de nombreux états ont entrepris la mise en place d'un cadre règlementaire visant à assurer une gestion durable des eaux. À ce titre, la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est reconnue depuis le début des années 1990 comme une approche valable de gestion durable de l'eau. Dans cette perspective, la GIRE implique d'utiliser des principes de bonne gouvernance, qui requiert à son tour une participation éclairée de l'ensemble des acteurs de l'eau d'un bassin versant. Afin de participer, ces acteurs doivent acquérir et partager les mêmes connaissances de base à propos des eaux de surface et souterraines d'un bassin versant (CAC, 2009; Hassing et al., 2009). Toutefois, les acteurs de l'eau ont de la difficulté à s'approprier les connaissances sur les eaux souterraines. L'origine du problème est variable, mais il résulte, entre autres, de la complexité des concepts reliés aux eaux souterraines (Simpson et de Loe, 2020) ainsi que dans la façon dont les connaissances scientifiques sont partagées avec les acteurs par les scientifiques qui ont développé ces connaissances (Molle et Closas, 2020).

Au tournant des années 2000, le Gouvernement du Québec a amorcé des démarches orientées vers une gestion durable des ressources en eau. Notamment, avec la *Loi sur l'eau* (Québec, 2021), les organismes de bassins versants (OBV) ont vu leur rôle de gouvernance confirmé dans le cadre de la gestion intégrée par bassin versant (GIEBV). Les OBV ont notamment le mandat de mobiliser les acteurs de l'eau (MRC, municipalités, UPA, organismes de protection environnementale, industries, etc.) en vue d'élaborer un plan directeur de l'eau (PDE). Le PDE inclut un portrait et un diagnostic du bassin versant ainsi qu'un plan d'action visant la protection des ressources en eau (MDDEP, 2011c). En matière d'aménagement du territoire, les MRC et les municipalités peuvent tirer profit du PDE au moment d'intégrer des mesures de protection dans leurs propres documents de planification, soit respectivement le Schéma d'aménagement et de développement (SAD) et le Plan d'urbanisme (PU).

À ce jour, des projets PACES ont été réalisés ou sont en voie d'être complétés dans la majorité des régions municipalisées du Québec (figure 1.1, section 1.1; MELCC, 2021a). Au niveau des connaissances sur les eaux souterraines, ces projets constituent la principale source sur laquelle les OBV peuvent compter pour élaborer leur PDE. Cependant, ces connaissances ont été jusqu'ici très peu utilisées à cet effet. De même, une revue non systématique des SAD du Québec indique une situation similaire pour les MRC. Dans ce contexte, l'objectif des travaux décrit dans la présente section était de développer une démarche collaborative avec les acteurs de l'eau afin d'élaborer le plan d'action sur les eaux souterraines pour les PDE des deux OBV de la région d'étude du PACES Estrie. La présente section fait un court résumé des travaux réalisés dans le cadre de la maîtrise de Renaud Delisle en aménagement du territoire à l'Université Laval (voir les détails dans Delisle, 2022).

6.5.2 Méthodologie

Pour développer une démarche permettant l'élaboration d'un plan d'action sur les eaux souterraines avec des acteurs de l'eau en Estrie, une approche ascendante et descendante (approche experte et participative) a été choisie afin de faire dialoguer les connaissances scientifiques et citoyennes (expérientielles). De plus, des efforts ont été dédiés par l'équipe de recherche pour mettre en place des conditions favorables à une appropriation des enjeux par les acteurs de l'eau.

La démarche impliquait notamment les étapes suivantes (figure 6.16) : (1) réaliser des entrevues semi-dirigées afin de comprendre les contextes de prise de décisions concernant les eaux souterraines en aménagement du territoire au niveau régional, (2) sélectionner des enjeux prioritaires régionaux en se basant sur les principales préoccupations des acteurs, (3) identifier les acteurs-clés en lien avec ces enjeux, (4a) développer des indicateurs de gestion durable des eaux souterraines pour faciliter la présentation des connaissances reliées aux enjeux, et (4b) raffiner l'approche d'implication des acteurs en privilégiant notamment des ateliers collaboratifs en petits groupes et en faisant porter les ateliers sur un seul enjeu principal afin d'orienter les échanges et de canaliser les efforts d'identification d'actions envisageables.

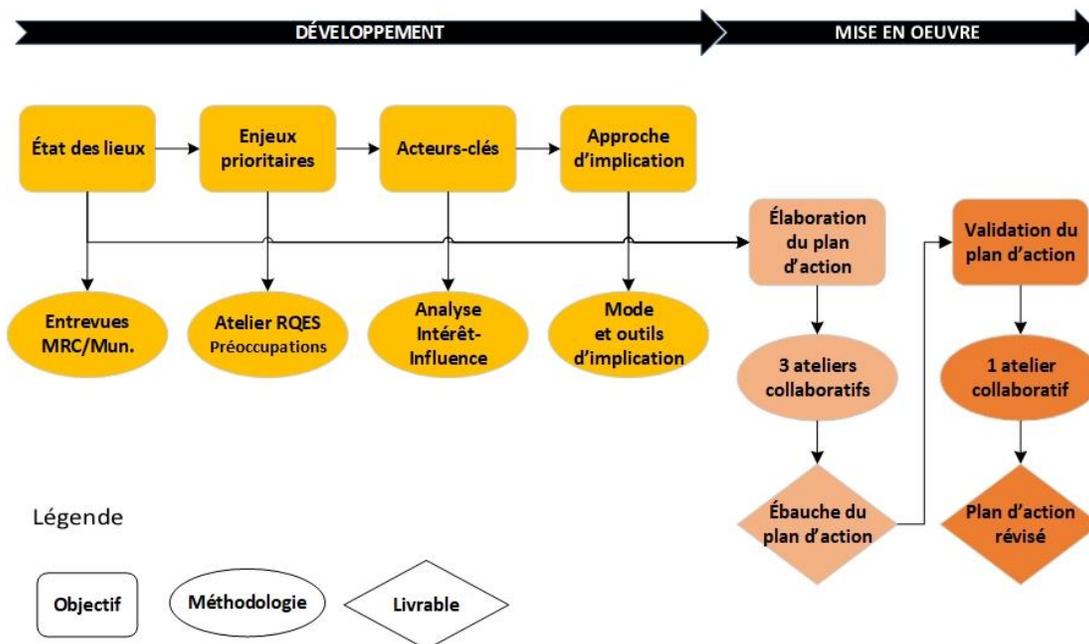


Figure 6.16 : Schéma illustrant la démarche d'élaboration du plan d'action (Delisle, 2022)

La démarche a conduit à la réalisation de trois ateliers d'élaboration du plan d'action au cours desquels les participants ont échangé activement tout en s'appropriant les notions reliées aux enjeux. Ensuite, une synthèse puis une analyse de l'ensemble des informations colligées au cours des ateliers collaboratifs a permis à l'équipe de recherche de produire une ébauche de plan d'action incluant plusieurs informations utiles pour contextualiser les actions (e.g. étapes préalables, acteurs pressentis, commentaires). Finalement, une majorité d'acteurs rencontrés lors des ateliers collaboratifs a participé à un atelier de validation qui a fourni l'information nécessaire pour valider l'ébauche et produire une version révisée du plan d'action. Les trois ateliers d'élaboration du plan d'action ont eu lieu les 2 octobre et 24 novembre 2020 ainsi que le 28 janvier 2021 (Tableau 6.13). Entre 13 et 16 acteurs, incluant les quatre membres de l'équipe de recherche, ont participé aux ateliers qui ont eu lieu en vidéoconférence. L'atelier de validation a quant à lui eu lieu le 9 juin 2021 par vidéoconférence et rassemblait 17 acteurs.

L'Atelier #1 a mis l'accent sur l'enjeu « Contamination par de l'arsenic ou du manganèse d'origine naturelle ». L'objectif de cet atelier était d'identifier comment le PACES Estrie pourrait supporter la Direction de la Santé Publique (DSP) de l'Estrie dans son rôle de prévention des problèmes de santé liés à la qualité de l'eau potable. L'Atelier #2 a mis l'accent sur l'enjeu « Protection des zones de recharge ». L'objectif de cet atelier était d'explorer comment les MRC et la ville de Sherbrooke peuvent contribuer à la protection des zones de recharge des eaux souterraines. L'Atelier #3 a repris l'enjeu de l'Atelier #2 mais en faisant intervenir des acteurs du secteur agricole

(scientifiques, professionnels, fonctionnaires, etc.). En plus d'identifier un ensemble d'actions ou de pratiques agricoles visant la protection des eaux souterraines, l'Atelier #3 avait également pour objectif de répondre à des questions laissées en suspens à la suite de l'Atelier #2. Il s'agissait de dresser un portrait sommaire de l'évolution de l'utilisation des fertilisants et pesticides en agriculture au Québec ainsi que des orientations gouvernementales en cette matière.

Tableau 6.13 : Enjeux et acteurs-clés participants pour les ateliers d'élaboration du plan d'action (Delisle, 2022)

Atelier	Enjeu principal	Enjeu associé	Acteurs-clés
1	Contamination des eaux souterraines par de l'arsenic ou du manganèse d'origine naturelle	Vulnérabilité des puits privés	DSP-Estrie, MELCC (dir. cent. et rég.), 2 OBV
2	Protection des zones de recharge des eaux souterraines	Activités agricoles	5 MRC, 2 OBV, UPA-Estrie, Ville de Sherbrooke
3		-- Vulnérabilité des puits privés	AAC, CLUB AGRO-Estrie, FADQ-Estrie, IRDA, MAPAQ (dir. cent. et rég.), MELCCFP (dir. cent.), 2 OBV, UPA-Estrie

AAC = Agriculture et Agroalimentaire Canada, DSP-Estrie = Direction de santé publique de l'Estrie, FADQ = Financière agricole du Québec, IRDA = Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, MAPAQ = Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation, MELCCFP = Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, MRC = Municipalités régionales de comté, OBV = Organismes de bassins versants, UPA = Union des producteurs agricoles

6.5.3 Principaux résultats

L'identification des enjeux prioritaires régionaux a été faite en se basant sur les préoccupations formulées par des acteurs de l'eau de l'Estrie lors d'un atelier du RQES (2019) antérieur à la démarche. L'atelier du RQES, qui a eu lieu à Sherbrooke en octobre 2018, regroupait 26 acteurs de l'eau représentant divers organismes régionaux (MRC, municipalités, ministères, etc.) et champs d'expertise (environnement, aménagement du territoire, travaux publics, etc.). À cet atelier, les acteurs ont notamment été invités à formuler leurs préoccupations en lien avec la protection et la gestion des eaux souterraines sur leur territoire. Ainsi, neuf préoccupations principales ont été formulées par les acteurs (tableau 6.14).

Les préoccupations ont fait l'objet d'une sélection par l'équipe de recherche pour s'assurer que celles-ci correspondent à des enjeux prioritaires identifiés sur la base des résultats du PACES Estrie. Ainsi, les enjeux retenus devaient : (1) avoir une portée régionale et (2) être couverts par le PACES Estrie. Finalement, cinq préoccupations (tableau 6.14) ont été retenues comme étant des enjeux prioritaires régionaux devant faire partie de la démarche.

Le tableau 6.15 présente une version simplifiée du plan d'action sur les eaux souterraines à la suite de l'atelier de validation (pour une version complète, voir Delisle, 2022). Le plan contient le libellé de l'action, des détails sur sa mise en œuvre, et indique quels acteurs sont pressentis pour réaliser l'action. La version complète du plan contient aussi des détails précisant la nature de l'action. Le plan comprend ainsi huit actions que l'on peut regrouper dans les catégories suivantes : (1) transfert de connaissances (action #1), (2) acquisition de données de terrain (actions #2 et #6), (3) sensibilisation ou accompagnement des acteurs (actions #3, #4, #5 et #7) et (4) mise en place de mesures de protection des eaux souterraines (action #8).

Tableau 6.14 : Préoccupations des acteurs et enjeux prioritaires régionaux retenus pour la démarche (adapté de RQES, 2019) (Delisle, 2022)

Préoccupations des acteurs	Enjeux retenus
1. Protection des zones de recharge	Oui
2. Connectivité avec les milieux humides et hydriques	Non (1)
3. Impacts des activités agricoles	Oui
4. Contamination par de l'arsenic ou du manganèse d'origine naturelle	Oui
5. Impact sur la recharge de l'imperméabilisation des surfaces par de nouveaux projets résidentiels	Non (1)
6. Vulnérabilité des puits privés	Oui
7. Pénurie d'eau / baisse de débit	Non (2)
8. Localisation des puits privés en lien avec le respect des distances réglementaires (e.g. pour l'épandage et le stockage de déjections animales)	Oui (3)
9. Impact des installations septiques sur la qualité de l'eau des puits privés	Non (4)
Notes :	
(1) Cet enjeu n'a pas été retenu puisqu'il n'est traité que partiellement dans le PACES Estrie	
(2) Cet enjeu n'a pas été retenu comme prioritaire selon les résultats du PACES Estrie	
(3) Cet enjeu est abordé conjointement avec l'enjeu « Vulnérabilité des puits privés »	
(4) Cet enjeu n'est pas traité dans le PACES Estrie	

Tableau 6.15 : Version simplifiée du plan d'action sur les eaux souterraines qui pourra être intégré aux PDE des OBV couvertes par le PACES Estrie (Delisle, 2022)

No	ACTION ENVISAGEABLE	MÉTHODE DE MISE EN OEUVRE OU ÉTAPES PRÉALABLES À LA MISE EN OEUVRE DE L'ACTION	ACTEURS PRESSSENTIS POUR LA RÉALISATION DE L'ACTION
1	Adapter et transférer les outils cartographiques et indicateurs sur les eaux souterraines issus du PACES aux organisations qui utilisent des données sur l'eau	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier les organisations à qui seront transférés les outils cartographiques - Identifier les besoins des organisations et les secteurs prioritaires de protection - Adapter les outils cartographiques en tenant compte des besoins, des usages, des impacts appréhendés et des secteurs prioritaires de protection / intervention - Transmettre aux organisations la marche à suivre pour reproduire les indicateurs et les mettre à jour 	INRS MRC
2	Instaurer un suivi de la qualité de l'eau souterraine dans des secteurs où il y a un risque pour la qualité de l'eau des propriétaires de puits privés	<ul style="list-style-type: none"> - Établir des objectifs d'échantillonnage - Développer un plan de suivi des eaux souterraines (méthodologie, puits, paramètres, laboratoire, fréquence des prélèvements, interprétation des résultats et des tendances, indicateurs de fin de l'échantillonnage, etc.) 	OBV MRC Municipalités UPA

No	ACTION ENVISAGEABLE	MÉTHODE DE MISE EN OEUVRE OU ÉTAPES PRÉALABLES À LA MISE EN OEUVRE DE L'ACTION	ACTEURS PRESSENTIS POUR LA RÉALISATION DE L'ACTION
3	Rencontrer les élus municipaux et les représentants influents du secteur agricole pour prioriser la mise en place de mesures de protection des eaux souterraines à l'échelle régionale, notamment dans le cadre des SAD	- Discuter avec les aménagistes des MRC et les planificateurs de l'UPA des besoins et de la façon d'aborder ces représentants	INRS / MRC / OBV / UPA Table agroenvironnementale de l'Estrie
4	Inciter les propriétaires de puits privés à faire analyser leur eau de consommation	- Monter une trousse d'information pour sensibiliser les propriétaires de puits privés aux enjeux de qualité de l'eau souterraine - Transmettre la trousse aux propriétaires de puits privés ou à des acteurs influents afin de les inciter à faire analyser leur eau de consommation - Accompagner les propriétaires de puits privés dans l'une ou l'autre des tâches suivantes: (1) la « logistique des bouteilles », 2) l'échantillonnage des puits et 3) l'achat de groupe d'analyses.	DSP-ESTRIE Courtiers immobiliers Institutions financières Municipalités OBV Professionnels de la santé Puisatiers UPA Inspecteurs en bâtiment
5	Assurer le respect des distances séparatrices lors de l'épandage à proximité des puits privés ou municipaux	- Poursuivre et mettre à jour le marquage des puits privés en milieu agricole réalisé par l'UPA au début des années 2000 - Sensibiliser les producteurs agricoles au RPEP et leur expliquer les risques associés à des pratiques non-conformes.	UPA MELCCFP Municipalités Table agroenvironnementale de l'Estrie
6	S'assurer de la validité des coordonnées des puits d'approvisionnement en milieu agricole	- Procéder à un inventaire des puits d'approvisionnement actifs ou inactifs en milieu agricole - Entrer les coordonnées et données sur les puits dans une BD centralisée - Rendre les données accessibles entre autres aux inspecteurs municipaux et aux agronomes qui s'en servent pour émettre des permis ou localiser de nouvelles constructions.	Club-Agro MRC Municipalités OBV Puisatiers UPA
7	Dans les secteurs à risque, sensibiliser les propriétaires de puits abandonnés ou endommagés à prendre les mesures nécessaires pour éviter une contamination des puits de captage environnants	- Dresser un inventaire des puits abandonnés ou endommagés dans les secteurs à risque - Sensibiliser les propriétaires visés aux risques associés à leur puits	OBV MRC Municipalités UPA
8	Mettre en place, dans les zones de recharge, des mesures de protection des eaux souterraines adaptées aux contextes municipal et agricole	- Identifier les mesures et les secteurs à prioriser en concertation avec les acteurs du milieu - Accompagner les MRC, les municipalités et les agronomes dans le processus d'intégration des mesures dans leur document de planification - Mettre en place un mécanisme de suivi afin de pérenniser les actions	Club-Agro MRC Municipalités Table agroenvironnementale de l'Estrie UPA

Les constats de notre étude ont mis en évidence des manques au niveau du cadre institutionnel de GIEBV. Le fait de combler ces manques favoriserait la mise en place de conditions plus favorables à une intégration des ressources en eau souterraine dans les documents de planification régionaux, laquelle pourra conduire à une gestion durable de ces ressources. Ces manques ont conduit à la formulation de recommandations qui sont résumées au tableau 6.16.

Tableau 6.16 : Synthèse des recommandations en vue de favoriser l'intégration des eaux souterraines dans les documents de planification régionaux (Delisle, 2022)

Catégorie	Recommandation
Sensibilisation	Sensibiliser les élus municipaux
	Sensibiliser les citoyens
Gouvernance	Mettre en place une OGAT GIEBV
	Clarifier et coordonner les rôles et responsabilités des acteurs de l'eau
	Se servir du cadre actuel de GIEBV
	Arrimer les PDE et des SAD
Transfert et échange de connaissances	Adapter les outils cartographiques du PACES selon les besoins des acteurs de l'eau
	Accompagner les MRC et municipalités dans la traduction des concepts de protection des eaux souterraines en mesures d'aménagement
	Offrir de la formation de façon récurrente et continue sur les projets PACES
	Assurer la mise-à-jour et l'accès aux connaissances
	Financer des travaux de recherche
Suivi des enjeux régionaux	Instaurer des programmes régionaux de suivi de la qualité de l'eau souterraine
Incidatifs financiers	Promouvoir des projets locaux portant sur l'eau souterraine

OGAT : Orientation gouvernementale en matière d'aménagement du territoire

6.5.4 Conclusions et recommandations

Le plan d'action du PDE constitue une première étape fondamentale afin de permettre l'intégration des connaissances sur les eaux souterraines dans les documents de planification et dans les processus décisionnels des acteurs de l'eau régionaux. Au-delà du plan d'action, les constats formulés dans le cadre de la démarche soutiennent l'idée selon laquelle les experts scientifiques doivent supporter les acteurs régionaux dans l'élaboration de politiques d'aménagement et de développement intégrant les eaux souterraines (Simpson et de Loe, 2020). À ce titre, le PACES Estrie a entrepris une démarche d'accompagnement de deux MRC de la région dans l'intégration de mesures de protection des eaux souterraines dans leur SAD (voir section 6.6).

Les acteurs régionaux doivent quant à eux s'appropriier le langage sur les eaux souterraines comme ils l'ont déjà fait pour les eaux de surface. Dans une perspective à plus long terme, cette appropriation des connaissances permettra aux OBV de les accompagner dans l'intégration de mesures de protection dans les documents de planification régionaux. De son côté, si l'État québécois vise une gestion durable des eaux souterraines, il doit préciser ses intentions en matière de GIEBV par l'intermédiaire d'une OGAT favorable à l'intégration des eaux souterraines dans les processus décisionnels régionaux. Le Québec doit aussi favoriser l'intégration des connaissances techniques pour orienter les décisions de gestion.

Il faut souligner le caractère flexible et transférable de la démarche développée afin de définir des actions du PDE reliées à l'eau souterraine. La démarche pourrait ainsi être étendue à d'autres régions où des projets PACES ont été réalisés mais où le processus de transfert ou d'échange de connaissances n'a pas été complété. Des enjeux spécifiques à chaque région d'étude du PACES

seront sans doute définis, mais des enjeux communs à toutes les régions sont aussi susceptibles d'être identifiés. À ce titre, un atelier du RQES (2021b) regroupant les responsables des projets du PACES a montré que près de la moitié de ces projets ont identifié des enjeux de qualité naturelle de l'eau souterraine ainsi que de protection des zones de recharge, généralement en lien avec des activités agricoles. Aussi, il semble que l'enjeu de la qualité de l'eau des puits privés soit fréquemment cité. Dans ce contexte, plusieurs actions identifiées dans le cadre du PACES Estrie pourraient être reprises et adaptées à d'autres régions du Québec.

Les activités réalisées dans le cadre de notre étude ont permis d'identifier un ensemble d'obstacles ou de manques qui concourent à l'absence d'intégration des eaux souterraines dans les documents de planification régionaux. Enfin, l'étude a conduit à des pistes de solution pour combler ces manques, ce qui a permis de formuler treize recommandations portant sur la sensibilisation des élus et des citoyens, la gouvernance de l'eau, le transfert et l'échange de connaissances avec les acteurs, le suivi des enjeux régionaux et enfin le besoin d'incitatifs financiers pour supporter la réalisation de projets locaux.

6.6 Considération de l'eau souterraine dans l'aménagement du territoire

6.6.1 Problématique et objectifs

La gestion durable de l'eau souterraine à l'échelle régionale requiert plusieurs étapes : l'acquisition des connaissances sur les ressources en eau souterraine, le transfert des connaissances aux acteurs régionaux, l'appropriation des connaissances par ces acteurs et la détermination des actions et des orientations sur l'eau souterraine (RQES, 2021a). Au Québec le *Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines* (PACES) a couvert pratiquement tout le Québec municipalisé entre 2009 et 2022 (figure 1.1, section 1.1; MDDEP, 2011b). Au niveau du transfert des connaissances, le RQES a développé une série d'ateliers qui ont été offerts aux acteurs régionaux après ou pendant la réalisation des projets du PACES. Ce transfert n'a toutefois pas complètement levé la multitude de contraintes à l'appropriation des connaissances et à leur utilisation par les organismes de bassin versant (OBV) dans le cadre de leur *Plan directeur de l'eau* (PDE) ou par les Municipalité régionales de comté (MRC) dans leurs Schémas d'aménagement et de développement (SAD) (Lavoie et al., 2013).

Face à ce constat, des travaux ont été réalisés dans le cadre du PACES Estrie afin de développer des actions reliées à l'eau souterraine dans les PDE des OBV régionales (COGESAF et COBARIC) (section 6.5; Delisle, 2022). La présente section résume d'autres travaux qui ont été réalisés par la suite avec pour objectif général d'assurer l'appropriation des connaissances sur les eaux souterraines pour en faire l'intégration dans les schémas d'aménagement et développement (SAD). Ces travaux sont documentés plus en détail dans le rapport de l'essai-projet de Jimmy Mayrand (2021) réalisé dans le cadre de sa maîtrise en aménagement du territoire à l'Université Laval. Ces travaux avaient aussi quatre objectifs spécifiques :

1. Identifier les connaissances sur les eaux souterraines qu'il est essentiel d'intégrer dans un SAD ainsi que les mesures et les outils disponibles à cette fin ;
2. Identifier les besoins et les contraintes des acteurs clés relativement à l'eau souterraine ;
3. Proposer des éléments à intégrer dans le SAD par rapport à l'eau souterraine ;
4. Développer un protocole supportant l'intégration des eaux souterraines dans la planification territoriale.

6.6.2 Méthodologie

Les rapports intérimaires du projet PACES Estrie ont fourni les connaissances sur les ressources en eau souterraine en Estrie (Lefebvre et al., 2019; Huchet et al., 2020; annexes 4L et 4M). Tout comme la démarche visant la définition des actions des PDE reliées à l'eau souterraine (section 6.5), les travaux sur la considération de l'eau souterraine en aménagement du territoire se sont déroulés en parallèle avec la réalisation du projet PACES Estrie. La figure 6.17 illustre la démarche qui a été suivie et a impliqué une revue de littérature et des entrevues auprès des acteurs clés, suivi de l'accompagnement de deux MRC dans la démarche d'aménagement du territoire (Coaticook et Le Val-Saint-François).

À l'étape 1, les entrevues semi-dirigées auprès des acteurs clés devaient permettre d'obtenir les perceptions et les opinions des répondants relativement à la considération de l'eau souterraine dans le schéma d'aménagement. Ces entrevues devaient ainsi fournir une meilleure compréhension des obstacles et des opportunités pour la protection de l'eau souterraine par la planification territoriale. Les participants aux entrevues devaient avoir travaillé sur un SAD ou un PDE et avoir intégré des connaissances sur les eaux souterraines dans l'un de ces plans.

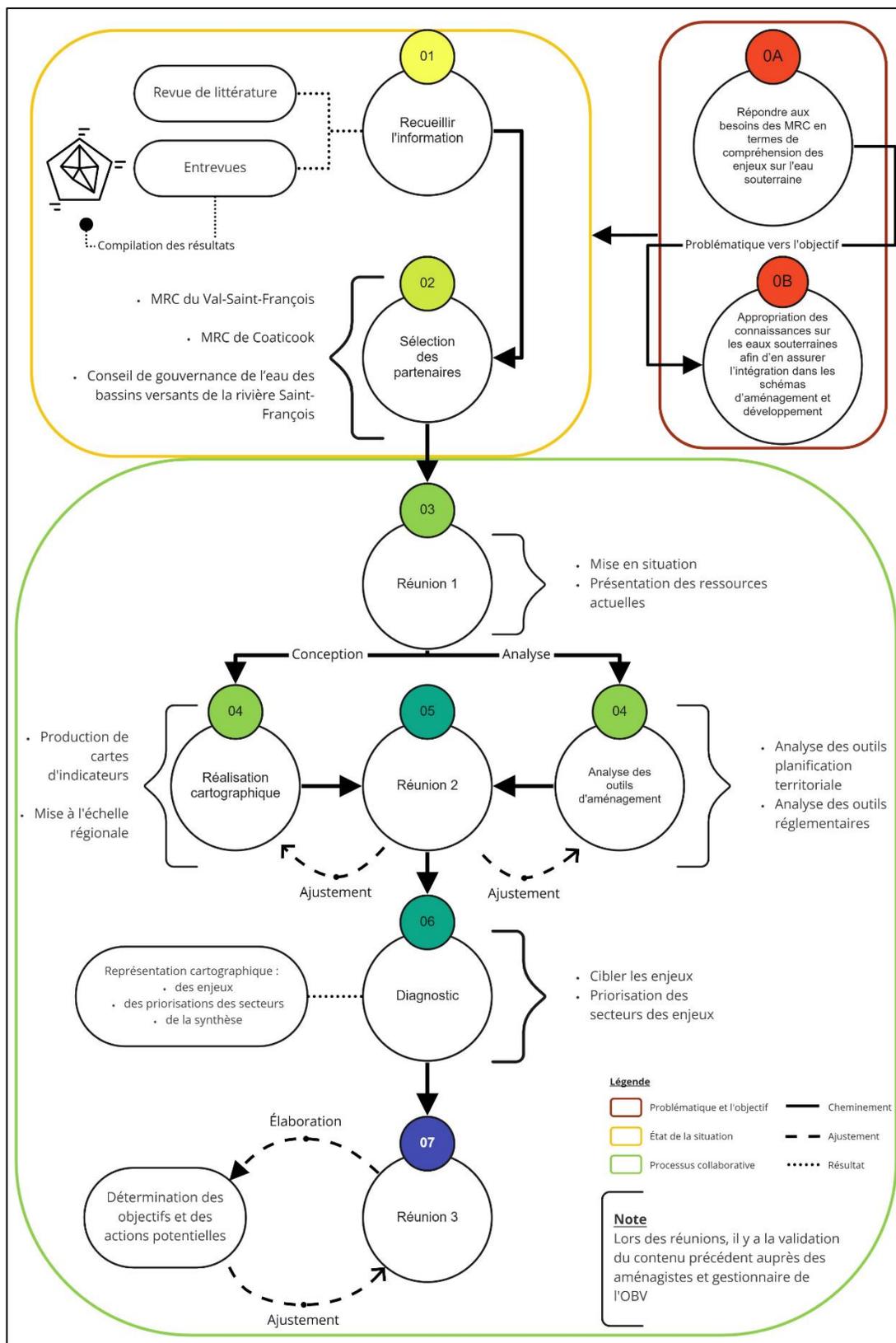


Figure 6.17 : Schéma du processus de collaboration et des étapes suivies (Mayrand, 2021)

Les MRC et les OBV ayant fait l'intégration des connaissances sur l'eau souterraine ont d'abord été identifiées grâce aux contacts du Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES). D'autres participants ont été sélectionnés à la suite d'une revue non exhaustive de schémas d'aménagement et de développement des MRC du Québec. Ainsi, des représentants de sept organismes ont été sélectionnés pour les entrevues.

À l'étape 2, deux MRC ont été retenues pour l'élaboration de la démarche d'intégration de l'eau souterraine dans les SAD, soit les MRC de Coaticook et Le Val-Saint-François, en Estrie. Ces MRC étaient parmi celles ayant démontré leur intérêt pour l'intégration des connaissances sur l'eau souterraine et leur SAD était en révision. Le COGESAF, l'organisme de bassin versant (OBV) dont le territoire couvre la plus grande partie de la région du PACES Estrie, a aussi été impliqué dans l'élaboration de la démarche à cause de son rôle essentiel dans l'intégration des connaissances sur l'eau souterraine dans les SAD et PDE. Le groupe élaborant la démarche comprenait ainsi trois aménagistes des deux MRC, une représentante du COGESAF impliquée dans le PACES Estrie, deux chercheurs (U. Laval et INRS) et l'étudiant responsable du projet.

Le modèle collaboratif entre les trois organismes et l'équipe de recherche a été choisi de façon à permettre un accompagnement des aménagistes dans l'intégration des connaissances sur l'eau souterraine dans les schémas d'aménagement et de développement. Les échanges ont ainsi permis de développer une démarche fonctionnelle qui a aussi mené à l'élaboration d'un guide pour les aménagistes (Mayrand et al., 2021). La collaboration avec les aménagistes s'est notamment concrétisée par la tenue de trois rencontres de travail après l'entretien semi-dirigé (voir figure 6.17, étapes 3, 5 et 7). Les rencontres, tenues entre juin et août 2021, comprenaient des discussions orientées sur les objectifs du projet et le contenu du guide.

La première rencontre (figure 6.17, étape 3) a permis de définir les besoins des MRC. Cette rencontre a aussi impliqué la présentation du projet de recherche, les données disponibles sur les territoires des deux MRC, de l'information disponible sur la gestion intégrée de l'eau souterraine, des exemples de planification et des exemples d'intégration de l'eau souterraine dans les SAD. La seconde rencontre (figure 6.17, étape 5) a été consacrée à l'appropriation des connaissances sur l'eau souterraine et elle s'articulait donc autour de la présentation de la cartographie des deux MRC et de zones prioritaires d'intervention. Cette rencontre a impliqué la présentation de cartes montrant la géologie, l'hydrogéologie et l'aménagement des territoires des deux MRC. Après cette rencontre, les aménagistes devaient proposer des objectifs par rapport aux enjeux reliés à l'eau souterraine sur leur territoire. La troisième rencontre (figure 6.17, étape 7) a porté sur l'identification des rôles et des actions potentielles d'aménagement du territoire en relation avec la gestion durable de l'eau souterraine, notamment la protection des zones de recharge. Cette rencontre devait ainsi permettre de définir des cibles de protection de l'eau souterraine propres au territoire des MRC et de définir un processus d'intégration des connaissances sur l'eau souterraine dans les SAD. La rencontre a aussi abordé les contraintes identifiées par les aménagistes par rapport au cadre de l'aménagement du territoire afin qu'il puisse contribuer à la gestion durable de l'eau souterraine.

Mayrand (2021) présente plus de détails sur la démarche ainsi que les outils cartographiques développés pour supporter les discussions lors des rencontres. Au total, 15 cartes par MRC ont été produites. À cette fin, les cartes obtenues de l'INRS ont été éditées pour avoir une représentation de l'information cartographique à l'échelle des MRC. Seule l'information cartographique pertinente pour l'aménagement du territoire et disponible auprès des MRC a été utilisée lors de la démarche. Les cartes comprenaient deux catégories : 1) les cartes donnant un portrait de l'eau souterraine (piézométrie, densité des puits, affectation du territoire, confinement de l'aquifère rocheux, utilisation du sol, potabilité en fonction des concentrations en arsenic et en manganèse) et 2) les cartes apportant un diagnostic sur la ressource (recharge, vulnérabilité, indice de pression de l'occupation du sol, zones de recharge à protéger, carte synthèse). La

description accompagnant chaque carte indiquait 1) ce que la carte représente, 2) comment la carte a été produite, 3) comment se servir de la carte, et 4) un résumé de la situation locale du territoire de la MRC par rapport au sujet de la carte. À noter que lors de la réalisation des travaux les cartes de recharge et de vulnérabilité (DRASTIC) de l'aquifère rocheux n'avaient pas encore été produites par le PACES Estrie. Ainsi, l'utilisation du confinement de l'aquifère rocheux a servi de proxy de la vulnérabilité et de la recharge.

Les deux premières réunions ont permis de mieux cerner les rôles de l'aménagement du territoire en relation avec la gestion durable des ressources en eau souterraine. Ainsi, le rôle central de l'aménagement est apparu comme étant relié à la protection des zones de recharge de l'eau souterraine. Un processus a ainsi été développé afin de supporter la priorisation des zones de recharge à protéger. Les données cartographiques ont été acquises et traitées afin de définir le portrait des zones de recharge et des enjeux qui y sont présents (figure 6.17, étape 6). Ensuite, des critères ont été définis pour faire cette priorisation lors de la 3^e réunion (figure 6.17, étape 7).

6.6.3 Principaux résultats

6.6.3.1 Contraintes et besoins exprimés lors des entrevues

Les entrevues ont permis l'identification auprès des acteurs clés des besoins et des contraintes de l'aménagement du territoire en relation avec les ressources en eau souterraine. D'abord, au niveau des contraintes, deux aspects sont clairement ressortis. Le premier aspect correspond à la maîtrise des connaissances sur l'eau souterraine qui est nécessaire afin de les transposer dans les outils de planification territoriale. Même si les acteurs possèdent une base sur les notions reliées à l'eau souterraine représentées dans les livrables PACES, ils n'étaient pas en mesure de véhiculer cette information auprès des élus de leur milieu. Le second aspect problématique était relié à la résolution spatiale des livrables cartographiques PACES qui ne semblait pas appropriée pour définir les conditions au niveau municipal. Un aspect aussi relevé était qu'une fois le transfert réalisé, les acteurs se retrouvent sans ressources lorsqu'ils ont des questionnements sur les eaux souterraines. Au niveau des outils cartographiques PACES jugés pertinents par les acteurs, six cartes ont été nommées par les participants sur les 28 cartes produites par le PACES, dont quatre ont été mentionnées par la majorité des participants : indice de vulnérabilité DRASTIC, zones de recharge, affectations du territoire et piézométrie.

Les acteurs ont aussi exprimé leurs besoins relativement à l'aménagement du territoire par rapport à l'eau souterraine. D'abord, le besoin d'avoir la direction des écoulements à l'échelle locale. Tel que mentionné, une amélioration de l'échelle d'analyse est aussi souhaitée afin de pouvoir justifier les contraintes d'aménagement. Au niveau des outils de planification, un besoin a été mentionné pour une grille de compatibilité des usages pour l'eau souterraine qui serait similaire à celle utilisée pour la gestion des zones de contraintes pour les glissements terrain ou les inondations. Au niveau technique, plusieurs participants souhaiteraient un sommaire plus accessible du rapport PACES.

6.6.3.2 Cartes PACES d'intérêt pour l'aménagement

Un des objectifs des travaux était d'identifier les connaissances sur les eaux souterraines et les produits cartographiques qui permettent le mieux de considérer l'eau souterraine dans un SAD. En visant en particulier à soutenir la démarche d'identification des zones de recharge à protéger, des cartes ont été produites à l'échelle des MRC afin de faire une analyse des différents paramètres à considérer pour identifier les enjeux sur les zones de recharge. Ainsi, les cartes suivantes ont été produites pour chaque MRC (voir les cartes dans Mayrand, 2021) : 1) piézométrie, 2) densité des puits résidentiels, 3) affectation du territoire, 4) confinement de l'aquifère rocheux, 5) utilisation du sol, 6 et 7) potabilité de l'eau selon la concentration en arsenic et manganèse, respectivement, et 8) pression induite par l'occupation du sol par rapport au confinement du roc.

La combinaison de ces cartes permet d'identifier les différents secteurs ayant des enjeux particuliers pour l'eau souterraine. Après l'analyse des différentes informations cartographiques, le regroupement de l'information sur les outils d'aménagement permet une meilleure compréhension des enjeux associés à l'action. Cette association est essentielle afin de comprendre comment un enjeu peut être intégré aux schémas d'aménagement par les outils existants ou nouveaux.

6.6.3.3 Rôles et outils de l'aménagement par rapport à l'eau souterraine

À la suite des deux premières réunions, il a été possible de définir les rôles de l'aménagement du territoire par rapport à la gestion durable des eaux souterraines. L'identification de ces rôles est essentielle afin de définir des actions qui peuvent être posées par les MRC dans le cadre de l'élaboration de leur SAD. Ainsi, la protection des zones de recharge a été le rôle central identifié pour l'aménagement en relation avec les ressources en eau souterraine. Les MRC et l'aménagement peuvent aussi être impliqués dans les enjeux liés à la qualité de l'eau, à l'imperméabilisation des sols, à l'affectation du territoire et à l'utilisation du sol. Au contraire, le rôle des MRC est apparu relativement limité en relation avec les problèmes locaux de contamination ainsi que relativement aux problèmes de qualité naturelle de l'eau souterraine.

Au niveau des outils d'aménagement qui pourraient être utilisés en relation avec l'eau souterraine, particulièrement la protection des zones de recharge, le premier constat a été qu'il n'y a pas d'outil spécifique disponible pour assumer cette fonction. Les aménagistes doivent ainsi utiliser des outils conçus pour aborder d'autres problématiques. Mayrand (2021) a compilé les outils d'aménagement dont l'utilisation serait envisageable : le plan d'urbanisme, les grandes affectations du territoire, la désignation de territoires d'intérêt, la communication, et la participation publique. Les plans directeurs de l'eau et particulièrement les plans d'actions reliées à l'eau souterraine peuvent aussi servir de base aux décisions d'aménagement reliées aux ressources en eau souterraine. L'absence d'outils spécifiques pour la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) pourrait être comblée par une éventuelle *Orientation gouvernementale en aménagement du territoire* (OGAT) sur la GIRE qui était en préparation par le MAMH avec le MELCCFP lorsque les travaux ont été réalisés dans le cadre du PACES Estrie.

6.6.3.4 Processus de priorisation des zones de recharge à protéger

Une des retombées importantes des travaux a été le développement d'un processus pour établir la priorisation des zones de recharge à protéger. En effet, puisqu'il n'est pas envisageable de protéger tout le territoire d'une MRC ou même une grande partie du territoire, il est nécessaire d'identifier les zones de recharge les plus importantes à protéger. Le processus n'est que résumé dans le présent document mais il est décrit en détail par Mayrand (2021).

Après avoir défini les conditions régionales à l'aide des cartes d'intérêt, les zones de recharge sont elles-mêmes identifiées. En l'absence d'une estimation directe de la recharge par le PACES Estrie lors de la réalisation des travaux, c'est le niveau de confinement de l'aquifère au roc qui a permis d'identifier les zones où la recharge serait plus importante. Les autres cartes ont aussi permis d'identifier s'il y avait des enjeux en relation avec les zones de recharge, tels que des problèmes de qualité naturelle, des activités anthropiques posant un risque de contamination, ou la présence de milieux naturels à protéger.

Ensuite, le niveau de priorisation des zones de recharge à protéger a été établi sur la base de la grille montrée au tableau 6.17. Le principe général de la priorisation des zones de recharge est que la protection d'une zone est plus importante 1) s'il y a un usage important d'eau souterraine en aval de la zone de recharge, et 2) s'il y a des évidences de dégradation de la qualité de l'eau souterraine dans la zone de recharge. Les évidences de dégradation de la qualité de l'eau souterraine sont obtenues des groupes d'eau souterraine de type recharge définis par Colléau

(2020) (sections 4.6 et 5.3). Ainsi, certains groupes d'eau de recharge témoignent de niveaux modérés ou importants de dégradation de la qualité d'eau souterraine. Quant à l'importance de l'usage de l'eau souterraine, la carte de la densité des puits permet de juger de l'importance relative de l'usage résidentiel de l'eau souterraine. Les informations du PACES Estrie obtenues du MELCCFP permettent aussi de localiser les puits d'approvisionnement municipaux en Estrie. La 3^e réunion a ainsi permis de constater qu'avec un accompagnement il était possible pour les aménagistes de comprendre et d'appliquer la logique de priorisation des zones de recharge. Une carte des zones de recharge à protéger a ainsi été produite pour chaque MRC après validation auprès des aménagistes impliqués (Mayrand, 2021). De plus, une carte synthèse a été produite pour rassembler l'information sur les enjeux reliés aux eaux souterraines dans les MRC et leurs zones de recharge à protéger, avec un document décrivant la situation propre à chaque MRC.

Tableau 6.17 : Grille utilisée pour établir le niveau de priorisation des zones de recharge (modifié de Mayrand, 2021)

		B. Importance de l'usage de l'eau souterraine		
		1	2	3
A. Évidences de dégradation de la qualité de l'eau souterraine	1	Très faible	Faible	Moyen
	2	Faible	Moyen	Élevé
	3	Moyen	Élevé	Très élevé

A. Évidences de dégradation de la qualité de l'eau souterraine : 1) Aucune évidence, 2) Modérée, 3) Élevée.

B. Importance de l'usage de l'eau souterraine par des puits résidentiels ou des puits municipaux en aval de la zone de recharge : 1) Faible densité de puits résidentiels et absence de puits municipaux, 2) Densité modérée de puits résidentiels et présence possible de puits municipaux, 3) Forte densité de puits résidentiels et présence de puits municipaux.

6.6.3.5 Conditions dans les deux MRC participantes

Les portraits cartographiques des ressources en eau souterraine dans les deux MRC ont montré que globalement les activités anthropiques présentes dans les MRC du Val-Saint-François et de Coaticook semblent avoir peu d'impact significatif actuellement sur la qualité de l'eau souterraine. Néanmoins, des problèmes de quantité d'eau existent sur les deux territoires. Même avec un impact faible, certains secteurs nécessitent aussi un aménagement du territoire adapté afin de prévenir la dégradation de la ressource en eau souterraine identifiée dans certains secteurs. Ainsi, la mise en place d'actions préventives est la solution à préconiser pour la préservation des importantes zones de recharge de l'aquifère rocheux dans les MRC.

6.6.4 Conclusions et recommandations

La démarche visant à considérer l'eau souterraine en aménagement du territoire impliquait plusieurs étapes : l'acquisition de connaissances scientifiques, une analyse documentaire, des entrevues d'acteurs clés, l'identification des informations pertinentes pour l'aménagement, et la production de cartes afin de soutenir des échanges avec les aménagistes de deux MRC. L'objectif durant les échanges était d'accompagner les aménagistes pour assurer le transfert et l'intégration des connaissances sur l'eau souterraine dans le schéma d'aménagement et de développement. Ces échanges ont aussi permis de mieux comprendre les obstacles et les besoins pour assurer l'intégration des eaux souterraines dans les SAD.

L'approche auprès des aménagistes a obtenu des résultats probants. Les aménagistes de ces MRC et d'autres MRC ont été en mesure de suivre la procédure développée pour faire l'intégration des connaissances sur l'eau souterraine dans les SAD. Toutefois, il serait nécessaire de

poursuivre l'accompagnement qui a été amorcé dans le cadre de nos travaux jusqu'à la finalisation de la révision des SAD pour compléter la démarche.

L'approche élaborée est transférable à d'autres régions, ce qui a été démontré par les travaux réalisés en suivant cette approche avec l'OBV Côte-du-Sud qui ont permis de bien définir les zones de recharge à protéger en priorité. Ces travaux réalisés par deux stagiaires du programme de maîtrise en aménagement de l'Université Laval ont aussi permis de produire un portrait de la ressource en eau souterraine qui assure un meilleur transfert des informations du PACES Chaudière-Appalaches aux aménagistes et autres acteurs de l'eau de la région (Blanchet et Pélissier, 2021).

Plusieurs constats ont émergé de la collaboration avec les acteurs. D'abord, un grand volet de la méthode visait l'interprétation et la priorisation des zones de recharge à protéger. Un indicateur a été élaboré afin de prioriser les territoires de manière objective. Néanmoins, il y a plusieurs limites au projet. La première limite était le temps disponible pour compléter le projet, la seconde correspondait à la complexité des notions d'hydrogéologie, ce qui affecte le transfert des connaissances, et la dernière limite est l'absence d'OGAT sur la gestion intégrée de l'eau.

De ces limites découlent des recommandations dont seulement les principales seront soulignées ici (voir les détails dans Mayrand, 2021). D'abord la recommandation relative à une OGAT sur la gestion intégrée de l'eau fournirait des outils adaptés à la considération des ressources en eau dans les SAD. La recommandation concernant l'accompagnement des aménagistes dans l'intégration des connaissances sur l'eau souterraine pourrait être réalisée par les OBV qui possèdent une vision d'ensemble du bassin versant et peuvent s'assurer de la cohérence des mesures d'aménagement avec les enjeux et priorités régionales relatives à l'eau souterraine. La dernière recommandation est de fournir une personne-ressource en hydrogéologie afin d'apporter un soutien supplémentaire spécifique aux municipalités, MRC ou OBV. Ce soutien permettrait de fournir des réponses aux questions des organismes régionaux et de supporter la définition d'études hydrogéologiques qui pourraient combler des besoins spécifiques de connaissances.

7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le PACES Estrie a été soutenu par le MELCCFP et a impliqué plusieurs partenaires régionaux, soient la ville de Sherbrooke et les cinq (5) municipalités régionales de comté (MRC) comprises dans la région d'étude : Coaticook, Le Granit, Le Haut-Saint-François, Le Val-Saint-François et Memphrémagog. Les deux organismes de bassin versant (OBV) de la région, soient le Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF) et le Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC), ont aussi été des partenaires de la réalisation du projet. Le projet a aussi profité de la participation active de plusieurs municipalités qui ont autorisé l'échantillonnage de leur puits d'approvisionnement ou l'installation sur un terrain municipal d'un puits d'observation du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec. De plus, plusieurs organismes régionaux ont activement contribué aux travaux (DSP de l'Estrie, Fédération de l'UPA-Estrie, MAPAQ, bureau régional du MELCCFP). Enfin, le PACES Estrie a profité de quatre ateliers de transfert des connaissances du RQES pendant la réalisation du projet.

Le PACES Estrie avait pour objectif général de définir le portrait des ressources régionales en eau souterraine. Le projet avait aussi des objectifs spécifiques : 1) accompagner les municipalités de l'Estrie pour la protection de leurs prélèvements d'eau potable, 2) aborder des problématiques régionales d'intérêt particulier pour l'Estrie, notamment le potentiel des aquifères granulaires et la présence d'arsenic et de manganèse affectant la potabilité de l'eau, et 3) assurer le transfert des connaissances aux partenaires régionaux pendant la réalisation du projet.

Les travaux ont grandement profité de la révision du modèle géologique de Caron (2013) qui représente la distribution spatiale des épaisseurs des unités de dépôts meubles dans la région d'étude. Ce modèle a permis de mieux définir le potentiel aquifère des dépôts meubles et les conditions hydrogéologiques (confinement, recharge, vulnérabilité). La région d'étude présente deux contextes hydrogéologiques distincts, soient les vallées et les hautes-terres. Le contexte hydrogéologique des vallées est présent dans les secteurs à plus faible élévation où l'épaisseur des sédiments est supérieure à 10 m et où les dépôts meubles ont un bon potentiel aquifère. Le contexte hydrogéologique des hautes-terres est présent lorsque l'épaisseur des dépôts est inférieure à 10 m et alors seulement le roc constitue un aquifère exploitable. Les vallées peuvent avoir un potentiel aquifère important dans le Quaternaire ancien dont les aquifères sont exploités par plusieurs puits municipaux. Il peut aussi y avoir un potentiel aquifère dans les sédiments fluvioglaciaires qu'on retrouve aussi hors de vallées. Toutefois, il n'y a pratiquement que l'aquifère rocheux qui est exploitable dans les hautes-terres. La conductivité hydraulique des aquifères granulaires peut être très bonne alors que celle du roc est généralement faible et ne permet que rarement des débits de puits importants. Les aquifères granulaires et le roc sont en conditions captives dans les vallées alors que les conditions libres dominent dans les hautes-terres.

Les eaux souterraines de type « évolué » géochimiquement sont prévalentes dans les vallées. Ces eaux peuvent avoir des temps de résidence (âges) de plusieurs milliers d'années. Ce sont plutôt les eaux de type « recharge » qui dominent dans les hautes-terres. Ces eaux ont des âges modernes de moins de 60 ans. Les eaux évoluées dans les vallées ont des problématiques de dépassement des normes de potabilité pour le manganèse (Mn) et l'arsenic (As). Ce sont les 26,0% de dépassements de la concentration maximale acceptable pour le manganèse (Mn) et les 8,2% pour l'arsenic (As) qui représentent les plus importants problèmes de potabilité. Les eaux de recharge dans les hautes-terres peuvent avoir subi une dégradation anthropique de leur qualité, mais sans qu'il y ait des dépassements de normes de potabilité ou d'objectifs esthétiques. Dans ce contexte de risque pour la santé publique, nous recommandons de dédier des ressources à la sensibilisation des propriétaires de puits privés et à leur accompagnement pour faciliter l'analyse de l'eau de leur puits. Un projet pilote supporté par Osmoz a d'ailleurs été amorcé dans des municipalités de la MRC Val-Saint-François les plus à risque par rapport au Mn et As.

Les enquêtes auprès des municipalités ont mis en évidence plusieurs problématiques reliées à la quantité et à la qualité des approvisionnements municipaux. De plus, ces enquêtes ont révélé les problèmes éprouvés par plusieurs propriétaires de puits résidentiels ou agricoles. Bien qu'il n'ait pas été possible d'établir de statistiques à ce sujet, ces problèmes semblent avoir été encore plus importants lors des baisses majeures des niveaux d'eau souterraine subies en 2021. Ces baisses de niveau de nappe se sont aussi traduites par des étiages très sévères des cours d'eau. Ces problématiques reliées à la quantité d'eau souterraine sont amplifiées par la faible productivité de l'aquifère rocheux dans la région d'étude. Dans ce contexte, nous recommandons que des ressources soient dédiées pour améliorer la résilience des municipalités par rapport à leur approvisionnement en eau, particulièrement dans une perspective de changement climatique.

Des efforts importants ont été dédiés à l'échange de connaissances sur les eaux souterraine avec les acteurs de l'eau régionaux pendant la réalisation du PACES Estrie. Ces efforts ont notamment mené à la définition participative d'actions reliées à l'eau souterraine qui pourront être intégrées dans les Plans directeurs de l'eau (PDE) des Organismes de bassin versant (OBV) de la région d'étude. Nous considérons que la définition d'actions dans les PDE des OBV est une étape initiale essentielle à la gouvernance et à la protection des eaux souterraines. Cette démarche participative étant reproductible, nous recommandons que des ressources soient dédiées à la réalisation d'une démarche similaire dans toutes les régions couvertes par un PACES.

De même, des travaux ont été réalisés avec deux municipalités régionales de comté (MRC) de la région d'étude afin d'amorcer la considération de la protection de l'eau souterraine dans leur schéma d'aménagement et de développement (SAD). Ces travaux ont montré la nécessité d'avoir un accompagnement des aménagistes ainsi que l'importance de la sensibilisation des administrations et des élus pour que l'eau souterraine soit considérée dans le cadre de l'aménagement du territoire. En conséquence, nous recommandons que des ressources soient dédiées à l'accompagnement des MRC dans l'adaptation de leur SAD pour favoriser la protection des ressources en eau souterraine. Ces efforts vont aussi nécessiter la disponibilité d'une orientation gouvernementale en matière d'aménagement du territoire (OGAT) abordant spécifiquement les besoins de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). En effet, nos travaux ont montré qu'une OGAT GIRE est requise pour donner aux aménagistes des outils spécifiques qui sont requis pour la protection des eaux souterraines.

Enfin, nos travaux d'évaluation du risque de contamination des puits municipaux à partir d'analyses chimiques et isotopiques ont mis en évidence une vaste gamme de risques. Ces résultats pourraient ainsi permettre d'établir un niveau de priorité pour la gestion des périmètres de protection des approvisionnements municipaux en eau souterraine. Considérant l'efficacité et le coût relativement faible de cette approche, nous recommandons ainsi que cette méthode d'évaluation du risque de contamination soit étendue à l'ensemble des puits municipaux et qu'un support technique et financier soit disponible afin d'accompagner les municipalités dans la gestion et la protection de leur approvisionnement en eau souterraine.

8 RÉFÉRENCES

- Adam, C., Beaugelin-Seiller, K., Henner, P., Colle, C., 2005. Fiche radionucléide - Manganèse 54 et environnement. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), Direction de l'environnement et de l'intervention.
- Ageco, 2019. Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU 1). Rapport final, présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), juin 2019, 271 p.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AgCan), 2016. Atlas agroclimatique du Québec – Jeu de données GDB, <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/03807263-b1ad-44e9-b2a9-b574cd26e992> [accédé en mars 2018].
- Aller, L., Lehr, J.-H., Petty, R., Bennett, T., 1987. DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. United States Environmental Protection Agency, Chicago, IL, 622 p.
- Ancil, F., Rousselle, J., Lauzon, N., 2012. *Hydrologie: Cheminements de l'eau*. Presses internationales Polytechnique, 2^e éd. 391 p.
- ATSDR, 2012. Toxicological profile for manganese. US Department of Health and Human Services, Public Service, Atlanta, GA.
- Ayraud, V., 2005. Détermination du temps de résidence des eaux souterraines: application au transfert d'azote dans les aquifères fracturés hétérogènes. Hydrologie, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 298 p.
- Beaudry, C., Lefebvre, R., Rivard, C., Cloutier, V., 2018. Conceptual model of regional groundwater flow based on hydrogeochemistry (Montérégie Est, Québec, Canada). *Canadian Water Resources Journal* 43(2), 152-172.
- Benoit, N., Nastev, M., Blanchette, D., Molson, J., 2014. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Chaudière River watershed aquifers, Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal* 39(1), 32-48.
- Bergeron, O., 2016. Guide d'utilisation 2016 - Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec, version 1.2. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 9782550735687 (PDF), 25 p.
- Blanchet, E., Pélissier, M., 2021. Eaux souterraines : Portrait et enjeux des eaux souterraines de la zone de gestion intégrée de la ressource eau de la Côte-du-Sud. Rapport de stage, maîtrise en Aménagement du territoire et développement régional, Université Laval, réalisé en collaboration avec l'OBV Côte-du-Sud et l'INRS, septembre 2021, 50 p.
- Blanchette, D., Lefebvre, R., Nastev, M., Cloutier, V., 2010. Groundwater quality, geochemical processes and groundwater evolution in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal* 35(4), 503-526.
- Boivin, S., 2015. Promotion de l'analyse de l'eau des puits individuels auprès des municipalités de l'Estrie – Bilan des activités. Direction de santé publique de l'Estrie, Secteur Santé environnementale, Sherbrooke, août 2015, 34 p.

- Bondu, R., 2017. Origine et distribution de l'arsenic dans l'eau souterraine de l'aquifère rocheux fracturé du bouclier canadien en Abitibi-Témiscamingue. Thèse doctorale, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT).
- Bondu, R., Cloutier, V., Rosa, E., 2018. Occurrence of geogenic contaminants in private wells from a crystalline bedrock aquifer in western Quebec, Canada: geochemical sources and health risks. *Journal of Hydrology* 559, 627-637.
- Bondu, R., Cloutier, V., Rosa, E., Benzaazoua, M., 2017. Mobility and speciation of geogenic arsenic in bedrock groundwater from the Canadian Shield in western Quebec, Canada. *Science of the Total Environment* 574, 509-519.
- Boyle, D., Turner, R., Hall, G., 1998. Anomalous arsenic concentrations in groundwaters of an island community, Bowen Island, British Columbia. *Environmental Geochemistry and Health* 20(4), 199-212.
- CAC, 2009. La gestion durable des eaux souterraines au Canada. Conseil des académies canadiennes.
- Campredon, B., 2013. Mécanismes et transferts de l'arsenic dans une confluence du Var et étude d'une méthode de remédiation dans les eaux potables. Thèse doctorale, Sciences de l'environnement, Université Nice Sophia Antipolis, 209 p.
- Canards Illimités Canada et le ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques (MELCC), 2020. Cartographie détaillée des milieux humides des secteurs habités du sud du Québec – Données du projet global.
- Caron, O., 2013. Synthèse et modèle cartographique 3D des formations quaternaires pour les bassins-versants des rivières Chaudière et Saint-François : géochronologie, stratigraphie et paléogéographie wisconsinienne du sud du Québec. Thèse de doctorat, UQAM, février 2013, 358 p.
- Caron, O., Lamothe, M., Tremblay, T., 2007. Synthèse cartographique des formations superficielles du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec. Rapport final et cartes de la géologie de surface, Université du Québec à Montréal, 31 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., Lavoie, D., 2013. Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, Rapport final INRS R-1433, version finale soumise en juin 2013 au MDDEFP et aux partenaires régionaux, 283 p., annexes, incluant 29 cartes et base de données.
- CEHQ, 2018. Bassins versants des stations hydrométriques. Shapefile, Centre d'expertise hydrique du Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- CEHQ, 2017. Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec (Échelles 1/20 000 et 1/50 000). Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Version 1.3, mise à jour juin 2017.

- Chaillou, G., Touchette, M., Buffin-Bélanger, T., Cloutier, C.-A., Hétu, B., Roy, M.-A., 2018. Hydrogeochemical evolution and groundwater mineralization of shallow aquifers in the Bas-Saint-Laurent region, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Journal* 43(2), 136-151.
- Chapman, T., Maxwell, A., 1996. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of Papers. Institution of Engineers, Australia, 539 p.
- CIUSSS Estrie – CHUS, 2017. Votre puits contient-ils de l'arsenic ? 2 pages. [En ligne] https://www.santeestrie.qc.ca/clients/SanteEstrie/Conseils-sante/Environnement/Eau-potable/Depl_Arsenic_2017.pdf [accédé en avril 2020].
- Cloutier, V. 2004. Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère des Basses-Laurentides dans les roches sédimentaires paléozoïques des basses-terres du Saint-Laurent, Québec, Canada. Thèse doctorale en Sciences de la terre, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M., 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., Savard, M.M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology* 353(3-4), 294-313.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M., Bourque, É., Therrien, R., 2006. Hydrogeochemistry and groundwater origin of the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada. *Hydrogeology Journal* 14 (4), 573-590.
- COGESAF, 2018. PACES Estrie. [En ligne] <http://cogesaf.qc.ca/paces-estrie/#1570807865882-435e2920-5f5a> [accédé en avril 2020].
- Colléau, É., 2020. Géochimie et âge de l'eau souterraine en Estrie en relation avec les problématiques en arsenic et en manganèse et la vulnérabilité des puits d'approvisionnement. Mémoire de maîtrise avec cheminement bilingue, maîtrise en Sciences de la Terre à l'INRS et en Sciences de l'Eau à l'Université de Rennes 1, 298 p., <http://espace.inrs.ca/id/eprint/11234/>
- Colléau, É., 2019. Revue de la présence d'arsenic dans l'eau souterraine en Estrie – Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) dans la région de l'Estrie (Québec). Mémoire de fin d'étude, Master 2 Sciences de l'eau, Université de Rennes 1, juin 2019 (rapport disponible en annexe de Colléau, 2020).
- Copernicus Climate Change Service, 2022. Surface air relative humidity. Essential climate variables for assessment of climate variability from 1979 to present, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/ecv-for-climate-change?tab=form>, Consulté en mars 2022.
- Côté, M.-J., Lachance, Y., Lamontagne, C., Nastev, M., Plamondon, R., Roy, N., 2006. Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay. Collaboration étroite avec la Commission géologique du Canada et l'Institut national de la recherche scientifique - Eau, Terre et Environnement. Québec: ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 64 p.

- Cox, S., 2013. Topic 20 : Observations and Measurements. Open Geospatial Consortium ISO., 54 p.
- Croteau, A., Nastev, M., Lefebvre, R., 2010. Groundwater recharge assessment in the Chateauguay River watershed. *Canadian Water Resources Journal* 35(4), 451-468.
- De Chardon, C.M., 2009. Designing groundwater visualization interfaces. M. Sc. Thesis, Simon Fraser University, 255 p.
- Delisle, R., 2022. Développement d'une démarche collaborative pour l'élaboration d'un plan d'action sur l'eau souterraine en Estrie. Maîtrise en ATDR, Université Laval, 132 p. <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/6bea18c6-94cf-4a72-b217-00a6337e94a7>
- De Souza, S., 2012. Évolution tectonostratigraphique du domaine océanique des Appalaches du sud du Québec dans son contexte péri-laurentien. Doctorat, UQAM, janvier 2012, 191 p.
- Dubé-Loubert, H., Parent, M., Brazeau, A., 2013. Cartographie des dépôts de surface du bassin versant contigu des rivières Yamaska, Richelieu et de la baie Missisquoi. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources Naturelles (MRN), Bureau de l'exploration géologique du Québec, échelle 1/50 000.
- Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes: An International Journal* 19(2):507-515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>.
- Flanagan, S.M., Ayotte, J.D., Robinson, Jr. G.R., 2018. Quality of water from crystalline rock aquifers in New England, New Jersey, and New York, 1995-2007. US Geological Survey 2011-5220, 104 p., <https://doi.org/10.3133/sir20115220>.
- Foster, S., Hirata, R., Andreo, B., 2013. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal* 21(7), 1389-1392.
- Frind, E., Molson, J., Rudolph, D., 2006. Well vulnerability: a quantitative approach for source water protection. *Groundwater* 44(5), 732-742.
- Gadd, N.R., McDonald, B.C., Shilts, W.W., 1972. Deglaciation of Southern Québec. Geological Survey of Canada, Paper 71-47, 19 p.
- Gauthier, M., Chartrand, F., Trottier, J., 1994. Metallogenic epochs and metallogenic provinces of the Estrie-Beauce region, Southern Quebec Appalachians. *Economic Geology* 89, 1322-1360.
- Gauthier, M., Brassard, B. Gariépy, C., Auclair, M., Chartrand, F., Godue, R., Bardoux, M., Darimont, A., Jebrak, M., Blain, M., Dupuis, L., Trottier, J., Boisvert, D., Durocher, M., 1989. Synthèse géologique de l'Estrie et de la Beauce. Travaux de l'UQAM, MB-89-20, ministère de l'Énergie et des Ressources, 633 p. et cartes.
- Ghesquière, O., Walter, J., Chesnaux, R., Rouleau, A., 2015. Scenarios of groundwater chemical evolution in a region of the Canadian Shield based on multivariate statistical analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, 246-266.
- Gosselin, J.-S., Huchet, F., Lefebvre, R., 2021. Indicateurs de l'état des ressources en eau souterraine sous l'effet du climat et de leur exploitation (Rapport final). Rapport de recherche R2039, soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en juin 2021.

- Gosselin, J.-S., Lefebvre, R., Vigneault, H., Huchet, F., Raynauld, M., 2020. Rapport final – Développement de méthodologies d'analyse des données du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ). Rapport de recherche R1942, soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en décembre 2020, 93 p.
- Gosselin, J.-S., 2016. Estimation de la recharge à partir de séries temporelles de la température du sol, des niveaux d'eau dans les puits et de données météorologiques: développement méthodologique et évaluation de l'incertitude. Thèse, Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Doctorat en sciences de la terre, 216 p.
- Groschen, G.E., Arnold, T., Morrow, W.S., Warner, K.L., 2009. Occurrence and distribution of iron, manganese, and selected trace elements in ground water in the glacial aquifer system of the Northern United States. US Geological Survey 2009-5006, 90 p., <https://doi.org/10.3133/sir20095006>.
- Gulens, J., Champ, D.R., Jackson, R.E., 1979. Influence of redox environments on the mobility of arsenic in ground water. In: Jenne, E.A. (ed.), *Chemical Modeling in Aqueous Systems*. American Chemical Society; Washington, DC, 81-95.
- Gustard, A., Bullock, A., Dixon, J. 1992. Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology, Wallingford, UK. 292 p.
- Harte, P.T., Ayotte, J.D., Hoffman, A., Révész, K.M., Belaval, M., Lamb, S., Boehlke, J., 2012. Heterogeneous redox conditions, arsenic mobility, and groundwater flow in a fractured-rock aquifer near a waste repository site in New Hampshire, USA. *Hydrogeology Journal* 20(6), 1189-1201.
- Hassing, J., Ipsen, N., Jonch Clausen, T., Larsen, H., Lindgaard-Jorgensen, P., 2009. Integrated water resources management in action. DHI Water Policy (Denmark) [441], UNEP-DHI Centre for Water and Environment (Denmark), Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau. ISBN 978-92-3-104114-3, 18 p. <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001818/181891E.pdf>
- Healy, R.W., 2010. *Estimating groundwater recharge*. Cambridge University Press. 245 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. https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/rivieres/indice/index.htm [accédé en mars 2022]
- Huchet, F., Gosselin, J.-S., Raynauld, M., Domaine, J., Lefebvre, R., 2021. Outil de support à l'analyse des demandes d'autorisation de prélèvement d'eau – développement d'une méthodologie pour déterminer les pressions sur les ressources en eau souterraine et les zones de gestion particulière - Rapport final. INRS-ETE, rapport de recherche R2061, soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en août 2021, 144 p. et annexes.
- Huchet, F., Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Raynauld, M., Vigneault, H., Colléau, E., Mathis, R., Caron, O., 2020. Rapport d'étape de la phase II – Projet de connaissances sur les eaux souterraines de l'Estrie (PACES Estrie). INRS-ETE, rapport de recherche R1934, soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en juin 2020, 58 p. et annexes.

- Huchet, F., 2018. Caractérisation hydrogéologique et modélisation du système d'écoulement au-dessus de champs gaziers, sous-bassin de Moncton, sud du Nouveau-Brunswick. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de la terre, 556 p.
- Huchet, F., Rivard, C., Lefebvre, R., 2017. Hydrogeological characterisation above two gas fields, Moncton sub-basin, southern New Brunswick. *GeoOttawa 2017, 70th Canadian Geotechnical Conference and 12th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, Canadian Geotechnical Society (CGS) and Canadian National Chapter of the International Association of Hydrogeologists (IAH-CNC), October 1-4, 2017, Ottawa, Canada, 8 p
- Husk, B., Sanchez, J.B., Leduc, R., Takser, L., Savary, O., Cabana, H., 2019. Pharmaceuticals and pesticides in rural community drinking waters of Quebec, Canada – a regional study on the susceptibility to source contamination. *Water Quality Research Journal* 54.2, 16 p., DOI: 10.2166/wqrj.2019.038.
- IRDA, 2018a. Comté de Bagot, Feuillet 31H09101. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Échelle de numérisation 1/20 000, Échelle originale 1/63 360, 1959.
- IRDA, 2018b. Comté de Drummond, Feuillet 31H09201, 31H09202, 31H16102. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Échelle de numérisation 1/20 000, Année de numérisation 2000, Échelle originale 1/63 360, 1960.
- IRDA, 2018c. Comté de Frontenac, Feuillet 21E02201, 21E03202, 21E06102, 21E06202, 21E07101, 21E07201, 21E07202, 21E09201, 21E10101, 21E10102, 21E10201, 21E10202, 21E11102, 21E11201, 21E11202, 21E14101, 21E14102, 21E14202, 21E15101, 21E15102, 21E15201, 21E16101, 21L03102. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Échelle de numérisation 1/20 000, Année de numérisation 2000, Échelle originale 1/40 000, 1996.
- IRDA, 2018d. Comté de Mégantic, Feuillet 21E14201, 21E14202, 21L03101, 21L03102. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Échelle de numérisation 1/20 000, Année de numérisation 2000, Échelle originale 1/50 000, 1989.
- IRDA, 2018e. Comtés de Shefford-Brome-Mississquoi, Feuillet 31H01101, 31H01102, 31H01201, 31H01202, 31H08101, 31H08102, 31H08201, 31H08202, 31H09101, 31H09102. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Échelle de numérisation 1/20 000, Année de numérisation 2000, Échelle originale 1/63 360, 1947.
- IRDA, 2018f. Comtés de Stanstead-Richmond-Sherbrooke-Compton, Feuillet 21E03101, 21E03201, 21E04101, 21E04102, 21E04201, 21E04202, 21E05101, 21E05102, 21E05201, 21E05202, 21E06101, 21E06102, 21E06201, 21E06202, 21E11101, 21E11102, 21E11201, 21E11202, 21E12101, 21E12102, 21E12201, 21E12202, 31H01101, 31H01102, 31H01201, 31H01202, 31H08101, 31H08102, 31H08201, 31H08202, 31H09101, 31H09102, 31H09201, 31H09202, 31H16102. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Échelle de numérisation 1/20 000, Année de numérisation 1999-2000, Échelle originale 1/126 720, 1943.
- IRDA, 2018g. Comté de Wolfe, Feuillet 21E05202, 21E11101, 21E11201, 21E12102, 21E12201, 21E12202, 21E13102, 21E13202, 21E14101, 21E14102, 21E14201, 21E14202. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Échelle de numérisation 1/20 000, Année de numérisation 2000, Échelle originale 1/50 000, 1998.

- Jyrkama, M.I., Sykes, J.F., Normani, S.D., 2002. Recharge estimation for transient ground water modeling. *Ground Water* 40(6), 638-648.
- Kokalj, Z., Zakšek, K., Oštir, K., 2013. Visualizations of lidar derived relief models. In Opitz, R. and Cowley, C.D., eds., *Interpreting Archaeological Topography – Airborne Laser Scanning, Aerial Photographs and Ground Observation*, Oxbow Books, Oxford, UK, 100–114.
- Lambert, M., Walter, J., Rouleau, A., Daigneault, R., Chesnaux, R., 2010. Protocole de fiabilité et validation des données de forage (version 02). Projet interrégional sur les eaux souterraines, janvier 2010.
- Lamothe, M., Parent, M., Shilts, W.W., 1992. Sangamonian and Early Wisconsinan events in the St. Lawrence Lowland and Appalachians of Southern Québec, Canada. In P.U. Clark and P.D. Lea, eds.: *The Last Interglacial-Glacial Transition in North America*, Geological Society of America, Special Paper 270, 171–184.
- Lamothe, M., Saint-Jacques, G., 2014. Géologie du Quaternaire des bassins versants des rivières Nicolet et Saint-François, Québec. Rapport de l'UQAM présenté au ministère des Ressources Naturelles et de la Faune. Montréal, 31 p.
- Lanini, S., Caballero, Y., Seguin, J.-J., Maréchal, J.-C., 2016. ESPERE - A Multiple-Method Microsoft Excel Application for Estimating Aquifer Recharge. *Groundwater* 54(2):155-156. <https://doi.org/10.1111/gwat.12390>.
- Larocque, M., Lefebvre, R., Therrien, R., Gagné, S., Delottier, H., Gosselin, J.S., Huchet, F., Dubois, E., Anh Vu, T. 2021. Projet synthèse sur les ressources en eau souterraine du sud du Saint-Laurent - Outils pour assurer la gestion des eaux souterraines face aux changements climatiques Rapport déposé au MELCC en juin 2021, 55 p.
- Larocque, M., Gagné, S., Barnetche, D., Meyzonnat, G, Graveline, M.H., Ouellet M.A., 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 254 p.
- Laurencelle, M., 2018. Propriétés hydrauliques et processus d'invasion par la Mer de Champlain du système aquifère rocheux fracturé régional de la Montérégie Est, Québec, Canada. Thèse doctorale, Université du Québec, INRS, Centre Eau Terre Environnement, mai 2018, <https://espace.inrs.ca/id/eprint/7618/>
- Lavoie, R., Joerin, F., Rodriguez, M. J., 2013. Incorporating groundwater issues into regional planning in the Province of Quebec. *Journal of Environmental Planning and Management*, 57(4), 516-537.
- Lefebvre, R., Ballard, J.M., Raynauld, M., Huchet, F., Colléau, É., Laurencelle, M., 2019. Rapport d'étape de la phase I – Projet de connaissances sur les eaux souterraine de l'Estrie. INRS-ETE, Rapport R1851, rapport soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en septembre 2019, 43 p. et 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 R1580, soumis au MDDELCC en mars 2015, 246 p. et annexes.
- Lipfert, G., Reeve, A.S., Sidle, W.C., Marvinney, R., 2006. Geochemical patterns of arsenic-enriched ground water in fractured, crystalline bedrock, Northport, Maine, USA. *Applied Geochemistry* 21(3), 528-545.
- Malet, X., 2017. Database development for multidisciplinary projects - Adaptation of an OGC/ISO standard, Observations and Measurement (O&M). Rapport interne, Commission géologique du Canada.
- MAMH, 2020. Population des municipalités du Québec, décret de 2020. Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, [En ligne] <https://www.mamh.gouv.qc.ca/organisation-municipale/decret-de-population/> [consulté en mars 2022]
- Mathis, R., 2023. Modélisation numérique du système aquifère régional appalachien du bassin versant de la rivière Saint-François, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise en sciences de la terre, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, avril 2023, 185 p. et annexes électroniques, <https://espace.inrs.ca/id/eprint/13536/>
- Mathis, R., 2020. Potentiel aquifère des vallées enfouies de l'Estrie. Projet de fin d'études présenté à René Lefebvre dans le cadre du cours GGL-3701, Département de géologie et de génie géologique, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, avril 2020.
- Mayrand, J., Grenier, J., Lavoie, R., Lefebvre, R., 2021. Guide d'appropriation des connaissances sur l'eau souterraine à des fins d'intégration au schéma d'aménagement et de développement : deux cas d'étude en Estrie. Université Laval et INRS, 10 décembre 2021, 80 p.
- Mayrand, J., 2021. Appropriation des connaissances sur l'eau souterraine vers une intégration dans le schéma d'aménagement et développement. Essai-projet de maîtrise en ATDR, Université Laval. 94 p. <https://ulaval.on.worldcat.org/oclc/1294477431>
- McCormack, R., 1979. Étude hydrogéologique du bassin de la Saint-François. Ministère des richesses naturelles, Service des eaux souterraines, Programme de connaissances intégrées, Bibliothèque nationale du Québec, ISBN 2-551-03852-9. 66 pp. et deux cartes.
- McDonald, B.C., 1969. Surficial geology of La Patrie-Sherbrooke area, Québec, including Eaton River watershed. Geological Survey of Canada, Paper 67-52, 21 p.
- MDDELCC, 2016. Bilan de la qualité de l'eau potable au Québec 2010-2014. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 80 p. [En ligne] <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/> [accédé en octobre 2018]
- MDDEP, 2011a. Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) à l'échelle 1/20 000, Gouvernement du Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), Direction du Patrimoine Écologique et des Parcs, mise à jour de 2011.
- MDDEP, 2011b. Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec - Guide des conditions générales - Troisième appel de propositions. Ministère du

- Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 8 p. et annexes. ISBN : 978-2-550-53934-6 (pdf).
- MDDEP, 2011c. Guide pour l'élaboration d'un plan directeur de l'eau un manuel pour assister les organismes de bassin versant du Québec dans la planification de la gestion intégrée des ressources en eau. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- MDDELCC, 2016. Bilan de la qualité de l'eau potable au Québec 2010-2014. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 80 p.
- MELCC, 2022. Système d'information hydrogéologique (SIH). Base de données du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, disponible via Données Québec <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/eau-souterraines-sih-index> [accédé en janvier 2022]
- MELCC, 2021a. Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm> [accédé en septembre 2021]
- MELCC, 2021b. Historique des niveaux et des débits de différentes stations hydrométriques. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, [En ligne] https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/default.asp [accédé en janvier 2021]
- MELCC, 2020a. Couverture territoriale de la connaissance sur les eaux souterraines. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/carte-projets.pdf> [accédé en avril 2020].
- MELCC, 2020b. Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA). Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction des écosystèmes aquatiques, Québec.
- MELCC, 2020c. Installations municipales de distribution d'eau potable. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/distribution/resultats.asp> [consulté en mars 2022]
- MELCC, 2020d. Cartographie de l'utilisation du territoire du Québec 2018. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Données de SIG [ArcMap, ESRI Canada], Mise à jour de mai 2020.
- MELCC, 2019a. Cartographie des milieux humides potentiels du Québec – Version 2019. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Données de SIG [ArcMap, ESRI Canada], Québec (Québec).
- MELCC, 2019b. Détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC – Guide technique, 2019. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 86 p. [En ligne]. www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/drastringuide.pdf [accédé en mai 2020].

- MELCC, 2018a. Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 189 p.
- MELCC, 2018b. *Données du Programme de surveillance du climat*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, Québec
- Mendizabal, I., Stuyfzand, P.J., 2011. Quantifying the vulnerability of well fields towards anthropogenic pollution: The Netherlands as an example. *Journal of hydrology* 398(3-4), 260-276.
- MERN, 2018. Géologie du roc et linéaments. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, SIGÉOM.
- MERN, 2017. Système sur les découpages administratifs (SDA) à l'échelle de 1/20 000. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Version mise à jour en juin 2017.
- MERN, 2014. Symboles et abréviations de la carte géoscientifique. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Rapport DV 2014-06.
- Meyzonnat, G., Larocque, M., Barbecot, F., Pinti, D., Gagné, S., 2016. The potential of major ion chemistry to assess groundwater vulnerability of a regional aquifer in southern Quebec (Canada). *Environmental Earth Sciences* 75(1), 68.
- MFFP, 2018. Cartographie du 5^e inventaire écoforestier du Québec méridional, Système d'information écoforestière (SIEF) à l'échelle 1/20 000, Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers, mise à jour de juin 2018.
- Molle, F., Closas, A., 2020. Comanagement of groundwater: A review. *WIREs Water*, 7(1), e1394
- Molson, J., Frind, E., 2019. FLONET/TR2 - A two-dimensional simulator for groundwater flownets, contaminant transport and residence time. Version 5.0, January 2019 [Logiciel]
- Montcoudiol, N., Molson, J., Lemieux, J.-M., 2015. Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Québec, Canada): a regional-scale study. *Hydrogeology Journal* 23(2), 377-396.
- MRN, 2006. Base de données topographique du Québec (BDTQ) à l'échelle 1 / 20 000. Ministère des Ressources naturelles, version mise à jour en juillet 2006.
- MRNF, 2008. Base de données géographique et administratives à l'échelle 1 / 1 000 000 (BDGA 1M). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, mai 2008.
- Nastev, M., Lamontagne, C., 2010. Survol hydrogéologique de l'aquifère transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay, Canada-États Unis. *Canadian Water Resources Journal* 35(4), 359-376.
- O'Shea, B., Stransky, M., Leitheiser, S., Brock, P., Marvinney, R.G., Zheng, Y., 2015. Heterogeneous arsenic enrichment in meta-sedimentary rocks in central Maine, United States. *Science of The Total Environment* 505, 1308-1319.
- Papadopoulos, I.S., Cooper, H.H., 1967. Drawdown in a well of large diameter. *Water Resources Research* 3(1), 241-244.

- Paradis, D., Vigneault, H., Lefebvre, R., Savard, M.M., Ballard, J.-M., Qian, B., 2016. Groundwater nitrate concentration evolution under climate change and agricultural adaptation scenarios: Prince Edward Island, Canada. *Earth System Dynamics* 7, 183-202.
- Parent, M., Girard, F., Fagnan, N., Michaud, Y., Boisvert, É., Fortier, R., 2008. Chapitre 4 – Caractérisation géologique des formations superficielles enfouies. Dans, Michaud, Y., Lefebvre, R., McCormack, R., éd.. *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires*. Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51189-2 (pdf), p. 23-40.
- Parent, M., 1987a. The Asbestos-Valcourt and Sherbrooke area. In *Pleistocene Stratigraphy in the St. Lawrence Lowlands and the Appalachians of southern Québec : a field guide*. Collection Environment et Géologie, vol. 4, 102-139
- Parent, M., 1987b. Late Pleistocene stratigraphy and events in the Asbestos-Valcourt region, southeastern Québec, unpublished Ph.D dissertation, Department of Geology, University of Western Ontario, London, 320 p.
- PDAL contributors, 2018. PDAL Point Data Abstraction Library. URL : <https://pdal.io>
- Perrot, M., 2019. Évolution tectonique des bassins sédimentaires tardi-à posttaconiens des Appalaches du sud du Québec et du nord du Vermont. Thèse doctorale, UQAM, mai 2019, 376 p.
- Pingel, T.J., Clarke, K.C., McBride, W.A., 2013. An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 77, 21–30.
- Québec, 2021. Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection (LRQ, chapitre C-6.2).
- Québec, 2019. Chapitre Q-2, r 40 - Règlement sur la qualité de l'eau potable. Loi sur la qualité de l'environnement (chapitre Q-2, a. 31, 45, 45.2, 46, 87, 115.27, 115.34 et 124.1), . <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2040/> [Consulté en février 2022]
Aussi: <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/parties-1-2-3.htm>
- Québec, 2014. Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RLRQ, chapitre Q-2, r. 35.2), à jour au 1er février 2020, Éditeur officiel du Québec, 2014. [En ligne] <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2035.2> [accédé en mai 2020].
- Raynauld, M., Huchet, F., Ballard, J.M., Colléau, É., Mathis, R., Caron, O., Vigneault, H., Lefebvre, R., 2024. Atlas hydrogéologique - Portrait des ressources en eau souterraine en Estrie, Québec, Canada. Institut national de la recherche scientifique (INRS), Centre Eau Terre Environnement, Annexe du rapport R-2091, soumis au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) en mars 2022, version révisée soumise en mai 2024, 63 p.
- Raynauld, M., Lefebvre, R., Gosselin, J.S., 2018. Estimation de la recharge avec le modèle d'infiltration HELP pour les régions de Laval et des Laurentides, Rapport de recherche R1799, Institut national de la recherche scientifique, septembre 2018, 39 p. et annexes.
- Rey, N., Rosa, E., Cloutier, V., Lefebvre, R., 2018. Using water stable isotopes for tracing surface and groundwater flow systems in the Barlow-Ojibway Clay Belt, Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal* 43(2), 173-194.

- Rivard, C., Lefebvre, R., 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.
- Ross, M., Martel, R., Lefebvre, R., Parent, M., Savard, M.M., 2004. Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: A case study from the St. Lawrence Lowlands, Canada. *Geofísica Internacional* 43(4), 591-602.
- RQES, 2022. Atelier 4 – S'appropriier les bases des données du PACES Estrie, cahier du participant. Atelier tenu en présentiel le 31 mai 2022, document préparé par le RQES, pour les acteurs de l'aménagement du territoire, Montréal et Trois-Rivières, Réseau québécois sur les eaux souterraines et Université du Québec à Trois-Rivières.
- RQES, 2021a. Réseau québécois sur les eaux souterraines. <https://rques.ca/> [consulté en juin 2021]
- RQES, 2021b. Synthèse de la rencontre du 2 mars 2021 avec les coordonnateurs des équipes PACES sur les enjeux de protection et de gestion des eaux souterraines (PGES) provenant des résultats des PACES. Document interne, compte-rendu d'une rencontre par visioconférence, 2 mars 2021.
- RQES, 2021c. Atelier 3 – Comprendre le fonctionnement hydrogéologique de notre territoire, Estrie, cahier du participant. Atelier tenu sous forme de webinaire les 30 novembre et 1^{er} décembre 2021, document préparé par le RQES, pour les acteurs de l'aménagement du territoire, Montréal et Trois-Rivières, Réseau québécois sur les eaux souterraines et Université du Québec à Trois-Rivières.
- RQES, 2020. Atelier 2 – Comprendre les données du projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Estrie, cahier du participant. Atelier tenu sous forme de webinaire les 3 et 4 novembre 2020, document préparé par le RQES, pour les acteurs de l'aménagement du territoire, Montréal et Trois-Rivières, Réseau québécois sur les eaux souterraines et Université du Québec à Trois-Rivières.
- RQES, 2019. Atelier 1 - Découvrir notre projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines et le lier aux enjeux de notre territoire, Estrie, cahier des résultats. Atelier tenu le 2 octobre 2018 à Sherbrooke, document préparé par le RQES, pour les acteurs de l'aménagement du territoire, Montréal et Trois-Rivières, Réseau québécois sur les eaux souterraines et Université du Québec à Trois-Rivières.
- RQES, 2018. Atelier 1 - Découvrir notre projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines et le lier aux enjeux de notre territoire, Estrie, cahier du participant. Atelier tenu le 2 octobre 2018 à Sherbrooke, document préparé par le RQES, pour les acteurs de l'aménagement du territoire, Montréal et Trois-Rivières, Réseau québécois sur les eaux souterraines et Université du Québec à Trois-Rivières.
- RSESQ, 2020. Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec. [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm> [accédé en avril 2020].
- Saby, M., Larocque, M., Pinti, D.L., Barbecot, F., Gagné, S., Barnetche, D., Cabana, H., 2017. Regional assessment of concentrations and sources of pharmaceutically active compounds, pesticides, nitrate, and E. coli in post-glacial aquifer environments (Canada). *Science of the Total Environment* 579, 557-568.

- Santé Canada, 2019a. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada - Tableau sommaire. Bureau de la qualité de l'eau et de l'air, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa, Ontario, Canada.
- Santé Canada, 2019b. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique — Le manganèse. Bureau de la qualité de l'eau et de l'air, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa, Ontario, Canada.
- Santé Canada, 2006. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique – L'arsenic. Bureau de la qualité de l'eau et de la santé, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa, Ontario, Canada.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology journal* 10(1),18-39.
- Schroeder, P.R., Dozier, T.S., Zappi, P.A., McEnroe, B.M., Sjostrom, J.W., Peyton, R.L. 1994. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering documentation for version 3. United States Environmental Protection Agency.
- Schroetter, J.M., 2003. Caractérisation structurale et stratigraphique du complexe ophiolitique de Thetford-Mines: implication géodynamique pour la zone de Dunnage du sud du Québec, Canada. Thèse doctorale, Québec, Université du Québec, Institut national de recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, Université du Québec, 272 p.
- Shilts, W.W., 1981. Surficial Geology of the Lac Mégantic Area, Québec. Geological Survey of Canada, Memoir 397, 102 p.
- Simpson, H.C., de Loe, R.C., 2020. Challenges and opportunities from a paradigm shift in groundwater governance. *Hydrogeology Journal* 28(2), 467-476.
- Slivitzky, A., St-Julien, P., 1988. Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce. MM 85-04, ministère de l'Énergie et des Ressources, 40 p. et carte à l'échelle 1 / 250 000.
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry* 17(5), 517-568.
- Squibb, K.S., Fowler, B.A., 1983. The toxicity of arsenic and its compounds. In: B.A. Fowler, ed., *Biological and Environmental Effects of Arsenic*. Elsevier Science Publishers B.V., New York, 233-269.
- St-Julien, P., Hubert, C., 1975. Evolution of the Taconian orogen in the Québec Appalachians. *American Journal of Science* 275-A, 337-362.
- Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G., Rompré, M., 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), 1990.
- Tóth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research* 68(16), 4795–4812.
- Tóth, J., 1999. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal* 7, 1–14.

- Tremblay, A., Castonguay, S., 2002. Structural evolution of the laurentian margin revisited (southern Québec Appalachians): Implications for the Salinian orogeny and successor basins. *Geology* 30, 79-82.
- Tremblay, A., de Souza, S., Perrot, M., Thériault, R., 2015. Géologie des Appalaches du Québec : Feuillet Sud-Ouest - régions de Montérégie, Cantons-de-l'Est, Centre-du-Québec et Chaudière-Appalaches. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec, MB 2015-11, Échelle 1/300 000.
- USDA, 2021. Raster Soil Survey Database for Vermont and New York. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/data-and-reports/raster-soil-surveys-rss> [accédé en octobre 2021].
- USGS, 2018. California Groundwater Ambient Monitoring and Assessment (GAMA) Program Priority Basin Project - Shallow aquifer assessment (ver. 1.1, September 2018). U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012–3136, 2 p. <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3136/> [accédé en février 2022].
- USGS, 2021. National Land Cover Database 2019 - Landcover & Imperviousness (NLCD2019). U.S. Geological Survey. <https://www.mrlc.gov/data/nlcd-2019-land-cover-conus> [accédé en janvier 2022].
- Watts, M., O'reilly, J., Marcilla, A., Shaw, R., Ward, N., 2010. Field based speciation of arsenic in UK and Argentinean water samples. *Environmental Geochemistry and Health* 32(6), 479-490.
- Yang, Q., Culbertson, C.W., Nielsen, M.G., Schalk, C.W., Johnson, C.D., Marvinney, R.G., Stute, M., Zheng, Y., 2015. Flow and sorption controls of groundwater arsenic in individual boreholes from bedrock aquifers in central Maine, USA. *Science of The Total Environment* 505, 1291-1307.

CONTENU DES ANNEXES ÉLECTRONIQUES

ANNEXE 1 :
ATLAS HYDROGÉOLOGIQUE

Annexe 1 - Liste des planches de l'atlas hydrogéologique

- N° 1 – Topographie
- N° 2 – Routes, limites administratives et toponymie
- N° 3 – Modèle altimétrique numérique
- N° 4 – Pente du sol
- N° 5 – Hydrographie
- N° 6 – Limites de bassins et de sous-bassins
- N° 7 – Occupation du sol
- N° 8 – Couverture végétale
- N° 9 – Milieux humides
- N° 10 – Affectation du territoire
- N° 11 – Pédologie
- N° 12 – Géologie du Quaternaire
- N° 13 – Géologie du roc
- N° 14 – Coupes stratigraphiques et hydrostratigraphiques
- N° 15A – Épaisseur totale des dépôts meubles
- N° 15B – Épaisseur de sédiments sableux superficiels (UH1)
- N° 15C – Épaisseur de sédiments argileux (UH2)
- N° 15D – Épaisseur de sédiments fluvioglaciers (UH3)
- N° 15E – Épaisseur de till au-dessus du Quaternaire ancien (UH4)
- N° 15F – Épaisseur de Quaternaire ancien (UH5)
- N° 16 – Topographie du roc
- N° 17A – Conditions de confinement de l'aquifère rocheux
- N° 17B – Conditions de confinement des sédiments du Quaternaire ancien
- N° 17C – Conditions de confinement des sédiments fluvioglaciers
- N° 18 – Contextes hydrostratigraphiques
- N° 20 – Piézométrie dans le roc
- N° 22A – Vulnérabilité DRASTIC
- N° 22B – Vulnérabilité DRASTIC – Indice D Profondeur de la nappe
- N° 22C – Vulnérabilité DRASTIC – Indice R Recharge
- N° 22D – Vulnérabilité DRASTIC – Indice A Type d'aquifère
- N° 22E – Vulnérabilité DRASTIC – Indice S Type de sol
- N° 22F – Vulnérabilité DRASTIC – Indice T Topographie
- N° 22G – Vulnérabilité DRASTIC – Indice I Impact de la zone vadose
- N° 22H – Vulnérabilité DRASTIC – Indice C Conductivité hydraulique
- N° 23 – Qualité de l'eau souterraine – Critères de potabilité
- N° 24 – Qualité de l'eau souterraine – Objectifs esthétiques
- N° 25 – Utilisation de l'eau
- N° 26 – Stations de suivi
- N° 27A – Recharge de l'aquifère rocheux
- N° 27B – Zones de recharge et de résurgence de l'aquifère rocheux

ANNEXE 2 :
CARTES THEMATIQUES

Annexe 2 - Liste des cartes thématiques (échelle 1/100 000)

- N° 1 – Topographie
- N° 2 – Routes, limites administratives et toponymie
- N° 3 – Modèle altimétrique numérique
- N° 4 – Pente du sol
- N° 5 – Hydrographie
- N° 6 – Limites de bassins et de sous-bassins
- N° 7 – Occupation du sol
- N° 8 – Couverture végétale
- N° 9 – Milieux humides
- N° 10 – Affectation du territoire
- N° 11 – Pédologie
- N° 12 – Géologie du Quaternaire
- N° 13 – Géologie du roc
- N° 15A – Épaisseur totale des dépôts meubles
- N° 15B – Épaisseur de sédiments sableux superficiels (UH1)
- N° 15C – Épaisseur de sédiments argileux (UH2)
- N° 15D – Épaisseur de sédiments fluvioglaciers (UH3)
- N° 15E – Épaisseur de till au-dessus du Quaternaire ancien (UH4)
- N° 15F – Épaisseur de Quaternaire ancien (UH5)
- N° 16 – Topographie du roc
- N° 17A – Conditions de confinement de l'aquifère rocheux
- N° 17B – Conditions de confinement des sédiments du Quaternaire ancien
- N° 17C – Conditions de confinement des sédiments fluvioglaciers
- N° 18 – Contextes hydrostratigraphiques
- N° 20 – Piézométrie dans le roc
- N° 22A – Vulnérabilité DRASTIC
- N° 22B – Vulnérabilité DRASTIC – Indice D Profondeur de la nappe
- N° 22C – Vulnérabilité DRASTIC – Indice R Recharge
- N° 22D – Vulnérabilité DRASTIC – Indice A Type d'aquifère
- N° 22E – Vulnérabilité DRASTIC – Indice S Type de sol
- N° 22F – Vulnérabilité DRASTIC – Indice T Topographie
- N° 22G – Vulnérabilité DRASTIC – Indice I Impact de la zone vadose
- N° 22H – Vulnérabilité DRASTIC – Indice C Conductivité hydraulique
- N° 25 – Utilisation de l'eau
- N° 26 – Stations de suivi
- N° 27A – Recharge de l'aquifère rocheux
- N° 27B – Zones de recharge et de résurgence de l'aquifère rocheux

ANNEXE 3 :
PROTOCOLES METHODOLOGIQUES

Annexe 3 - Liste des protocoles méthodologiques

Protocole de numérisation et d'archivage des documents compilés
Protocole sur la validation et la fiabilité des données de forage
Protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine
Protocole de CONDATE Eau pour le prélèvement d'échantillons pour les analyses CFC-SF₆
Protocole pour la préparation du livrable 04 - Pente
Protocole pour la préparation du livrable 11 - Pédologie
Protocole pour la préparation du livrable 14 - Coupes stratigraphiques
Protocole pour la préparation des livrables 15 et 16 - Épaisseur des dépôts meubles et Topographie du roc
Protocole pour la préparation des livrables 19 et 20 - Piézométrie
Protocole pour la préparation du livrable 21 - Propriétés hydrogéologiques
Protocole pour la préparation du livrable 22 - Vulnérabilité
Protocole pour la préparation des livrables 24 et 25 - Qualité de l'eau souterraine
Protocole pour la préparation du livrable 26 - Utilisation d'eau

ANNEXE 4 :
DESCRIPTION DETAILLÉE DES TRAVAUX

Annexe 4 – Description détaillée des travaux

Annexe 4A – Installation de puits d'observation du RSESQ

- Journaux des forages réalisés pour l'installation de puits d'observation

Annexe 4B – Géochimie

- Données géochimiques
- Certificats des analyses chimiques

Annexe 4C – Estimation des propriétés hydrauliques

Annexe 4D – Définition de la piézométrie régionale

Annexe 4E – Estimation de la recharge HELP

Annexe 4F – Estimation de la vulnérabilité DRASTIC

Annexe 4G – Estimation de l'usage de l'eau à l'échelle municipale

Annexe 4H – Évaluation du potentiel aquifère des vallées enfouies

Annexe 4I – Évaluation géochimique du risque de contamination des puits municipaux

Annexe 4J – Champs de la base de données

Annexe 4K – Cartes contenues dans les geodatabases

- Versions PDF des cartes à l'échelle 1/100 000
- Geodatabase des livrables cartographiques PACES

Annexe 4L – Rapport de la Phase I du PACES Estrie

Annexe 4M – Rapport de la Phase II du PACES Estrie

Annexe 4N – Modèle quaternaire 3D

Annexe 4O – Coupes stratigraphiques

Annexe 4P – Évaluation du confinement

Annexe 4Q – Compilation des données de rapports et enquêtes