



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

Rapport d'étape de la phase 1

René Lefebvre, Jean-Marc Ballard, Mélanie Raynauld,
François Huchet, Élise Colléau et Marc Laurencelle

Soumis au

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec

Dans le cadre d'un projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE)

Rapport de recherche R1851

Septembre 2019

Équipe de réalisation du PACES Estrie

INRS

Personnel régulier :

René Lefebvre
Jean-Marc Ballard
Mélanie Raynauld
François Huchet
Harold Vigneault
Marc Laurencelle
Jean-Sébastien Gosselin

Étudiants et stagiaires :

Élise Colléau, maîtrise bilingue INRS-U. Rennes 1
Julie Domaine, stagiaire master 2, U. Rennes 1
Thomas Vincent, stagiaire master 1, U. Rennes 1
Raphael Mathis, stagiaire B.Sc., U. Laval
Marie-Pierre Champagne, stagiaire B.Sc., U. Laval

UQAM

Olivier Caron

Université Laval

Roxane Lavoie

COGESAF

Julie Grenier
Nicolas Bousquet

COBARIC

Marie-Hélène Cloutier
Yannick Bourque

Pour nous joindre:



Centre Eau Terre Environnement

490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9 CANADA
T 418 654-2651
INRS.CA

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2019
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-933-3 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2019
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2019

RÉSUMÉ

Ce premier rapport d'étape décrit l'état d'avancement après la phase 1 du *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Estrie* (PACES Estrie) dont la réalisation est sous la responsabilité du Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE). Ce projet est supporté principalement par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) du Québec 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 Haut-Saint-François, Le Granit, Le Val-Saint-François et Memphrémagog. La région d'étude de 10 695 km² couvre en partie les territoires de deux (2) organismes de bassin versant (OBV) qui sont 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 dresser un 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 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 de 10 695 km² ont été définies de façon à assurer une couverture complète à la fois des MRC de l'Estrie et de la partie amont du bassin versant de la rivière Saint-François qui n'avait pas été couverte par un projet PACES antérieur. Dans la région d'étude, 66 des 97 municipalités possèdent un réseau de distribution d'eau potable. Dans la région d'étude, c'est l'eau souterraine qui est la source d'approvisionnement la plus utilisée pour la majorité des municipalités, même si les municipalités les plus importantes de la région s'approvisionnent en eau de surface (Sherbrooke, Magog). Près de 40 % de la population (356 096) s'approvisionne à partir de l'eau souterraine, dont environ 26 % via des puits privés.

Tel que prévu, la phase 1 du projet a été surtout consacrée à la compilation des données existantes qui ont été en grande partie obtenues de ministères québécois via le MELCC. Une version préliminaire de plusieurs des livrables cartographiques a pu être produite à partir des données acquises. Le présent rapport contient les principaux éléments suivants : une description du projet, un bref résumé des travaux antérieurs, l'inventaire des données existantes, une description de la région d'étude sur la base des cartes produites pour en faire le portrait initial (conditions générales, occupation du territoire, contextes géologiques et hydrogéologiques, conditions hydrogéologiques). Le rapport documente aussi les problématiques régionales dont certaines feront l'objet de travaux spécifiques qui sont brièvement décrits. Le programme de caractérisation qui sera réalisé dans le cadre de la phase 2 du projet est aussi décrit. Ces travaux comprennent surtout le forage et l'installation de puits d'observation à ajouter au Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) du MELCC ainsi que l'échantillonnage de l'eau souterraine de puits résidentiels et municipaux et l'analyse chimique et isotopique de cette eau.

La compilation des données existantes à partir de bases de données publiques ou obtenues du MELCC est en grande partie complétée. Le rapport identifie les données qui restent à acquérir. Les données disponibles ont en grande partie été intégrées dans la base de données du projet. L'assemblage des rapports d'intérêt hydrogéologique et la compilation des données qu'ils contiennent étaient en voie de réalisation au moment de produire le rapport.

La topographie de la région d'étude est marquée par de grandes vallées, où se concentrent les agglomérations importantes, ainsi que des hauts topographiques importants qui sont moins peuplés. Les MRC de Coaticook et du Val-Saint-François ont un caractère agricole tandis qu'un couvert forestier est présent ailleurs. Les zones urbaines les plus importantes se trouvent de Sherbrooke à Magog. Toute la région d'étude recouvre différents domaines de la province géologique des Appalaches. Notre évaluation des propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux fracturé régional à partir des données existantes montre une faible

productivité. Le potentiel aquifère se concentre donc dans les vallées enfouies comblées d'épaisses accumulations de sédiments excédant 20 m. Le projet profite d'une cartographie récente des sédiments superficiels ainsi que d'un modèle 3D de la distribution des sédiments superficiels. Ces données vont servir de base à une évaluation plus détaillée du potentiel aquifère des dépôts meubles. Des coupes géologiques perpendiculairement aux vallées ont été produites pour certains approvisionnements municipaux ainsi qu'à l'échelle régionale. Ces coupes permettent de préciser le potentiel aquifère dans les vallées enfouies qui fera l'objet de travaux plus approfondis. Ces coupes et les conditions hydrogéologiques montrent que la région d'étude présente deux contextes hydrogéologiques distincts, soient les hauts topographiques et les vallées. Dans les hauts topographiques, la couverture plus faible de sédiments permet une recharge de l'aquifère rocheux régional. Dans les vallées, l'eau souterraine qui a circulé dans le roc émerge à travers les sédiments comblant les vallées.

Le premier atelier RQES auquel les partenaires régionaux ont participé a permis d'identifier les principales problématiques régionales reliées aux ressources en eau souterraine. Certaines de ces problématiques seront abordées dans le cadre normal du PACES, notamment le niveau d'exploitation de l'eau souterraine (particulièrement par les grands préleveurs), la localisation des zones de recharge, la connectivité entre les eaux souterraines et les eaux de surface et la qualité de l'eau souterraine. La problématique de la présence naturelle d'arsenic dans l'eau souterraine de la région fera toutefois l'objet d'une attention particulière pour en déterminer l'importance, la distribution spatiale et les causes. La vulnérabilité des approvisionnements municipaux fera aussi l'objet de travaux spécifiques basés sur la composition géochimique et isotopique de l'eau souterraine ainsi que d'indicateurs de son temps de résidence. Certaines problématiques exigeant des travaux spécifiques ne pourront toutefois pas être abordées directement dans le cadre du projet, mais des indications pourraient être données par la caractérisation régionale de la qualité de l'eau souterraine : la contamination par les installations sceptiques et les lieux d'enfouissement ainsi que l'impact des activités agricoles et des mines. Nous allons aussi profiter de la campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine pour sensibiliser les propriétaires visités à l'entretien de leurs puits. D'autres moyens de sensibilisation seront aussi envisagés dans le cadre du projet pour rejoindre un plus grand nombre de propriétaires de puits.

Le rapport décrit le programme de caractérisation hydrogéologique réalisé lors de l'été 2019. Des efforts ont surtout été faits pour définir le programme d'échantillonnage de l'eau souterraine en considérant les données géochimiques disponibles à partir des projets PACES antérieurs à la périphérie de la région d'étude ainsi que les données obtenues du suivi de la qualité des approvisionnements municipaux prélevant de l'eau souterraine. L'approche choisie est de distribuer spatialement les échantillons pour assurer une couverture de toute la région, tout en ayant une plus grande densité d'échantillons dans les secteurs à fort usage ou avec des problématiques particulières (notamment l'arsenic) ainsi que le long de grandes sections géochimiques traversant toute la région d'étude. D'autres échantillons seront aussi prélevés à 15 des approvisionnements municipaux de catégorie 1 qui feront l'objet d'une caractérisation géochimique plus détaillée pour aider à définir leur vulnérabilité. Aussi, 10 nouveaux sites de forage ont été identifiés pour compléter le RSESQ en Estrie qui comptait initialement peu de puits d'observation (5).

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) qui assume 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 et les MRC de Coaticook, du Haut-Saint-François, du Granit, du Val-Saint-François et de Memphrémagog. Le projet profite aussi de la participation des organismes de bassin versant à 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).

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

- 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 MELCC ;
- La Direction de santé publique de l'Estrie ;
- Laforest Nova Aqua Inc. (LNA).

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

- Le ministère des Transports du Québec (MTQ) ;
- Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN) ;
- La Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MELCC ;
- Le Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES).

Nous remercions d'avance les résidents ainsi que les municipalités de l'Estrie qui vont collaborer au projet en donnant accès à leur propriété ou à leur puits afin de réaliser des travaux de terrain pour la saison 2019.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
2	DESCRIPTION DU PROJET	2
2.1	Objectifs du projet.....	2
2.2	Région d'étude	3
2.3	Équipe de réalisation et partenaires.....	6
3	TRAVAUX ANTÉRIEURS	7
4	INVENTAIRE DES DONNÉES EXISTANTES	10
4.1	Synthèse des données acquises.....	10
4.2	Levés Lidar et orthophotographies.....	12
5	DESCRIPTION DE LA RÉGION D'ÉTUDE	15
5.1	Routes et limites municipales – Livrable 2	15
5.2	Topographie et modèle altimétrique numérique (MAN) – Livrables 1 et 3.....	15
5.3	Hydrographie, physiographie et limites des bassins versants – Livrables 4 et 5.....	15
5.4	Occupation du territoire.....	16
5.4.1	<i>Occupation du sol – Livrable 6</i>	16
5.4.2	<i>Couverture végétale – Livrable 7</i>	16
5.4.3	<i>Milieux humides – Livrable 8</i>	16
5.4.4	<i>Affectation du territoire – Livrable 9</i>	17
6	CONTEXTES GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES	18
6.1	Pédologie – Livrable 10	18
6.2	Géologie du Quaternaire – Livrable 11A.....	19
6.3	Épaisseur des formations superficielles – Livrable 11B	21
6.4	Géologie du roc – Livrable 12.....	22
6.5	Coupes et contextes hydrogéologiques	23
7	CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES	25
7.1	Propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux fracturé – Livrable 14.....	25
7.2	Piézométrie de l'aquifère rocheux régional – Livrable 13	27
7.3	Géochimie de l'eau souterraine – Livrable 15.....	28
7.4	Utilisation de l'eau – Livrable 16.....	29
7.5	Réseaux de suivi.....	31
7.5.1	<i>Stations de jaugeage des cours d'eau</i>	31
7.5.2	<i>Données météorologiques</i>	32
7.5.3	<i>Puits d'observation (RSESQ)</i>	32
8	PROBLÉMATIQUES RÉGIONALES ET TRAVAUX SPÉCIFIQUES	33
8.1	Problématiques régionales.....	33
8.2	Travaux spécifiques.....	33
8.2.1	<i>Qualité de l'eau souterraine et problématique de l'arsenic</i>	33
8.2.2	<i>Potentiel aquifère dans les vallées enfouies</i>	34
8.2.3	<i>Protection des puits d'approvisionnement en eau municipaux</i>	34
8.2.4	<i>Gouvernance des ressources régionales en eau souterraine</i>	35

9	PROGRAMME DE CARACTÉRISATION DE LA PHASE 2	36
9.1	Forage de puits pour le RSESQ (MELCC)	36
9.2	Caractérisation géochimique	37
10	BIBLIOGRAPHIE	39

ANNEXES

ANNEXE 1 : Cartes thématiques préliminaires

ANNEXE 2 : Détails de l'estimation des propriétés hydrauliques

ANNEXE 3 : Coupes géologiques dans les sédiments superficiels

ANNEXE 4 : Sommaire des cibles de forage pour les puits du RSESQ

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Superficie et population sur le territoire du PACES Estrie (Institut de la statistique, 2018) - Superficie totale calculée à l'aide d'ArcGIS	5
Tableau 4.1 : Inventaire de l'acquisition des données existantes.....	10
Tableau 4.2 : Données Lidar disponibles pour la zone d'étude	13
Tableau 4.3 : Contenu des fichiers produits à la suite du traitement.....	14
Tableau 5.1 : Superficie et proportion (%) d'occupation du sol et d'affectation du territoire	17
Tableau 6.1 : Études pédologiques utilisées pour la cartographie pédologique (IRDA, 2018 a à g).....	19
Tableau 6.2 : Études à l'origine de la cartographie des formations superficielles	20
Tableau 6.3 : Unités lithostratigraphiques du modèle géologique 3D des formations superficielles des bassins versants des rivières Saint-François et Chaudière (Caron, 2013).....	20
Tableau 6.4 : Sources des données sur l'épaisseur des formations superficielles.....	22
Tableau 6.5 : Unités hydrogéologiques de la région d'étude du PACES Estrie sur la base de la stratigraphie des formations superficielles définie par Caron (2013)	23
Tableau 6.6 : Critères utilisés pour la définition des conditions de confinement.....	24
Tableau 7.1 : Dépassement des recommandations pour l'eau potable*	28
Tableau 7.2 : Statistiques sur l'utilisation de l'eau par MRC	30
Tableau 7.3 : Utilisation d'eau par MRC dans la région d'étude en Estrie.....	30
Tableau 7.4 : Stations de jaugeage sélectionnées pour caler la recharge obtenue de HELP.....	31
Tableau 9.1 : Description des sites proposés pour l'implantation de puits du RSESQ.....	36
Tableau 9.2 : Caractéristiques et coûts projetés des forages du RSESQ proposés.....	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Couverture des projets de connaissance sur les eaux souterraines réalisés entre 2009 et 2015 et en voie de réalisation entre 2018 et 2022 (MELCC, 2018a).....	1
Figure 2.1 : Région d'étude du PACES Estrie.....	3
Figure 3.1 : Réseaux de distribution avec au moins un dépassement de norme d'un paramètre inorganique (MDDELCC, 2016).....	8
Figure 6.1 : Cadre stratigraphique des sédiments superficiels du bassin versant de la rivière chaudière (de Caron et al., 2007, cité par Caron, 2013)	21
Figure 7.1 : 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.....	26
Figure 7.2 : Approvisionnement en eau en Estrie et consommation résidentielle (MAMOT et MELCC)	30
Figure 7.3 : Périodes de couverture des stations de jaugeage des cours d'eau et des grilles météo	32

LISTE DES CARTES (LIVRABLES)

- Carte 1 : Topographie
- Carte 2 : Routes, limites administratives et toponymie
- Carte 3 : Modèle altimétrique numériques (MAN)
- Carte 4 : Hydrographie
- Carte 5 : Limites de bassins et de sous-bassins
- Carte 6 : Occupation du sol
- Carte 7 : Couverture végétale
- Carte 8 : Milieux humides
- Carte 9 : Affectation du territoire
- Carte 10 : Pédologie
- Carte 11A : Géologie du Quaternaire
- Carte 11B : Épaisseur totale des formations superficielles
- Carte 11C : Confinement de l'aquifère rocheux régional
- Carte 12 : Géologie du roc
- Carte 13 : Piézométrie et emplacement des points de suivi de nappe
- Carte 15A : Géochimie de l'eau souterraine – Critère esthétiques
- Carte 15B : Géochimie de l'eau souterraine – Critère pour la santé
- Carte 16 : Utilisation de l'eau souterraine et de l'eau de surface

1 INTRODUCTION

Ce rapport présente l'avancement des travaux de caractérisation hydrogéologique régionale réalisés dans le cadre du *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Estrie* (PACES Estrie). Ce projet est supporté par le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Le MELCC supporte des projets qui ont pour but de dresser un portrait de la ressource en eau souterraine du Québec municipalisé dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité. La figure 1.1 montre les projets qui ont été réalisés en trois phases entre 2009 et 2015 (MELCC, 2018a). La phase des projets en voie de réalisation entre 2018 et 2022, dont le PACES Estrie, va compléter la couverture de pratiquement tout le Québec municipalisé (figure 1.1). Ce rapport documente les travaux de la Phase 1 du PACES Estrie, qui ont porté principalement sur la compilation des données existantes et la production de livrables préliminaires. Les travaux de la Phase 1 ont permis de définir de façon préliminaire les conditions géologiques et hydrogéologiques de la région d'étude. Ces travaux ont aussi servi de base à l'élaboration d'un programme de caractérisation qui est aussi décrit dans le présent rapport, de même que les travaux spécifiques au PACES Estrie.

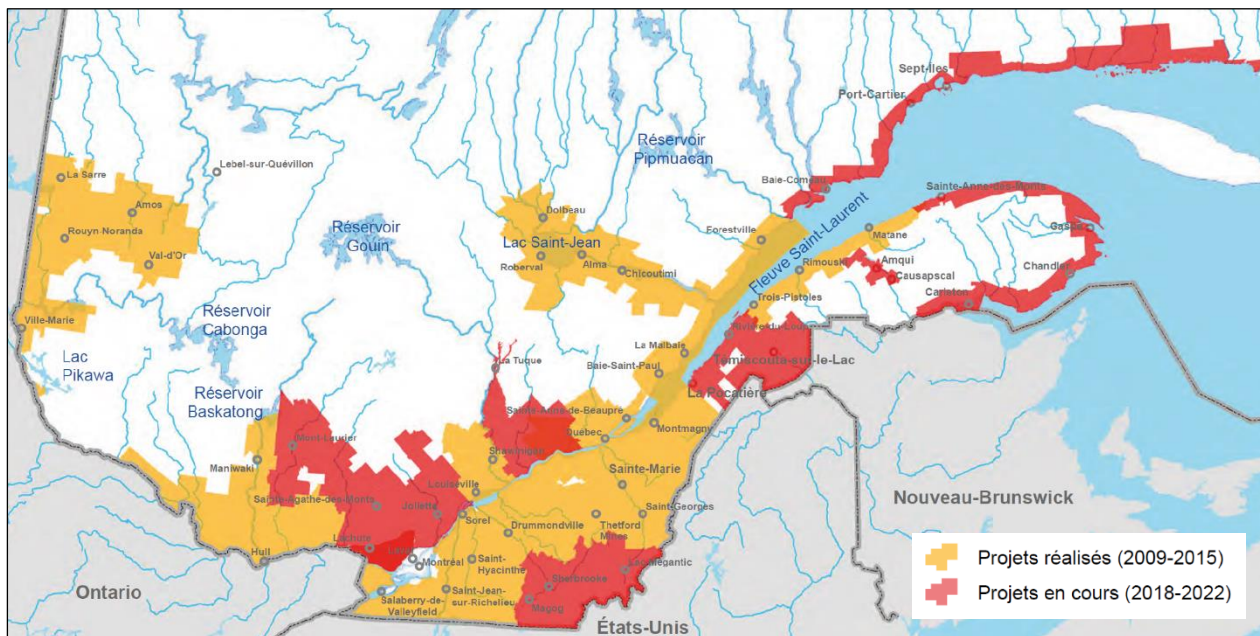


Figure 1.1 : Couverture des projets de connaissance sur les eaux souterraines réalisés entre 2009 et 2015 et en voie de réalisation entre 2018 et 2022 (MELCC, 2018a)

2 DESCRIPTION DU PROJET

2.1 Objectifs du projet

Le PACES Estrie a l'objectif général de dresser un portrait des ressources régionales en eau souterraine afin de répondre aux questions suivantes :

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

De plus, le PACES Estrie vise plusieurs objectifs qui sont spécifiques à ce projet. Les travaux reliés à ces objectifs spécifiques sont décrits à la section 8. D'abord, notre premier objectif spécifique est d'accompagner les municipalités de l'Estrie pour la protection de leurs prélèvements d'eau potable selon les exigences du *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* (RPEP) [Québec, 2014]. Cet accompagnement a déjà été amorcé grâce à une participation aux formations données par le RQES sur le RPEP et ses exigences. Nous avons aussi aidé les municipalités qui en ont fait la demande dans la définition des travaux requis pour la mise aux normes du RPEP. Nous pourrions aussi offrir une assistance à l'évaluation des travaux réalisés par des firmes d'experts en hydrogéologie. Nous pourrions aussi transmettre les données sur les conditions hydrogéologiques régionales définies par le présent projet aux experts mandatés pour réaliser les travaux. Quinze municipalités ont accepté de faire analyser l'eau produite par leurs puits d'approvisionnement pour des paramètres géochimiques et isotopiques qui permettront de préciser la vulnérabilité des puits. Sur l'ensemble de ces municipalités, 9 ont des prélèvements de catégorie 1, 3 ont des prélèvements de catégorie 2 et la catégorie du prélèvement est inconnue pour 3 prélèvements. Ces travaux sur les approvisionnements municipaux devraient nous permettre d'avoir une meilleure implication des municipalités dans le projet que lors des projets PACES antérieurs, tout en facilitant l'accès aux données sur les puits municipaux qui sont nécessaires pour bien évaluer le potentiel aquifère de la région d'étude.

Le deuxième objectif spécifique du PACES Estrie est d'aborder des problématiques régionales sur les eaux souterraines qui sont d'intérêt particulier pour l'Estrie. Nos travaux préliminaires indiquent que la transmissivité de l'aquifère rocheux régional est très limitée. Par contre, les travaux de Caron (2013) sur les dépôts meubles de la région suggèrent que les épaisses accumulations de sédiments dans les vallées peuvent avoir un potentiel aquifère important. En collaboration avec l'UQAM et Olivier Caron, nous allons donc entreprendre des travaux plus détaillés pour évaluer ce potentiel aquifère. Des travaux réalisés par la Direction de santé publique en Estrie ainsi que des données du MELCC sur la qualité des approvisionnements municipaux indiquent que l'arsenic est souvent présent dans l'eau souterraine en concentrations dépassant la norme de potabilité. Dans le cadre de notre évaluation de la qualité de l'eau souterraine en Estrie nous allons donc porter une attention particulière à l'arsenic afin d'en préciser la distribution spatiale et de comprendre les conditions qui contrôlent sa présence.

Enfin, notre troisième objectif spécifique est d'assurer le transfert des connaissances aux partenaires régionaux et de faciliter l'utilisation des résultats du PACES Estrie. Cet objectif pourra être atteint en partie grâce à une participation aux activités de transfert du RQES qui seront développées et mises en œuvre par l'UQTR. Nous allons aussi dédier des efforts particuliers pour que les résultats du PACES Estrie soient intégrés dans le *Plan directeur de l'eau* (PDE) du COGESAF avant la fin du projet.

2.2 Région d'étude

La région d'étude de 10 695 km² couvre la majeure partie de la région administrative de l'Estrie qui comprend les parties amont 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 2.1). Le territoire d'étude est borné au nord et nord-est par la région de Chaudière-Appalaches, au nord-ouest par la MRC Les Sources et la MRC d'Arthabaska (région du Centre-du-Québec), à l'ouest par la région de la Montérégie et au sud et sud-est par la frontière internationale avec les États-Unis d'Amérique.

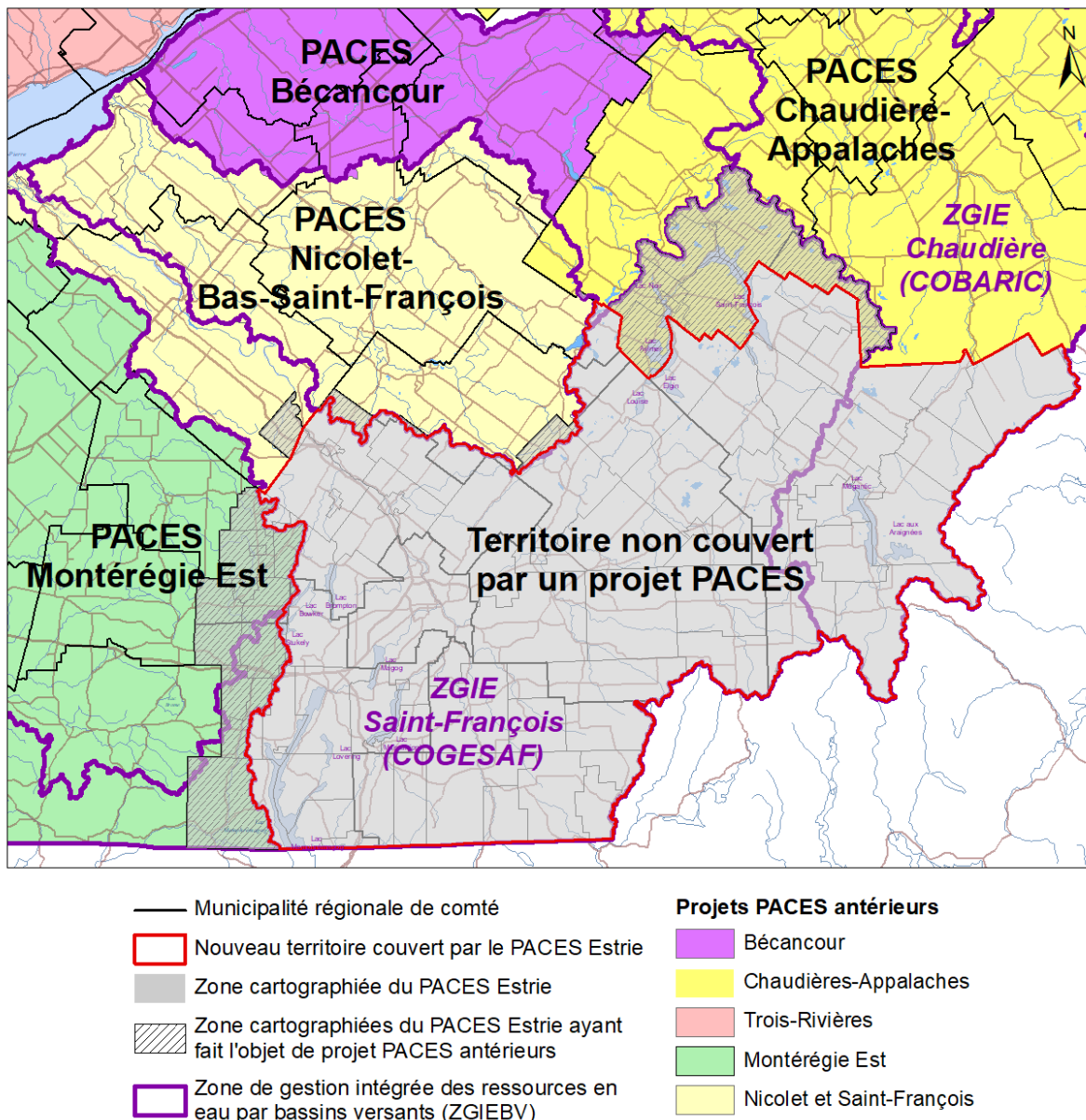


Figure 2.1 : Région d'étude du PACES Estrie

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 et de la partie amont du bassin versant de la rivière Saint-François qui n'avait pas été couverte par un projet PACES antérieur. La périphérie de la région d'étude a auparavant été couverte par les projets PACES réalisés en Montérégie Est (Carrier et al., 2013), en Chaudière-Appalaches (Lefebvre et

al., 2015) et dans le bassin de la rivière Nicolet et du Bas-Saint-François (Larocque et al., 2015). Le polygone rouge montré à la figure 2.1 englobe la partie de la région d'étude non couverte par un projet PACES antérieur. Les polygones mauves correspondent aux limites des zones de gestion intégrée des ressources en eau par bassins versants (ZGIEBV). Les zones hachurées sont dans la région d'étude même si déjà couvertes par un ancien projet PACES. Cette définition des limites de la région d'étude évite qu'il reste des secteurs non couverts par un projet PACES et assure que les MRC de l'Estrie ainsi que la partie amont du bassin versant de la rivière Saint-François soient complètement couvertes par un même projet PACES. Cette définition des limites de la région implique toutefois une certaine superposition avec les projets PACES antérieurs. Cependant, même si ces secteurs déjà couverts feront l'objet d'une cartographie complète, il n'y aura pas de nouveaux travaux de terrain dans ces zones, notamment aucun nouvel échantillonnage de l'eau souterraine.

Les cartes de l'annexe 1 présentent la région d'étude sans indiquer les secteurs où il y a une superposition de la région d'étude avec celle de projets PACES antérieurs. La carte 2 montre que la région d'étude couvre la ville de Sherbrooke et cinq (5) municipalités régionales de comté (MRC) de l'Estrie : Coaticook, Le Haut-Saint-François, Le Granit, Le Val-Saint-François et Memphrémagog. Seule la MRC des Sources qui est en Estrie n'est pas comprise en entier dans la région d'étude puisqu'elle a déjà été couverte par le projet PACES Nicolet-Bas-Saint-François (Larocque et al., 2015).

Le tableau 2.1 présente des statistiques sur la région d'étude. La densité de population est plus importante dans la partie ouest de la région d'étude où se trouve la ville de Sherbrooke et les MRC de Memphrémagog et du Val-Saint-François. Les MRC du Haut-Saint-François et du Granit couvrent de grandes étendues à l'est de la région d'étude. C'est le bassin de la rivière Saint-François qui englobe la grande majorité de la région d'étude. Une partie importante de la MRC du Granit est aussi couverte par le bassin de la rivière Chaudière. Des parties mineures d'autres bassins versants sont aussi recoupées à la périphérie de la région d'étude.

Tableau 2.1 : Superficie et population sur le territoire du PACES Estrie (Institut de la statistique, 2018) - Superficie totale calculée à l'aide d'ArcGIS

Territoire des MRC ² du PACES Estrie	Population (2018)	Superficie cartographiée / Superficie totale (km ² / km ²)	Territoire des OBV ³ du PACES Estrie	Superficie Cartographiée (km ²)
MRC Coaticook	19 007	1 354 / 1 354	Saint-François (COGESAF) en Estrie ⁴	8 135
MRC Le Granit	22 019	2 831 / 2 831	Chaudière (COBARIC) (MRC Le Granit)	1 685
MRC Le Haut-Saint-François	22 528	2 307 / 2 307	Baie Missisquoi (MRC Memphrémagog)	388
MRC Le Val-Saint-François	32 065	1 427 / 1 427	Yamaska (MRC Le Val-Saint-François)	395
MRC Memphrémagog	50 100	1 449 / 1 449	Nicolet (MRC Les Sources)	85
Sherbrooke	165 859	367 / 367	Bécancour (MRC Arthabaska)	8
MRC Les Sources ¹ (Danville, Saint-Camille, Saint-Georges-de-Windsor, Saint-Joseph-de-Ham-Sud)	5 690	125 / 793		
MRC Arthabaska ¹ (Saints-Martyrs-Canadiens)	255	61 / 1 627		
MRC Beauce-Sartignan ¹ (La Guadeloupe, Saint- Hilaire-de-Dorset, Saint- Évariste-de-Forsyth)	2 478	141 / 1 977		
MRC Les Appalaches ¹ (Adstock, Beaulac-Garthby, Disraeli, Saint-Joseph-de-Coleraine, Sainte-Praxède, Thedford Mines)	36 095	633 / 1 987		
Total	356 096	10 695	Total	10 696

¹ Les municipalités des MRC hors Estrie ne sont pas complètement incluses dans la superficie cartographiée. La population indiquée représente la population de l'ensemble des municipalités, même si seulement une partie est présente dans la zone d'étude du PACES Estrie ;

² La superficie des MRC et des municipalités a été calculée à partir des données de la BDGA à l'échelle 1 / 1 000 000 (MRNF, 2008) ;

³ La superficie des OBV a été calculée à partir du shapefile des zones de gestion intégrée de l'eau par bassins versants (MELCC, 2018f) ;

⁴ Le territoire du COGESAF comprend aussi la partie amont du bassin de la rivière Connecticut (296 km²) située en Estrie.

2.3 Équipe de réalisation et partenaires

L'INRS a reçu le mandat du MELCC pour réaliser ce projet. Le COGESAF, en collaboration avec le COBARIC, assure les relations avec les partenaires régionaux et l'intégration des résultats dans leurs plans directeurs de l'eau. La réalisation du projet est aussi assurée par la collaboration des partenaires régionaux et des collaborateurs de recherche. Les principaux collaborateurs et organismes impliqués sont résumés ci-dessous.

Universités :

- Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE) :
 - Chercheurs et professionnels : René Lefebvre, Geneviève Bordeleau, Jean-Marc Ballard, Mélanie Raynauld, François Huchet, Harold Vigneault, Marc Laurencelle et Jean-Sébastien Gosselin ;
 - Étudiants : Élise Colléau, Julie Domaine, Thomas Vincent, Raphaël Mathis, Marie-Pierre Champagne, Sarah Lahrarti (à partir de septembre 2019) ;
- Université du Québec à Montréal (UQAM) : Michel Lamothe et Olivier Caron ;
- Université Laval : Roxane Lavoie et étudiant M.Sc. à venir ;
- Université de Rennes 1, Observatoire des sciences de l'univers de Rennes : Virginie Vergnaud.

Partenaires de réalisation du projet :

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

Organismes de recherche :

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

Partenaires régionaux :

- Municipalités régionales de comté (MRC) : Coaticook, Le Haut-Saint-François, Le Granit, Le Val-Saint-François, Memphrémagog ;
- Ville : Sherbrooke ;
- Fédération de l'UPA de l'Estrie ;
- Direction régionale de l'Estrie du MAPAQ ;
- Direction régionale de l'Estrie du MELCC ;
- Direction de la santé publique de l'Estrie.

Partenaires privés :

- Laforest Nova Aqua Inc. (LNA) : Julie Grenier et Laurie Tremblay.

3 TRAVAUX ANTÉRIEURS

Comme le montre la figure 1.1, 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 dans les Appalaches, tant en Montérégie Est et 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 carte 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 pourra 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 7.1), 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 il y a moins de contrôle sur la nature et l'épaisseur de ces sédiments en Estrie. Des travaux spécifiques seront mis en œuvre pour mieux définir le potentiel aquifère des sédiments superficiels à l'aide des données disponibles sur les captages municipaux et si requis par quelques sondages ciblés au piézocône ou par rotoperçusion avec la foreuse de l'INRS. Ces travaux vont profiter de la collaboration d'Olivier Caron, chercheur à l'UQAM, et de Michel Parent, chercheur à la CGC.

Un récent rapport du MDDELCC (2016) sur la qualité de l'eau des approvisionnements en eau municipaux met en évidence la problématique de l'arsenic en Estrie (figure 3.1). La Direction de Santé publique de l'Estrie a 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. 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). En plus des descriptions des lithologies et des minéralogies du roc contenues dans ces documents, il pourrait être intéressant d'exploiter les données sur la géochimie des sédiments de ruisseaux qui comprennent les concentrations en arsenic (Choinière et Leduc, 1990). 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., 2018). 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. Il faudra toutefois avoir accès aux données brutes à la base de cette étude afin de mettre en relation ces résultats avec la caractérisation géochimique de l'eau souterraine qui sera réalisée dans le cadre du PACES Estrie.

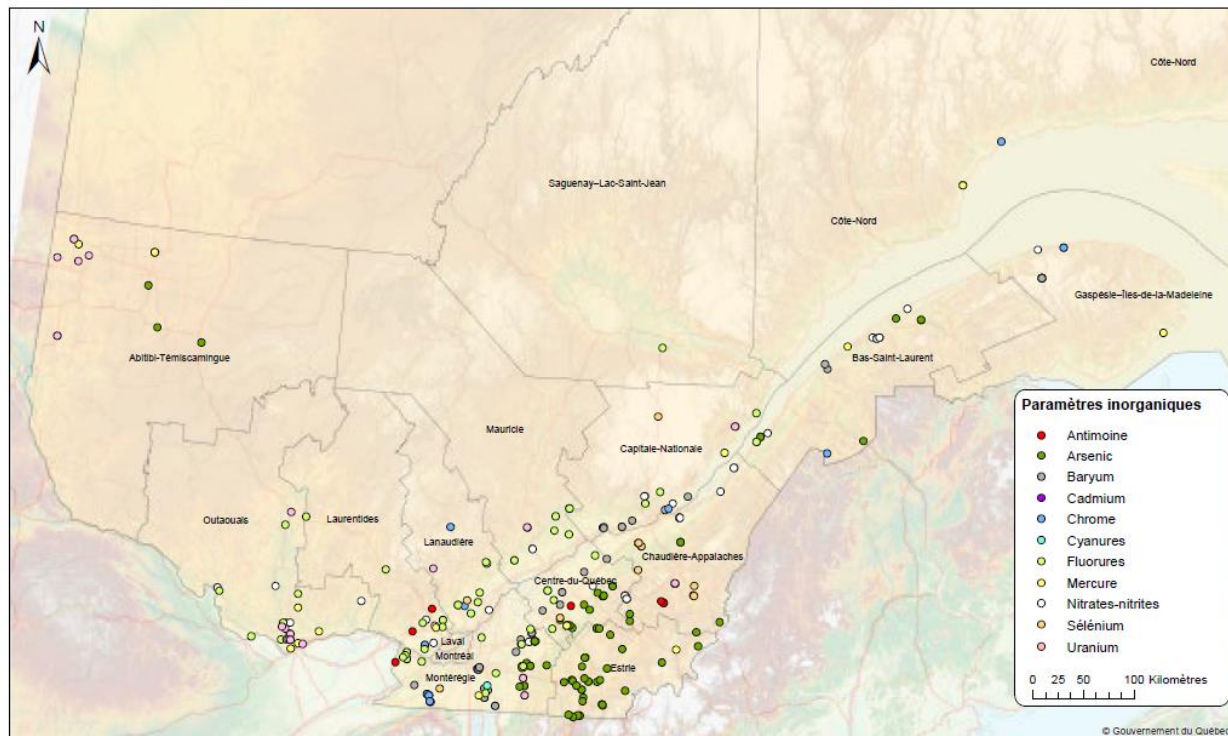


Figure 3.1 : Réseaux de distribution avec au moins un dépassement de norme d'un paramètre inorganique (MDDELCC, 2016)

En plus des études antérieures, plusieurs projets complémentaires sont en voie de réalisation en même temps que le PACES Estrie. Il y a tout d'abord les projets régionaux d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines qui sont aussi en cours de réalisation dans les Laurentides (UQAM), le Bas Saint-Laurent et la Gaspésie (UQAR) ainsi que la Côte-Nord, la Mauricie et Lanaudière (UQAC) (MELCC, 2018d). Comme lors de la réalisation des projets antérieurs, il y aura concertation, collaboration et échanges entre les projets du PACES.

Le PACES Estrie va aussi profiter de la réalisation du projet RADEAU 1 (Delmotte, 2017) qui a fait l'estimation de l'usage de l'eau, particulièrement à des fins agricoles, et des conflits d'usage potentiels en relation avec l'impact des changements climatiques (CC). Nous avons obtenu cette estimation de l'usage de l'eau faite en Estrie et nous allons collaborer avec le projet RADEAU pour nous assurer de produire la meilleure estimation possible de l'usage de l'eau. 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., 2019). Cet outil sera aussi appliqué dans le cadre du PACES Estrie pour faire l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux. Enfin, les projets réalisés pour le MELCC dans le cadre du PACC sur le sud du Québec (PSyRESQ) par l'UQAM, l'Université Laval, la CGC et l'INRS couvrent l'Estrie et vont ainsi produire des résultats complémentaires à ceux produits par le PACES Estrie (Lefebvre, 2018).

Il reste encore à réaliser une revue de littérature systématique sur l'Estrie pour compiler tous les travaux pertinents par rapport au PACES Estrie. Il faudra aussi compléter l'inventaire des rapports contenant des données d'intérêt hydrogéologique avec l'aide du bureau régional du MELCC en Estrie, des MRC et des municipalités. La compilation des rapports existants va se poursuivre jusqu'à la fin de 2019.

4 INVENTAIRE DES DONNÉES EXISTANTES

4.1 Synthèse des données acquises

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 débuté en mai 2018 et devrait se poursuivre jusqu'à 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 4.1 présente l'inventaire actuel de l'acquisition des données existantes.

Tableau 4.1 : Inventaire de l'acquisition des données existantes

Thèmes	Description des jeux de données	Source	Format	Obtenue
Activités potentiellement polluantes	Codes d'utilisation de bien-fonds (CUBF)	MAMOT	Géodatabase	Oui
	Répertoire des terrains contaminés	MELCC	Excel	Oui
	Répertoire des dépôts de sols et de résidus industriels	MELCC	Excel	Oui
	Répertoires locaux d'industries	MRC/CLD/Municipalités	Excel	À venir
Affectation du territoire	Portrait provincial d'aménagement du territoire (PPAT)	MAMOT	Géodatabase	Oui
	Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA)	MERN	Géodatabase	Oui
	Utilisation du territoire (2015 et 2016)	MELCC	Géodatabase	Oui
	Utilisation du territoire du Vermont	U.S. Geological Survey	DBF	Oui
Climat	Données climatiques quotidiennes à maillage de 10 km au Québec	MELCC-Service Info-Climat	Fichier NetCDF	Oui
	Données climatiques quotidiennes à maillage de 7 km pour l'Amérique du Nord	Livneh et al., 2015	Fichier NetCDF	Oui
	Localisation des stations météorologiques	MELCC-DSEE	Excel	Oui
Géologie	Géologie du Quaternaire	MERN-SIGEOM	Géodatabase	Oui
	Géologie du Quaternaire du Vermont	U.S. Geological Survey	Shapefile	Oui
	Affleurements de compilation	MERN-SIGEOM	Shapefile	Oui
	Compilation de données géologiques (zones géologiques, linéaments)	MERN-SIGEOM	Géodatabase	Oui
	Compilation de données géologiques (provinces et zones géologiques, failles)	MERN-SIGEOM	Géodatabase	Oui
	Compilation de données géologiques (zones géologiques et linéaments)	MERN-SIGPEG	Shapefile	Oui
	Forages diamant	MERN-SIGPEG	Shapefile	Oui

Thèmes	Description des jeux de données	Source	Format	Obtenue
Hydrogéologie	Localisation des puits du réseau de suivi (RSESQ)	MELCC	Excel, Access, PDF	Oui
	Prélèvements municipaux et privés (Catégories 1, 2 et 3) (localisation des prélèvements et volume d'eau capté)	MELCC	Excel	Oui
	Inventaire des grands préleveurs (localisation des prélèvements et volume d'eau capté)	MELCC	Excel	Oui
	Localisation des puits (SIH)	MELCC-SIH	Access	Oui
	Localisation des forages pétroliers et miniers	MERN	Géodatabase	Oui
	Localisation des forages géotechniques (MTQ)	MTQ	Excel, Shapefile	Oui
	Données des travaux de McCormack	MERN	Rapport	Oui
	Rapports d'études hydrogéologiques municipaux	Municipalités, MRC, Direction régionale du MELCC	Rapport	En cours de saisie
Hydrographie	Localisation des barrages (avec capacité)	MELCC-CEHQ	Géodatabase	Oui
	Cadre de référence hydrographique du Québec (CRHQ)	MELCC-DPEP	Géodatabase	À vérifier
	Base de données topographiques du Québec (BDTQ)	MERN	Géodatabase	Oui
	Base de données pour l'aménagement du territoire du Québec (BDAT)	MERN	Arc Info	Oui
	Région hydrographique (unités de découpage hydrographique (UDH))	MERN	Shapefile	Oui
	Carte des régions hydrographiques (bassins hydrographiques multiéchelles)	MELCC-CEHQ	Shapefile, Géodatabase	Oui
	Carte des limites de bassins versants (ZGIEBV)	MELCC	Shapefile	Oui
	Milieux humides potentiels			Oui
	Milieux humides détaillés			Oui
Hydrométrie	Localisation des stations hydrométriques	MELCC-CEHQ	Excel	Oui
	Suivi hydrologique de différentes stations hydrométriques	MELCC-CEHQ	Texte	Oui
	Estimations quotidiennes des quantités d'eau provenant de la fonte des neiges et de la pluie	MELCC-CEHQ	À venir	À vérifier
	Années de début et fin des données aux stations hydrométriques	MELCC-CEHQ	Texte	Oui
	Débits de base journaliers aux stations sélectionnées	MELCC-CEHQ	Texte	Oui
	Occupation du sol	Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD)	FADQ	Shapefile
Occupation du sol		MAPAQ	Grid	Oui
Cartes des zones inondables		MELCC-CEHQ	À venir	À vérifier

Thèmes	Description des jeux de données	Source	Format	Obtenue
Pédologie	Information pédologique	IRDA (MAPAQ)	Arc Info, Shapefile	Oui
Photos aériennes	Orthophotos	MERN	TIF	Oui
Qualité de l'eau	Carte de la qualité de l'eau de surface des tronçons (BQMA)	MELCC	Excel	Oui
	Banque de données géochimiques du Québec (BADGEQ)	MERN	Access	Oui
Routes, limites municipales et toponymie	Base de données topographiques du Québec (BDTQ)	MERN	Shapefile	Oui
	Base de données pour l'aménagement du territoire du Québec (BDAT)	MERN	Arc Info	Oui
	Base de données géographiques et administratives (BDGA), échelle 1/1000000	MERN	Géodatabase	Oui
	Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA)	MERN	Shapefile	Oui
	Adresse Québec	À vérifier	Géodatabase	Oui
Topographie	Modèle numérique altimétrique (MNA)	MERN	TIF	Oui
	Levés LiDAR	MERN	Fichier TIF et LAS	Oui
	SRTMGL1: NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second V003	NASA	Fichier HGT	Oui
Végétation	Système d'information écoforestière (SIEF)	MERN	Shapefile	Oui

4.2 Levés Lidar et orthophotographies

Les levés Lidar et les orthophotographies peuvent avoir plusieurs applications dans le cadre du PACES Estrie, notamment pour préciser la cartographie des formations superficielles. Les données Lidar obtenues et traitées jusqu'à maintenant couvrent la MRC de la Coaticook, et la vallée de la rivière Saint-François. Ces données ont été obtenues du MERN. D'autres données Lidar sont également disponibles pour la vallée de la rivière Chaudière (Lidar hydrique MELCC, relevé en 2014) ainsi que pour la ville de Mégantic (Lidar MTQ, relevé en 2013). La demande a été formulée au MERN, mais les données n'ont pas encore été reçues. De nouvelles données Lidar qui couvrent les MRC de Coaticook et de Val-Saint-François ainsi que les orthophotographies pour toute la région de l'Estrie venaient juste d'être obtenues en août 2019 au moment de rédiger ce rapport. Ces données ont été acquises en octobre 2017. Le tableau 4.2 donne les informations sur les données Lidar disponibles pour la zone d'étude. Le traitement des données Lidar sera complété à l'automne 2019.

Des données Lidar sont également disponibles sur le portail Données Québec pour toute la région couverte par le PACES Estrie. Ces données proviennent du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). La demande a été faite pour obtenir les données brutes des Lidar. Ces données sont attendues au courant de l'automne 2019.

Tableau 4.2 : Données Lidar disponibles pour la zone d'étude

Nom des dossiers	Date des levés	Contenu	Statut
<i>Lidar_MRC_Coaticook</i>	4, 5 et 18 avril 2015		Traité
<i>Lidar_Riviere_Saint_Francois</i>	1, 2 et 3 mai 2013	<i>Vallée de la rivière Saint-François</i>	Traité
<i>Lidar_MRC_Granit</i>	2013	<i>Ville de Mégantic</i>	Pas reçu
<i>Lidar_MRC_Granit_Rivière_Chaudière</i>	Inconnue	<i>Vallée de la rivière Chaudière à partir du lac Mégantic</i>	Pas reçu
<i>Lidar_MRC_Coaticook</i>	Octobre 2017	<i>Partie Est de la MRC de Coaticook</i>	À traiter
<i>Lidar_MRC_Val_Saint_Francois</i>	Octobre 2017	<i>MRC de Val Saint-François</i>	À traiter
<i>Lidar_Estrie</i>	À vérifier	<i>Ensemble de la zone d'étude</i>	À venir

Les données laser pour les deux régions, 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 classifier 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 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 ensuite 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. Suite à 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

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

au sol par m²). Cette résolution permet de créer un MNT régional doté d'une résolution spatiale de 1 m x 1 m, et doté d'une précision d'environ 15 cm.

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 azimut 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. Le tableau 4.3 présente le contenu des différents fichiers produits à la suite du traitement.

Tableau 4.3 : 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, azimut de 315°, angle d'incidence de 35°, 32 bit
dtm_1m_HS_A315_H35_8bit	Relief ombré, azimut 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

5 DESCRIPTION DE LA RÉGION D'ÉTUDE

La présente section fait la description du territoire d'étude à partir de cartes préliminaires qui ont été produites avec les données assemblées sur la région d'étude. Pour ce rapport de la Phase 1, les cartes ont été produites à l'échelle 1 / 100 000 et dans le même format que celui prévu pour les cartes finales. Bien que le contenu de l'ensemble des cartes soit sujet à révision pour les versions finales, ce choix permet déjà de valider le format de présentation prévu pour les cartes du PACES Estrie.

5.1 Routes et limites municipales – Livrable 2

La carte du livrable 2 présente les municipalités à l'intérieur des cinq MRC de l'Estrie dans la région d'étude ainsi que les MRC d'autres régions à la périphérie du territoire. La carte 2 indique aussi les principales routes reliant les municipalités de la région.

Le réseau routier, les limites des municipalités ainsi que l'hydrographie proviennent de la Base de données géographique et administratives à l'échelle 1 / 1 000 000 (BDGA, version 2.3, mise à jour en août 2008) [MRNF, 2008], alors que les limites des MRC proviennent du Système sur les découpages administratifs à l'échelle 1 / 20 000 (SDA, version mise à jour en juin 2017) [MERN, 2017]. Ces deux bases de données (BDGA et SDA) ont été fournies par le MELCC mais proviennent du MERN. La toponymie est issue en partie de la BDGA et du SDA.

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.

5.2 Topographie et modèle altimétrique numérique (MAN) – Livrables 1 et 3

La carte du livrable 1 présente les courbes topographiques alors que la carte du livrable 3 montre le modèle altimétrique numérique (MAN). La topographie du territoire (carte 1) provient de la Base de données topographique du Québec (BDTQ). La topographie est également représentée sur la carte 3 par le MAN fourni par le MELCC. Le MAN est produit par la Direction du Patrimoine écologique et des Parcs (DPEP) du MELCC, 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 deux 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 longeant 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. 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.

5.3 Hydrographie, physiographie et limites des bassins versants – Livrables 4 et 5

La carte 4 du livrable 4 montre l'hydrographie et la carte 5 du livrable 5 montre les bassins versants de la région d'étude. Le réseau hydrographique ainsi que les limites des bassins versants utilisés pour la carte 4 proviennent du CEHQ (2018) et de la BDTQ (2006). 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 les surcharger. Les grands bassins ainsi que les bassins de niveau 1 et 2 (MDDELCC, 2017) sont

indiqués sur la carte 5. Plusieurs lacs importants se trouvent 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 zone d'étude contient la majorité du bassin de la rivière Saint-François, sauf le Bas-Saint-François en aval de la MRC du Val-Saint-François. La partie amont du bassin de la rivière Chaudière, y compris le lac Mégantic, couvre le sud-est du territoire. La section amont du bassin de la rivière Connecticut se trouve également au 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 couvert par le PACES Estrie. La carte 5 montre que plusieurs stations de jaugeage sont présentes dans la zone d'étude, dont plusieurs mesurent à la fois les débits et la qualité de l'eau de surface.

5.4 Occupation du territoire

L'occupation du territoire de la région d'étude peut être définie par une série de livrables : l'occupation du sol (livrable 6), la couverture végétale (livrable 7), les milieux humides (livrable 8) et l'affectation du territoire (livrable 9). Chacun de ces livrables est brièvement décrit dans les sous-sections suivantes.

5.4.1 Occupation du sol – Livrable 6

L'utilisation du territoire en 2016 (MDDELCC, 2016) est présentée à la carte 6. Cette carte montre que la principale utilisation du territoire est forestière en Estrie, 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. Les secteurs anthropiques dominent la ville de Sherbrooke et l'axe entre Magog et East Angus passant par Sherbrooke est fortement urbanisé. Plusieurs milieux humides sont présents, mais peu apparaissent à l'échelle de la carte 6. Tel que mentionné dans la section précédente, plusieurs lacs majeurs sont aussi présents dans la région.

5.4.2 Couverture végétale – Livrable 7

Les différents types de peuplements forestiers sont présentés à la carte 7. Les données sont issues du Système d'information écoforestière (SIEF) du MERN (MERN, 2018a). Les peuplements forestiers ont été regroupés en trois classes afin de simplifier la représentation cartographique : feuillus, résineux et mélangés (mixte). Les peuplements forestiers couvrent 72% du territoire d'étude du PACES Estrie. Les forêts mixtes occupent la plus grande partie du territoire (33,5 %), suivi des feuillus (25,8 %) et des résineux (13,0 %).

5.4.3 Milieux humides – Livrable 8

La carte 8 présente la localisation et la différenciation des milieux humides sur la base des informations disponibles jusqu'à maintenant. La cartographie détaillée des milieux humides provient de Canards Illimités Canada (CIC). À l'exception du bassin versant de la rivière Coaticook, cette cartographie détaillée est présentement en voie de réalisation en Estrie. À cette couche a été ajoutée la cartographie des milieux humides potentiels (MDDELCC, 2017) provenant du rassemblement de plusieurs bases de données :

- Unités considérées comme humides de l'Inventaire écoforestier du Québec Méridionale (IEQM 2017) 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.

On constate qu'il y a de grandes étendues de milieux humides potentiels (non classés) en relation avec une grande partie des cours d'eau ou couvrant des étendues assez importantes dans les vallées. Une analyse plus détaillée sera requise pour déterminer si la présence de ces milieux humides potentiels est reliée à des zones d'émergence de l'eau souterraine ou à la présence de sédiments fins.

5.4.4 Affectation du territoire – Livrable 9

La carte du livrable 9 montre l'affectation du territoire dans la région d'étude. Les données d'affectation du territoire proviennent 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 5.1 présente la comparaison entre l'affectation du territoire (carte 9) et l'utilisation réelle du territoire (carte 6) telle que cartographiée en 2016. Les forêts couvrent la majorité du territoire à l'étude avec 78,6 %. Les activités agricoles et les activités anthropiques couvrent respectivement 17,4 % et 4 % du territoire. Des différences significatives peuvent être remarquées suite à la comparaison de ces données, par exemple, l'affectation du territoire prévue pour les activités anthropiques est de 15,1 % alors qu'on constate que l'occupation du territoire réelle pour ces activités est de seulement 4,0 % du territoire. Les activités agricoles occupent également une superficie moindre par rapport à l'affectation du territoire prévue ; en effet, 17,4 % est utilisé pour l'agriculture en 2016 alors que l'affectation du territoire prévoit une superficie possible de 37,0 % pour l'agriculture.

Tableau 5.1 : Superficie et proportion (%) d'occupation du sol et d'affectation du territoire

Type d'occupation du territoire	Occupation du sol (2016) Livrable Phase 1 – no. 6		Affectation du territoire Livrable Phase 1 – no. 9	
	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
PACES Estrie¹	10 305,8	100,0	10 352,8	100,0

¹ La superficie totale de la région 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 superficie de l'occupation du sol est basée sur la matrice d'utilisation du territoire de 2016 (MDDELCC, 2016). Les superficies ont été calculées en multipliant le nombre de pixel pour chaque type d'occupation par l'aire d'un pixel. Pour la matrice d'utilisation du territoire, un pixel représente la superficie d'une cellule de 30 m par 30 m. Les pixels attribués à la catégorie *Aquatique* ont été soustraits de la superficie totale. Pour les fins de classement dans le tableau 5.1, la catégorie *Forêt* regroupe les pixels décrits dans les catégories *Coupe et régénération*, *Forestier*, *Humide*, *Non classifié* et *Sol nu et lande*.

Le calcul de la superficie de l'affectation du territoire a été réalisé à partir du *shapefile* du PPAT (MAMOT, 2018). Le *shapefile* a été découpé aux limites de la zone d'étude et les polygones qui représentent les étendues d'eau (BDAT_hydro_s) ont été soustraits afin d'éliminer les affectations du territoire qui se trouvent attribuées à un plan d'eau de façon à ne pas fausser les résultats. La superficie des polygones a été calculée dans ArcGIS pour chaque polygone et la somme des polygones a été additionnée dans Excel pour chaque catégorie. Le champ *theme_province* a été utilisé pour regrouper les polygones dans les trois catégories. Les thèmes *Conservation*, *Forestière* et *Agroforestière* sont regroupés dans la catégorie *Forêt*, les thèmes *Commerciale*, *Industrielle*, *Publique*, *Récréative*, *Résidentielle* et *Urbaine* sont regroupés dans la catégorie *Anthropique* et la catégorie *Agricole* comprend les polygones du thème du même nom.

6 CONTEXTES GÉOLOGiques ET HYDROGÉOLOGiques

6.1 Pédologie – Livrable 10

La carte 10 de la pédologie 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 pédologiques sous forme numérique a ensuite 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 la carte 10 sont détaillées dans les rapports pédologiques indiqués dans le tableau 5.2 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 10, pas moins de sept études pédologiques ont été compilées. Le niveau de détail varie d'un secteur à un autre selon l'échelle utilisée initialement pour produire chacune des cartes. Les unités cartographiques identifiées sur la carte numérique 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 banque de données sur les sols, disponible sur son site internet (<https://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/informations-sur-les-sols/etudes-pedologiques/>). Cette base de données renferme des 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 banque de données sur les sols sont cependant incomplètes ; il sera donc nécessaire de consulter les études pédologiques mentionnées au tableau 6.1 afin d'y 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 10, 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 (protocole PACES no. 11). Cette classification offre une représentation plus adaptée aux besoins du projet de caractérisation hydrogéologique et une meilleure lisibilité des données à l'échelle de la carte (1 / 100 000). 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 10 montre que les sols dérivés de dépôts de till dominant largement dans la région d'étude. On retrouve toutefois dans certaines vallées des sols loameux ou argileux.

Tableau 6.1 : Études pédologiques utilisées pour la cartographie pédologique (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	-	-
					31H01101	21E03201	21E05202	21E11102
18	126 720	1943	Stanstead Richmond Sherbrooke Compton	Le Haut-Saint-François Le Val-Saint-François Les Sources Memphrémagog Sherbrooke	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	Le Val-Saint-François	31H09201	31H09202	31H16102	-
21	40 000	1996	Frontenac	Les Appalaches Beauce-Sartigan Granit	21E03202	21E07202	21E10201	21E15102
					21E02201	21E11102	21E10202	21E16101
					21E06102	21E10101	21E09201	21E14202
					21E07101	21E10102	21E14101	21E15201
					21E06202	21E11201	21E14102	21L03102
39	50 000	1989	Mégantic	Les Appalaches	21E07201	21E11202	21E15101	-
					21E14201	21E14202	21L03101	21L03102
58	50 000	1998	Wolfe	Le Haut-Saint-François Les Appalaches Les Sources	21E05202	21E12201	21E13102	21E13202
					21E12102	21E12202	21E14101	21E14201
					21E11101	21E11201	21E14102	21E14202

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

6.2 Géologie du Quaternaire – Livrable 11A

La carte du livrable 11A montre la géologie des formations superficielles. Cette carte a été obtenue du portail du SIGEOM (Système d'information géominère) du MERN. Pour l'Estrie, cette carte résulte de plusieurs sources, mais essentiellement des travaux de doctorat de Caron (2013). Ses travaux ont notamment permis de mettre à jour la cartographie des formations superficielles sur 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) également 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 au 1 / 50 000.

Les feuillets SNRC couverts par ces diverses études sont indiqués au tableau 6.2. Le format de présentation de la carte 11A 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 11A n'inclut pas les sites d'observation (sections ou affleurements) utilisés pour la définition des différentes unités quaternaires.

Tableau 6.2 : Études à l'origine de la cartographie des formations superficielles

Étude	Échelle	Année	Bassins couverts	Feuillet SNRC au 1 : 50 000				
				<i>31H01</i>	<i>31H08</i>	<i>31H09</i>	-	-
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.*

La figure 6.1 illustre le cadre hydrostratigraphique des sédiments superficiels développé pour les bassins versants des rivières Saint-François et Chaudière par Caron et al. (2007). En fait, la séquence complète d'unités n'est présente que dans les vallées enfouies alors que seuls les sédiments glaciaires (tills) se retrouvent généralement sur les hauts topographiques. Sur la base de ce cadre, le tableau 6.3 résume les unités qui ont été représentées dans le modèle géologique 3D de Caron (2013).

Tableau 6.3 : Unités lithostratigraphiques du modèle géologique 3D des formations superficielles des bassins versants des rivières Saint-François et Chaudière (Caron, 2013)

Codification de la CGC (Commission géologique du Canada)	Identification
O	Sédiments de tourbière
A	Alluvions (inclus Ap, At, Ax)
C	Colluvions
LG	Sédiments lacustres
MGb	Sables et graviers glaciomarins littoraux et prélittoraux
MGd	Sédiments glaciomarins deltaïques
MGa	Argiles et silts glaciomarins marins
LGb	Sédiments glaciolacustres littoraux et pré-littoraux
LGd	Sédiments glaciolacustres deltaïques
LGa	Sédiments glaciolacustres d'eau profonde
G	Sédiments alluvioglaciaux (Gx/Gs ; graviers et sables grossiers)
T	Sédiments glaciaires (Tm, Tc, Tr, Trm, Tf)
Q	Formations quaternaires anciennes (incluant les sédiments Gayhurst)
R	Roc (granite et schiste)

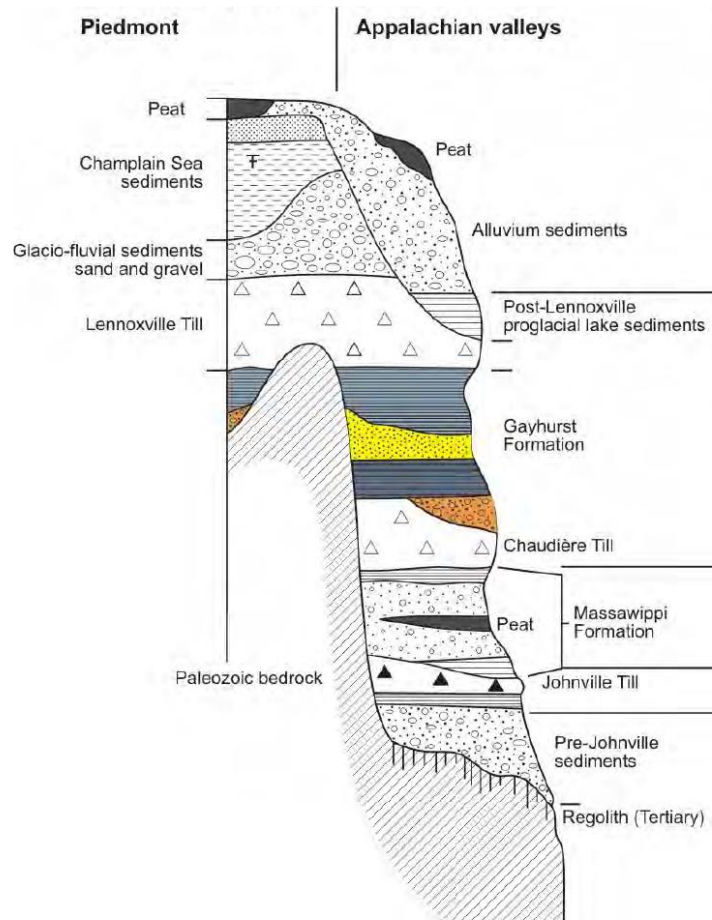


Figure 6.1 : Cadre stratigraphique des sédiments superficiels du bassin versant de la rivière chaudière (de Caron et al., 2007, cité par Caron, 2013)

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 seront discutées à la section 6.5. La prochaine section décrit les données disponibles pour définir l'épaisseur totale de sédiments superficiels.

6.3 Épaisseur des formations superficielles – Livrable 11B

La carte 11B montre l'épaisseur des formations superficielles qui est basée sur la compilation de trois études détaillées dans le tableau 6.4 :

- 1) Les travaux de Caron (2013) ont porté sur la réalisation d'un modèle stratigraphique tridimensionnel des formations superficielles sur les bassins versants des rivières Chaudière et Saint-François. Ainsi, en plus d'obtenir une carte de l'épaisseur totale des formations superficielles sur ces bassins, ces travaux ont permis de différencier chaque unité quaternaire et de les discrétiser spatialement selon leur épaisseur. Ces travaux ont un intérêt tout particulier dans le présent projet de caractérisation hydrogéologique régionale puisque certaines unités quaternaires à granulométrie grossière, en l'occurrence les sédiments fluvioglaciaires, se retrouvent dans des vallées enfouies avec un potentiel aquifère intéressant. Des travaux spécifiques au PACES Estrie vont d'ailleurs porter sur une meilleure définition de ce potentiel aquifère dans les dépôts meubles. Sur le territoire du PACES Estrie, la majorité des données d'épaisseur des dépôts meubles résulte donc de ces travaux ;

- 2) La carte d'épaisseur totale des dépôts meubles issue du PACES Montérégie Est couvre la portion ouest des MRC de Memphrémagog et du Val-Saint-François (Carrier et al., 2013). Cette étude n'ayant pas porté sur la stratigraphie des dépôts quaternaires, les séries ont toutefois été simplifiées afin d'obtenir les épaisseurs pour les sédiments i) sous-jacents à l'argile, ii) argileux et iii) sus-jacents à l'argile ;
- 3) Une petite partie localisée au nord de la MRC du Haut-Saint-François a quant à elle été couverte par le PACES Nicolet-Bas-Saint-François (Larocque et al., 2015). Lors de ces travaux de caractérisation régionale, la distribution spatiale de l'épaisseur totale des dépôts meubles a été définie sans différencier les unités quaternaires.

Tableau 6.4 : Sources des données sur l'épaisseur des formations superficielles

Étude	Livrables	Bassins couverts
PACES Nicolet-Bas-Saint-François (Larocque et al., 2015)	Épaisseur totale des formations superficielles	Rivières Nicolet et Saint-François
Caron (2013)	Épaisseur totale des formations superficielles	Rivières Chaudière et Saint-François
	Épaisseur relative de chaque unité de la colonne stratigraphique	
PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013)	Épaisseur totale des formations superficielles	Rivières Richelieu, Yamaska et baie Mississquoi
	Épaisseur des dépôts meubles sous-jacents à l'argile	
	Épaisseur des dépôts argileux	
	Épaisseur des dépôts meubles sus-jacents à l'argile	

Sur les hauts topographiques, l'épaisseur des sédiments superficiels qui sont constitués essentiellement de till est de moins de 1 m dans le bassin de la rivière Saint-François et de moins de 3 m dans le bassin de la rivière Chaudière. Dans les vallées enfouies, on retrouve des épaisseurs totales de sédiments pouvant excéder 25 m, particulièrement dans les portions sud-ouest à nord-est des vallées des rivières Saint-François et Chaudière. On trouve aussi d'épaisses accumulations de sédiments dans les vallées des affluents au sud de la rivière Saint-François. Une forte accumulation de sédiments se retrouve aussi à l'ouest du Mont-Mégantic. Il sera nécessaire de vérifier les épaisseurs de sédiments à l'aide des nouvelles données acquises à partir de la compilation des études hydrogéologiques antérieures et de la stratigraphie des nouveaux puits d'observation forés lors du présent projet. Cette vérification a déjà été amorcée avec la production de coupes géologiques passant par les puits municipaux dans le cadre du stage de Thomas Vincent, étudiant au master 1 à l'Université de Rennes 1.

6.4 Géologie du roc – Livrable 12

La carte du livrable 12 montre la géologie du socle rocheux. Cette carte a été extraite à partir du portail du SIGEOM (Système d'information géominière) du Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN, 2018b). 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 préliminaire 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, appelés « sous-provinces géologiques ». Du nord-ouest au sud-est, on retrouve les zones de Humber et de

Dunnage, puis la ceinture de Gaspé au sein de laquelle se trouve l'intrusion d'âge crétacé du Mont-Mégantic. Ces trois sous-provinces géologiques sont limitées par des failles d'importance régionale : la ligne Baie-Verte-Brompton et la faille de La Guadeloupe. Les unités géologiques de la région d'étude comprennent une grande variété de lithologies : schistes, roches volcaniques, roches ultramafiques, shales et ardoises, roches granitiques.

Les recherches doctorales récentes réalisées à l'UQAM sur les Appalaches ont produit de nouvelles compilations de cartes géologiques (Perrot, 2019 ; De Souza, 2012). Nous allons vérifier si des cartes géologiques plus récentes pourraient servir à la production du livrable 12.

6.5 Coupes et contextes hydrogéologiques

Le tableau 6.5 fait la définition des unités hydrogéologiques de la région du PACES Estrie sur la base des unités hydrostratigraphiques définies par Caron (2013) (Tableau 6.3). Les sédiments de tourbière ne sont pas considérés à cause de leurs étendues et épaisseurs limitées. La région d'étude étant au-dessus de la limite marine, les sédiments marins ne sont pas non plus considérés. Des coupes géologiques ont été produites à l'aide du modèle géologique 3D de Caron (2013) en utilisant ces définitions d'unités hydrogéologiques.

Tableau 6.5 : Unités hydrogéologiques de la région d'étude du PACES Estrie sur la base de la stratigraphie des formations superficielles définie par Caron (2013)

Unité lithostratigraphique	Description de l'unité	Rôle hydrogéologique
Alluvions (A), colluvions (C) et sédiments glaciolacustres grossiers (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
Sédiments glaciolacustres fins (LGa)	Sédiments silteux présents dans la majorité des vallées. Accumulations pouvant dépasser 5 m localement.	Aquitard
Sédiments fluvioglaciers (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
Sédiments glaciaires (T) (Till de Lennoxville)	Diamictons (granulométrie variables) généralement peu perméable. Accumulations de moins de 1 à 3 m dans les hauts topographiques mais pouvant excéder 10 m dans les dépressions.	Aquitard
Sédiments quaternaires anciens (Q)	Sédiments variables allant de silt à sable et gravier et 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.
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 exploité par les puits résidentiels.

Les coupes géologiques sont regroupées à l'annexe 3. Des coupes ont été produites localement à travers les vallées enfouies où des puits municipaux sont localisés. Ces endroits ont été choisis parce que la compilation des rapports hydrogéologiques a permis d'acquérir des descriptions de forages qui n'étaient pas disponibles lors du développement du modèle géologique 3D par Carron (2013). Les épaisseurs des unités définies au tableau 6.5 ont été extraites du modèle géologique. À partir des descriptions des forages, les unités géologiques ont été interprétées. Les unités ainsi que les intervalles crépinés des puits municipaux ont été projetés sur les coupes. Cet exercice a permis de déterminer que les puits municipaux exploitent souvent les sédiments quaternaires anciens. Toutefois, l'exercice a montré qu'il y a des incohérences locales entre le modèle géologique et les nouveaux forages. Le modèle géologique sera révisé à l'aide des nouvelles données acquises dans le cadre du projet ainsi qu'à partir de la mise-à-jour de la carte de la géologie du Quaternaire à l'aide des levés Lidar.

La carte des conditions de confinement sera produite à l'aide du modèle géologique en utilisant les critères indiqués au tableau 6.6 qui sont les mêmes que ceux des projets PACES réalisés en Montérégie Est (Carrier et al., 2013) et en Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015). Sur la base d'une interprétation préliminaire du contexte géologique, les hauts topographiques seraient en grande partie en conditions libres et semi-confinées par endroit, tandis que les vallées auraient des conditions semi-confinées ou confinées.

Tableau 6.6 : Critères utilisés pour la définition des conditions de confinement

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

À partir des conditions géologiques et hydrogéologiques définies par les coupes et les conditions de confinement, il est possible d'identifier deux contextes hydrogéologiques : les hauts topographiques et les vallées enfouies. Les hauts topographiques en conditions libres seront de grandes zones de recharge du système aquifère rocheux régional. Ce contexte devrait avoir des eaux jeunes et peu évoluées et être vulnérable à la contamination. L'exploitation de l'eau souterraine sera limitée par la faible transmissivité de l'aquifère rocheux qui est exploité par les puits résidentiels. Les vallées enfouies seront des zones d'émergence de l'écoulement régional de l'eau souterraine. Ce contexte a un fort potentiel aquifère dans différentes unités géologiques. Les conditions captives dans les vallées enfouies limitent la recharge mais rendent ce contexte peu vulnérable. L'eau souterraine dans les vallées enfouies sera plus évoluée et pourra avoir des problématiques de qualité à cause des conditions réductrices et du long temps de résidence de l'eau souterraine. Même si les contextes hydrogéologiques sont distincts, ils représentent les pôles d'un même système d'écoulement régional.

7 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

7.1 Propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux fracturé – Livrable 14

Dans la zone d'étude, 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 de sédiments qui se trouvent souvent sous les cours d'eau actuels en Estrie. C'est aussi le roc fracturé qui est généralement exploité par les puits résidentiels. Par contre, les puits municipaux exploitent surtout les aquifères dans les formations superficielles (des travaux sont en voie de réalisation pour préciser la nature des aquifères exploités ; voir section 6.5).

À l'échelle régionale, la conductivité hydraulique du roc fracturé (K) 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 de transmissivité des plus précises, ils ne sont toutefois pas le type d'essai retenu pour les fins de 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 zone d'étude. C'est pourquoi les essais hydrauliques privilégiés ici sont plutôt les essais de capacité spécifique réalisés puis rapportés de façon routinière par les puisatiers. En effet, dans les bases de données hydrogéologiques publiquement accessibles, tel que le Système d'information hydrogéologie (SIH) du MELCC (2018e), on peut facilement retrouver les données sur des 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 performants que le nombre de données étudiées est grand.

L'estimation de la transmissivité à partir des données d'un essai de capacité spécifique, 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 qui représente l'effet de l'emmagasinement dans le puits sur la réponse du puits suite au pompage. Une approche a été développée pour identifier les essais de capacité spécifique qui permettent une estimation quantitative de T . 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 les fins de 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 1). 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-vidage du puits pompé durant l'essai (voir annexe 2).

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 7.1 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).

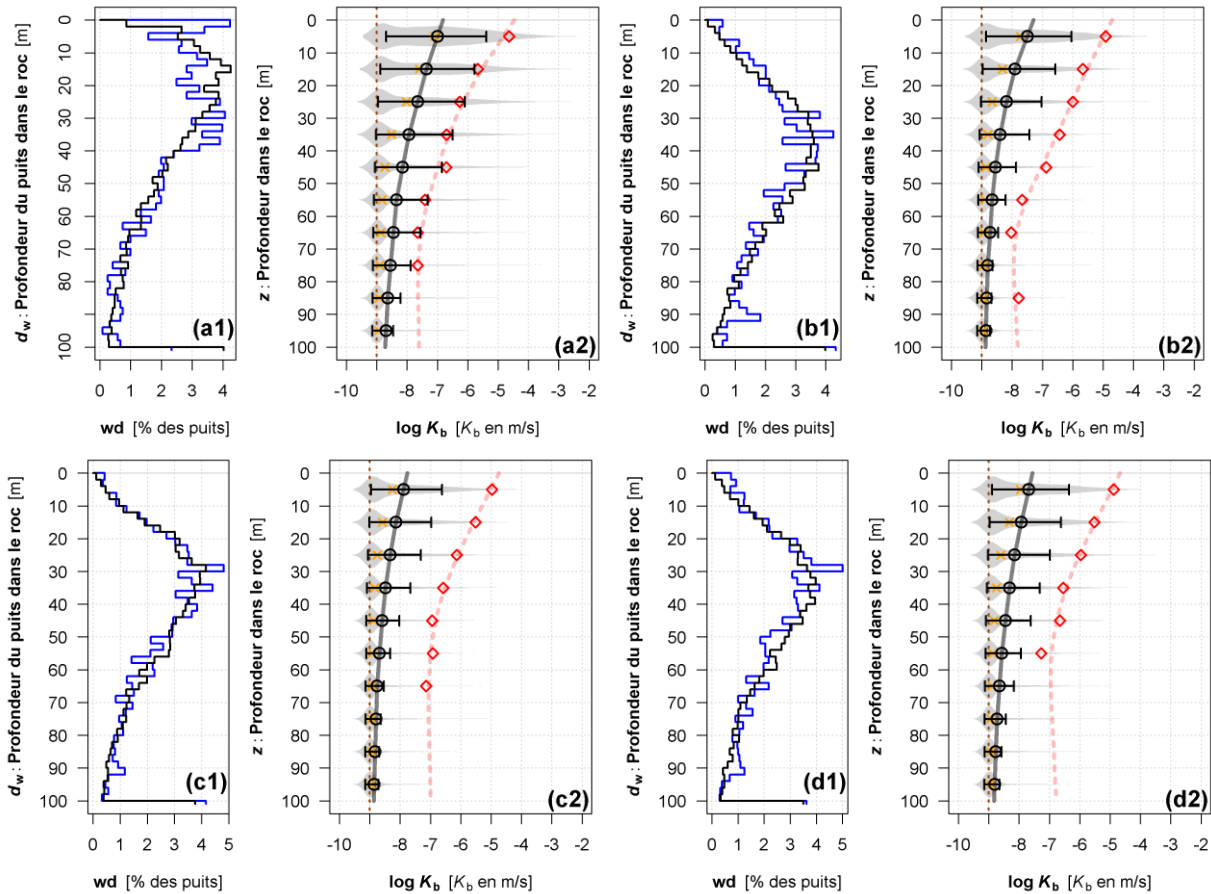


Figure 7.1 : Résultats des simulations Monte Carlo calées pour chacune des quatre zones géologiques du territoire à l'étude dans le PACES Estrie : (a) Appalaches domaine externe, (b) Appalaches domaine interne, (c) Appalaches domaine océanique et (d) Terrains siluro-dévonien

Dans la figure 7.1, 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 log 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 accompagnants 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 7.1 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 7.1 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 7.1 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 $z \approx d_w / 2$). 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 fracturés sont donnés à l'annexe 2.

7.2 Piézométrie de l'aquifère rocheux régional – Livrable 13

La carte du livrable 13 présente la piézométrie de l'aquifère rocheux régional ainsi que la localisation des puits d'observation du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) du MELCC. Dans le cadre du PACES Estrie, le MELCC a ajouté 10 puits d'observation au RSESQ dans la région d'étude qui ne comptait que 5 puits dans la portion de la zone d'étude non couverte par un PACES antérieur. La carte piézométrique est limitée à l'aquifère au roc car les aquifères dans les formations superficielles ne sont pas d'étendue régionale et il y a peu de points de mesure du niveau d'eau souterraine disponibles dans les vallées où se trouve ces aquifères car les puits résidentiels sont essentiellement des puits ouverts dans le roc. De plus, de forts gradients hydrauliques verticaux sont susceptibles d'être présents dans les aquifères granulaires des vallées enfouies car les accumulations de sédiments comprennent à la fois des aquifères et des aquitards (voir coupes à l'annexe 3). Les vallées représentent aussi les zones d'émergence de l'écoulement régional, tel qu'indiqué par les milieux humides potentiels dans les vallées (carte 8), et ils sont en conditions captives (section 6.5), ce qui fait que le niveau piézométrique du roc sous les vallées peut être présumé plus élevé que la surface du sol afin que l'eau souterraine puisse émerger en surface en s'écoulant à travers la séquence de sédiments dans les vallées.

Ainsi, pour la production de la carte piézométrique de l'aquifère rocheux, les points de contrôle utilisés étaient tous les niveaux d'eau disponibles provenant du SIH ou de la compilation des rapports hydrogéologiques. Pour la production de la carte finale, une sélection sera faite des niveaux d'eau uniquement dans les puits au roc, ce qui ne pouvait pas être fait dans l'état présent de la base de données. La très grande majorité des mesures proviennent tout de même de puits au roc.

La carte a été produite avec la méthode d'interpolation par krigeage avec dérive externe reliée à 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). L'imposition des niveaux des cours d'eau comme points de contrôle piézométriques n'a pas été faite car la topographie impose déjà indirectement l'élévation des cours d'eau. 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). 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 13 montre la piézométrie de l'aquifère rocheux comme une version adoucie de la topographie régionale (carte 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 convergent 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.

7.3 Géochimie de l'eau souterraine – Livrable 15

Une compilation a été faite des données géochimiques existantes dans la région d'étude à partir de plusieurs sources : le BADGEQ du MERN, le SIH du MELCC, les projets PACES antérieurs entourant la région d'étude, des analyses de l'eau des puits municipaux, les données extraites de rapports hydrogéologiques et des données obtenues de la Direction de la Santé publique de l'Estrie (uniquement des concentrations en arsenic pour des municipalités de la région et sans coordonnées des puits). À partir de ces données, les cartes du livrable 15 ont été produites pour montrer les dépassements des concentrations maximales acceptables (CMA) reliées à des critères de santé (carte 15A) définis par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP ; Q-2, R.40) ainsi que les dépassements des objectifs esthétiques (OE) (carte 15B) recommandés par Santé Canada (2019). Le tableau 7.1 fait aussi la synthèse des résultats obtenus.

Tableau 7.1 : Dépassement des recommandations pour l'eau potable*

Paramètre chimique	Critère	Nombre d'analyses	Dépassements	
			Nombre	%
Concentration maximale acceptable (CMA, mg/L) – Critère pour la santé				
Arsenic (As)	0,01	3888	143	3,7
Baryum (Ba)	1,0	3891	3	0,1
Cuivre (Cu)	1,0	3867	25	0,7
Fluorures (F)	1,5	27	0	0
Manganèse (Mn)	0,12	3946	652	16,5
Nitrites & nitrates (NO ₂ NO ₃)	10 (N dans NO ₃) ^a	118	0	0
Uranium (U)	0,02	3863	6	0,2
Objectif esthétique (OE, mg/L) – Critère esthétique				
Chlorures (Cl)	250	4053	3	0,1
Fer (Fe)	0,03	3977	341	8,6
Manganèse (Mn)	0,02	3946	1410	35,7
pH	7 à 10,5 ^b	1265	pH < 7 : 658 pH > 10,5 : 0	52,0 0
Sodium (Na)	200	3960	27	0,7
Sulfures (S)	0,05	93	5	5,4

* les CMA sont issues du Règlement sur la qualité de l'eau potable (Q-2, R.40), sauf pour le Mn dont la valeur de la CMA est la recommandation de Santé Canada (2019). Les valeurs d'OE sont extraites de Santé Canada (2019).

a : la CMA indiquée est pour les nitrates mais les analyses combinent généralement nitrites et nitrates.

b : la valeur du pH devrait se situer entre 7 et 10,5.

Au niveau des CMA, les fluorures et les nitrites-nitrates n'ont pas de dépassements mais relativement peu d'analyses sont disponibles pour ces paramètres. D'autres paramètres bien caractérisés, soient le cuivre, le baryum et l'uranium, ont de faibles proportions de dépassements. Historiquement, la principale

problématique de qualité naturelle de l'eau souterraine identifiée en Estrie était l'arsenic et on constate qu'il y a une proportion significative de dépassements (3,7 %) dans les échantillons disponibles. La carte 15A indique que la problématique d'arsenic est particulièrement importante dans la MRC du Val-Saint-François et elle est présente aussi dans les principales vallées de la région d'étude. La répartition spatiale non uniforme des données disponibles ne permet toutefois pas de bien juger des secteurs affectés par la problématique de l'arsenic. Un meilleur jugement pourra être porté sur cette problématique sur la base de l'échantillonnage systématique réalisé à l'été 2019. Les données disponibles ont tout de même permis de faire un échantillonnage un peu plus dense dans les secteurs qui semblaient être affectés par l'arsenic. Bien que le RQEP n'ait pas encore de CMA pour le manganèse, Santé Canada (2019) a fait en 2019 une nouvelle recommandation de CMA à 0,12 mg/L pour le manganèse. La proportion de 16,5 % de dépassements de cette recommandation de CMA ainsi que la répartition des dépassements à la carte 15A démontrent l'importance de la problématique du manganèse sur la qualité de l'eau en Estrie. Les dépassements sont observés sur une grande partie du territoire et il faudra encore une fois se baser sur les résultats analytiques de la campagne d'échantillonnage réalisée à l'été 2019 pour mieux évaluer s'il y a des secteurs plus affectés que d'autres par des concentrations en manganèse excédant la recommandation de CMA.

Au niveau des dépassements des objectifs esthétiques (OE), la principale problématique est encore une fois reliée au manganèse dont les concentrations excèdent l'OE dans 35,7 % des cas. Les concentrations en fer excèdent l'OE dans 8,6 % des cas et c'est la deuxième problématique esthétique en importance. Il y a une forte proportion des analyses en sulfures qui excèdent l'OE, mais relativement peu d'analyses sont disponibles ; il faudra donc attendre les résultats de la campagne d'échantillonnage pour évaluer l'importance des dépassements d'OE pour les sulfures. Il y a relativement peu de dépassements des OE pour les chlorures et le sodium, mais la répartition spatiale des plus fortes concentrations de ces composés dans certaines vallées pourrait indiquer qu'il s'agit bien de zones d'émergence d'eau géochimiquement évoluées qui ont eu un long temps de résidence dans le système aquifère. Les analyses isotopiques, particulièrement le ^{14}C , pourront donner des précisions sur les causes des fortes concentrations en chlorures et en sodium.

7.4 Utilisation de l'eau – Livrable 16

Les données sur les prélèvements d'eau souterraine municipaux et non municipaux en Estrie ont été fournies par le MELCC (2018b et 2018c) et 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, 2001). La carte du livrable 16 montre les types d'approvisionnement municipaux dans la région d'étude. Le tableau 7.2 présente les statistiques sur l'utilisation par MRC. En tout, c'est près de 75 % de la population (356 096 personnes) qui s'approvisionne en eau à partir des réseaux municipaux. Sur les 97 municipalités du PACES Estrie, 66 municipalités possèdent un réseau de distribution d'eau potable. Pour les 31 municipalités sans réseau, les besoins en eau sont essentiellement comblés par des puits privés installés en majorités dans le roc.

La figure 7.2 illustre la consommation résidentielle par type d'approvisionnement ; elle montre que 40 % des résidents s'approvisionnent à partir de l'eau souterraine, dont environ 26 % via des puits privés. Dans la région d'étude, c'est l'eau souterraine qui est la source d'approvisionnement la plus utilisée pour la majorité des municipalités, même si les municipalités les plus importantes de la région s'alimentent par l'intermédiaire des eaux de surface (Sherbrooke et Magog).

Les estimations préliminaires des prélèvements d'eau dans la région d'étude sont compilées au tableau 7.2. Les estimations ont été réalisées de la même façon que pour le PACES Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015). Les estimations n'étaient possibles que pour les MRC de l'Estrie et des autres régions qui sont comprises au complet dans la région d'étude. Les prélèvements totaux en eau sont de 134 Mm³/an alors que le projet RADEAU 1 (Delmotte, 2017) avait estimé la consommation nette d'eau à plus de 45 Mm³/an.

Tableau 7.2 : Statistiques sur l'utilisation de l'eau par MRC

MRC	Nombre total de municipalités	Population totale	% de la population desservie	Nombre de municipalités		
				Avec un réseau en eau souterraine	Avec un réseau en eau de surface ou (mixte)	Sans réseau
Arthabaska	1	255	23.1	1	0	0
Beauce-Sartigan	3	2 478	87.5	2	0	1
Coaticook	12	19 007	52.2	9	1	2
Le Granit	20	22 019	52.4	14	0	6
Le Haut-Saint-François	14	22 528	50.3	11	0	3
Le Val-Saint-François	18	32 065	43.9	3	6	9
Les Appalaches	7	36 095	81.5	3	2	2
Les Sources	4	5 690	35.1	1	0	3
Memphrémagog	17	50 100	64.4	5	4 (3)	5
Sherbrooke	1	165 859	92.2	0	1	0
Total	97	356 096	74.6	49	14	31

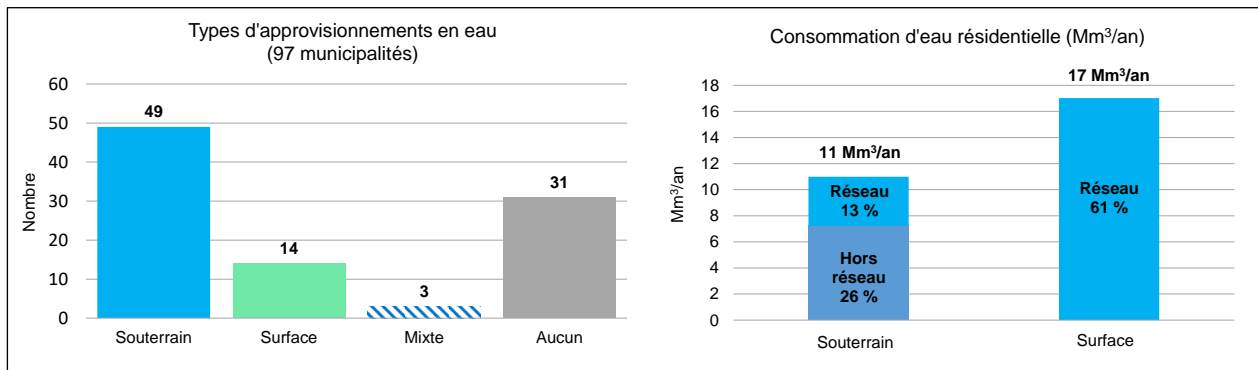


Figure 7.2 : Approvisionnement en eau en Estrie et consommation résidentielle (MAMOT et MELCC)

Tableau 7.3 : Utilisation d'eau par MRC dans la région d'étude en Estrie

MRC	Population totale	Population desservie	Superficie (km2)	Usage total (Mm³/an)	Usage eau souterraine (%)	Distribution réseau (%)	Usage agricole (%)	Usage industriel (%)	Usage résidentiel (%)
Coaticook	19 007	10 109	1 354	10.7	43.0%	8.6%	56.1%	27.6%	16.3%
Granit	22 019	12 154	2 832	6.2	66.8%	16.5%	15.6%	51.8%	32.7%
Haut-Saint-François	22 528	10 612	2 308	19.6	47.7%	4.9%	41.8%	47.4%	10.8%
Val-Saint-François	32 117	15 454	1 417	32.5	9.2%	4.1%	3.7%	87.2%	9.0%
Memphrémagog	49 219	28 701	1 449	24.7	13.3%	9.6%	0.8%	81.2%	18.0%
Sherbrooke	165 859	122 196	367	40.3	10.4%	27.7%	0.2%	62.2%	37.6%
Total	310 749	199 226	9 727	133.9	21.2%	13.2%	12.7%	66.1%	21.1%

Note : d'autres MRC sont partiellement comprises dans la région d'étude.

Le tableau 7.3 montre que l'eau souterraine représente un peu plus de 20 % 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 (56 %). L'usage agricole est aussi important dans le Val-Saint-François (42 %). Les plus grandes proportions d'usage résidentiel de l'eau sont à Sherbrooke (38 %) et dans la MRC du Granit (33 %).

7.5 Réseaux de suivi

7.5.1 Stations de jaugeage des cours d'eau

Suivant l'approche développée par Croteau et al. (2010), les débits des cours d'eau seront 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). Le tableau 7.4 présente les informations des stations de jaugeage des neuf bassins jaugés choisis pour le calage de HELP (CEHQ, 2018). Ces bassins ont été sélectionnés puisqu'ils possèdent une série de mesures suffisamment complète pour servir au calage de HELP. De plus, la période de couverture de ces stations chevauche la période de couverture des données météo sur grille disponibles. La figure 7.4 montre les périodes de couverture des stations de jaugeage et des grilles météo. La carte 5 montre les bassins versants de la région d'étude et les localisations des stations de jaugeage de débit qui ont été retenues pour le calage HELP.

Tableau 7.4 : Stations de jaugeage sélectionnées pour caler la recharge obtenue de HELP

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	Influencé mensuellement	19 février 1976 – aujourd'hui
030206	Saint-François	4136	Influencé mensuellement	10 octobre 1938 – 17 septembre 2002
030215	Coaticook	525	Influencé journallement	24 juillet 1959 – aujourd'hui
030220	Massawippi	612	Influencé mensuellement	6 août 1952 – aujourd'hui
030225	Saint-François	1219	Influencé	1 ^{er} janvier 1968 – aujourd'hui
030234	Eaton	647	Naturel	1 ^{er} avril 1954 – aujourd'hui
030278	Saint-François	1720	Influencé mensuellement	10 décembre 1977 – aujourd'hui
030282	Au Saumon	736	Naturel	27 novembre 1974 – aujourd'hui
030284	Saint-François	2938	Influencé mensuellement	20 mars 1979 – aujourd'hui

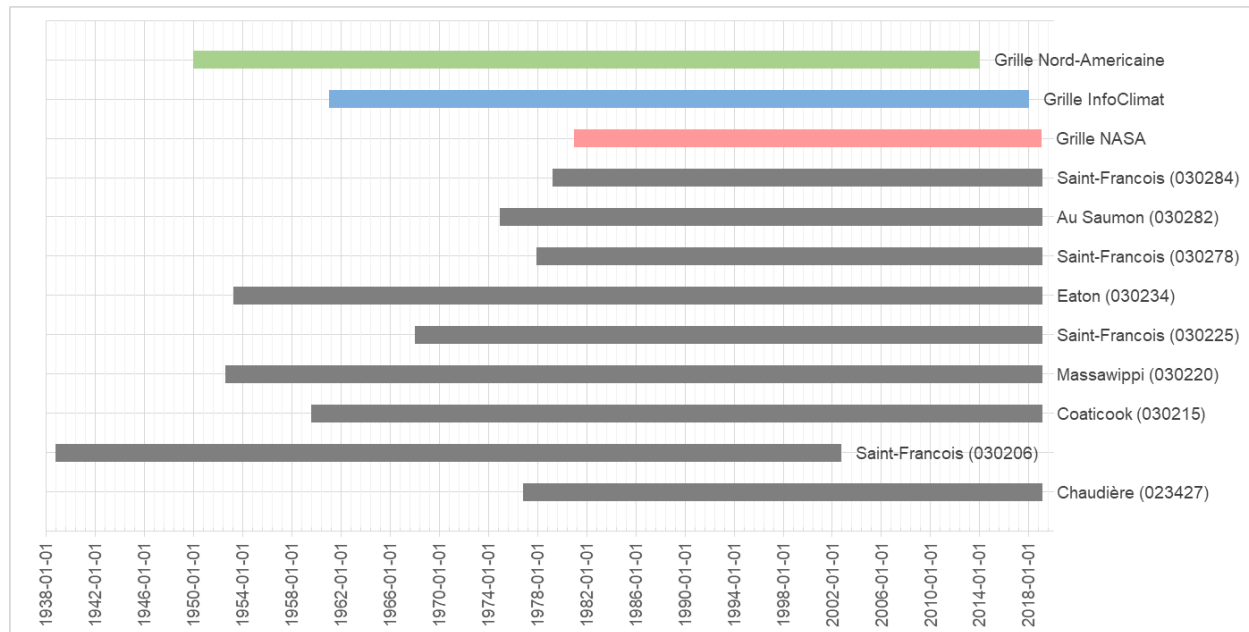


Figure 7.3 : Périodes de couverture des stations de jaugeage des cours d'eau et des grilles météo

7.5.2 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 MELCC 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 météorologiques entre les stations météo et fournissent ainsi des données plus représentatives de la distribution spatiale des conditions météorologiques.

La figure 7.4 montrée à la section précédente présente la couverture des différentes grilles météo disponibles pour la région d'étude. 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. Pour le rapport final du PACES Estrie, les normales de température et de précipitation obtenues de la grille météo vont être interpolées afin de montrer la variation des conditions météorologiques dans la région d'étude. Ces conditions, particulièrement les précipitations, ont une incidence sur la recharge.

7.5.3 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 du Memphrémagog). Trois de ces puits avaient été installés dans le cadre du PACES Montérégie Est et un dans le cadre du PACES Nicolet-Bas-Satin-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 MELCC à des localisations recommandées par l'équipe de projet. Ces travaux sont décrits à la section 9.1.

8 PROBLÉMATIQUES RÉGIONALES ET TRAVAUX SPÉCIFIQUES

8.1 Problématiques régionales

Le premier atelier RQES auquel les partenaires régionaux ont participé a permis d'identifier des problématiques régionales liées aux ressources en eau souterraine sur lesquelles les partenaires portent le plus d'intérêt. Certaines de ces problématiques seront abordées dans le cadre normal du PACES, notamment le niveau d'exploitation de l'eau souterraine (particulièrement par les grands préleveurs), la localisation des zones de recharge, la connectivité entre les eaux souterraines et les eaux de surface ainsi que la qualité de l'eau souterraine.

La problématique de la présence naturelle d'arsenic dans l'eau souterraine de la région fera toutefois l'objet d'une attention particulière pour en déterminer l'importance, la distribution spatiale et les causes. La vulnérabilité des approvisionnements municipaux fera aussi l'objet de travaux spécifiques basés sur la composition géochimique et isotopique de l'eau souterraine ainsi que d'indicateurs de son temps de résidence. Certaines problématiques exigeant des travaux spécifiques ne pourront toutefois pas être abordées directement dans le cadre du projet, mais des indications pourront être données par la caractérisation régionale de la qualité de l'eau souterraine : la contamination par les installations sceptiques et les lieux d'enfouissement ainsi que l'impact des activités agricoles et des mines. Nous allons aussi profiter de la campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine pour sensibiliser les propriétaires visités à l'entretien de leurs puits. D'autres moyens de sensibilisation seront aussi envisagés dans le cadre du projet.

8.2 Travaux spécifiques

En relation avec les problématiques régionales, plusieurs études spécifiques seront réalisées dans le cadre du PACES Estrie. Ces études spécifiques serviront aussi à la formation et feront l'objet de stages ou de projets de maîtrise. La présente section présente une brève description des études spécifiques ainsi que les travaux des étudiants reliés à ces études.

8.2.1 Qualité de l'eau souterraine et problématique de l'arsenic

Des travaux réalisés par la Direction de santé publique de l'Estrie (Boivin, 2015) ainsi que des données du MELCC sur la qualité des approvisionnements municipaux (MDDELCC, 2016) indiquent que l'arsenic est souvent présent dans l'eau souterraine en concentrations dépassant la norme de potabilité. Dans le cadre de notre évaluation de la qualité de l'eau souterraine en Estrie nous allons donc porter une attention particulière à l'arsenic afin d'en préciser la distribution spatiale et de comprendre les conditions qui contrôlent sa présence.

Avant la réalisation du programme d'échantillonnage de l'eau souterraine, Élise Colléau (2019) a réalisé son projet de fin de master 2 sur la problématique de l'arsenic dans l'eau souterraine en Estrie. Ses travaux ont montré que plusieurs sources naturelles d'arsenic étaient présentes dans les sédiments, surtout les tills, et les unités rocheuses de l'Estrie. Bien que les mécanismes responsables des fortes concentrations en arsenic dans l'eau souterraine restent à préciser, il semble qu'il y ait un certain contrôle hydrogéologique. En effet, les fortes concentrations semblent surtout présentes dans les zones d'émergence de l'eau souterraine. On trouve aussi un contrôle géologique en relation avec l'intrusif du Mont Mégantic. Les zones où l'arsenic est susceptible d'avoir de plus fortes concentrations vont faire l'objet d'un doublage de l'échantillonnage dans les mailles définies à cette fin (détails à la section 9.2). Vincent Cloutier et Raphaël Bondu ont supporté l'application au PACES Estrie de la méthode d'échantillonnage avec des filtres permettant la spéciation de l'arsenic (Bondu, 2017 ; Watts et al., 2010). Cette approche sera appliquée aux échantillons où de l'arsenic est présent dans l'eau souterraine et les analyses seront réalisées à l'INRS.

8.2.2 Potentiel aquifère dans les vallées enfouies

Nos travaux préliminaires indiquent que la transmissivité de l'aquifère rocheux régional est très limitée (section 7.1). Par contre, les travaux de Caron (2013) sur les dépôts meubles de la région suggèrent que les épaisses accumulations de sédiments dans les vallées peuvent avoir un potentiel aquifère important (sections 6.2 et 6.5). En collaboration avec l'UQAM et Olivier Caron, nous allons donc entreprendre des travaux plus détaillés pour évaluer ce potentiel aquifère. Ces travaux vont impliquer une mise à jour de la cartographie des sédiments superficiels à l'aide des données Lidar ainsi que la révision du modèle géologique 3D en se basant sur les nouveaux forages acquis dans le cadre du PACES Estrie.

Les travaux réalisés dans le cadre du stage de master 1 de Thomas Vincent (2019) au printemps et à l'été 2019 ont déjà permis d'amorcer l'évaluation du potentiel aquifère dans les vallées enfouies. Les travaux ont porté dans un premier temps sur les captages municipaux de Coaticook, La Patrie, Ville de Stanstead et Weedon (voir les coupes à l'annexe 3). Ainsi, les nouvelles données stratigraphiques des forages extraites des rapports hydrogéologiques ont d'abord été interprétées pour identifier les unités géologiques définies par Caron (2013) (section 6.2). Des coupes géologiques orientées perpendiculairement aux vallées dans lesquelles se trouvent ces approvisionnements ont été faites à l'aide du modèle géologique 3D. Les nouveaux forages ont été projetés sur les coupes avec les unités géologiques et les intervalles crépinés. Ceci a permis de vérifier si le modèle géologique 3D est cohérent avec les nouvelles données et aussi d'identifier les unités géologiques qui sont exploitées en tant qu'aquifères par ces puits municipaux. Les résultats montrent que des ajustements seront requis au modèle géologique 3D et que les sédiments quaternaires anciens sont souvent exploités par les puits municipaux. Ces travaux vont être poursuivis dans le cadre du projet de fin d'étude de Raphaël Mathis au cours de l'année universitaire 2019-2020 dans le cadre de sa formation en génie géologique à l'université Laval. En plus de permettre de mieux définir le potentiel aquifère dans les vallées de l'Estrie, ces travaux vont aider à faire l'interprétation des données géochimiques et isotopiques acquises aux puits municipaux de catégories 1 et 2 en septembre 2019 (sous-section suivante).

8.2.3 Protection des puits d'approvisionnement en eau municipaux

Une caractérisation géochimique et isotopique de l'eau captée par des puits municipaux sera réalisée afin de mieux définir le risque de contamination de l'eau captée par ces puits. Le principe est que la présence d'eaux jeunes et peu évoluées géochimiquement impliquerait une recharge à proximité du puits et ainsi un risque de contamination significatif. À l'inverse, des eaux évoluées géochimiquement et ayant eu un long temps de résidence impliquent que le risque de contamination est faible. Ces résultats vont 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 Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP). Ces travaux vont faire l'objet de la maîtrise d'Élise Colléau réalisée dans le cadre du programme bilingue entre l'Université de Rennes 1 et l'INRS. L'échantillonnage se fera en septembre 2019 et ces travaux vont être réalisés durant l'année universitaire 2019-2020. La chercheuse Virginie Vergnaud de l'Université de Rennes 1 va codiriger ces travaux et va participer à l'échantillonnage des puits municipaux pour nous faire profiter de son expertise sur l'interprétation des CFC pour estimer le temps de résidence de l'eau souterraine.

Quinze municipalités de l'Estrie ayant un approvisionnement en eau souterraine ont accepté de faire analyser l'eau produite par leurs puits d'approvisionnement pour des paramètres géochimiques et isotopiques. De ces municipalités, 9 prélèvements sont de catégorie 1, 3 prélèvements de catégorie 2 et 3 prélèvements de catégorie inconnue. L'eau échantillonnée sera 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 les proportions d'eau jeunes (moins de 50 ans) et plus anciennes (section 9.2). Ces travaux sur les approvisionnements municipaux devraient nous permettre d'avoir une meilleure implication des municipalités dans le projet que lors des projets PACES antérieurs, tout en facilitant l'accès aux données sur les puits municipaux qui sont nécessaires pour bien évaluer le potentiel aquifère de la région d'étude (section 8.2.2).

8.2.4 Gouvernance des ressources régionales en eau souterraine

Des travaux spécifiques vont aussi être réalisés en relation avec notre troisième objectif spécifique qui est d'assurer le transfert des connaissances aux partenaires régionaux et de faciliter l'utilisation des résultats du PACES Estrie. Ainsi, une maîtrise sera réalisée sous la direction de la professeure Roxane Lavoie à l'Université Laval en collaboration avec le COGESAF dans le but d'intégrer les résultats du PACES Estrie dans le *Plan directeur de l'eau* (PDE) du COGESAF avant la fin du PACES Estrie. Le recrutement d'une étudiante a été fait mais certaines formalités restent à compléter pour lui permettre de débiter ses travaux en janvier 2020. Ses travaux devraient être complétés à la fin de 2021.

Ces travaux vont profiter aussi des activités de transfert de connaissances réalisées par le RQES dans le cadre de la réalisation du PACES Estrie. Ces travaux vont aussi bénéficier des développements en cours sur les indicateurs de gestion durable des ressources en eau souterraine et particulièrement sur les indicateurs de stress hydrique qui sont supportés par le MDDELCC. Sarah Lahrarti va amorcer une maîtrise sur les indicateurs de stress hydrique à l'automne 2019 dans le cadre du programme bidiplômant entre l'ISHEDD au Maroc et l'INRS. Les travaux vont être réalisés durant l'année universitaire 2019-2020.

Les travaux sur la gouvernance des ressources en eau souterraine vont aussi profiter des résultats prévus de l'estimation de la recharge avec HELP en utilisant les outils récemment développés à l'INRS pour faciliter l'usage de HELP à l'échelle régionale (Raynauld et al., 2018 ; Gosselin et al., 2019). Ainsi, nous espérons qu'en plus d'estimer la recharge pour les conditions météorologiques historiques il sera aussi possible de le faire pour les conditions futures sur la base des simulations climatiques. La gouvernance de la ressource pourrait ainsi être basée non seulement sur les conditions présentes mais aussi sur leur évolution prévisible en fonction des changements climatiques et de l'évolution présumée des besoins en eau futurs.

9 PROGRAMME DE CARACTÉRISATION DE LA PHASE 2

La présente section décrit la planification du programme de caractérisation hydrogéologique qui sera réalisé à l'été et à l'automne 2019. Les sous-sections suivantes décrivent plus en détail la sélection préliminaire des sites recommandés pour l'implantation de nouveaux puits d'observation du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) par le MELCC ainsi que le plan d'échantillonnage de l'eau souterraine.

9.1 Forage de puits pour le RSESQ (MELCC)

Tel que souligné à la section 7.5.3, seulement 5 puits du RSESQ étaient présents dans la partie de la région d'étude non couverte par un projet PACES antérieur. Dans le cadre du PACES Estrie, l'INRS a recommandé au MELCC l'emplacement de 10 nouveaux puits d'observation du RSESQ pour compléter la couverture de la région d'étude. Dans le rapport intérimaire, 10 cibles de forage pour l'implantation de puits d'observation étaient proposées. Pour chacune des cibles, plusieurs emplacements ont été considérés. L'annexe 4 présente la compilation des informations recueillies pour chaque site considéré lors du processus de sélection. À la suite de l'évaluation des emplacements, de discussion avec les municipalités et de visite sur le terrain, 10 sites de forages ont été retenus. Tous les sites retenus sont situés sur des terrains municipaux afin de favoriser l'accessibilité à long terme des puits d'observation. La carte 13 indique la position des 10 cibles de forage retenues.

La description des sites de forage ainsi que la raison de leur sélection sont résumées au tableau 9.1. L'épaisseur moyenne des dépôts meubles sur chaque site est indiquée dans le tableau 9.2 afin de faciliter l'estimation des coûts de forage. Sur chacun des 10 sites sélectionnés, les forages projetés seront implantés en respectant un certain nombre de critères. Tout d'abord, afin que les niveaux d'eau enregistrés ne soient pas influencés par des opérations de pompage, une distance de séparation supérieure à 1 km avec les puits municipaux et supérieure à 100 m avec les puits résidentiels a été considérée. De plus, les secteurs trop anthropisés ont été évités, au contraire des zones boisées puis agricoles qui ont été priorisées. Enfin, l'accessibilité des sites et donc des parcelles a également été étudiée par photo aérienne et à partir de prises de vue depuis la rue afin de faciliter l'accès à la machine de forage.

Tableau 9.1 : Description des sites proposés pour l'implantation de puits du RSESQ

Site	Enjeu	Description de l'enjeu	MRC	Municipalité
PO-01	Double	Quantité d'eau, recharge et qualité d'eau	Memphrémagog	Canton de Stanstead
PO-02	Qualité	Esker, recharge et qualité d'eau	Coaticook	Coaticook
PO-03	Qualité	Zone d'émergence en aval d'un secteur agricole	Coaticook	Compton
PO-04	Quantité	Quantité d'eau et recharge	Memphrémagog	Magog
PO-05	Quantité	Usage important de l'eau souterraine par les municipalités	Le Granit	Nantes
	Recharge	Ligne de partage des eaux souterraines - Haut topographique		
PO-06	Quantité	Forte densité de puits résidentiels - Nouveau développement résidentiel	Le Granit	Notre-Dame-des-Bois
	Qualité	Au droit de l'une des coupes géochimiques		
PO-07	Qualité Recharge	Au droit d'un secteur agricole important Haut topographique	Sherbrooke	Sherbrooke
PO-08	Quantité	Quantité, recharge et stratigraphie	Le Granit	Stornoway
PO-09	Qualité	Au droit d'un secteur agricole important	Le Val-Saint-François	Val-Joli
	Recharge	Haut topographique et stratigraphie		
PO-10	Recharge	Haut topographique	Le Haut-Saint-François	Weedon

Tableau 9.2 : Caractéristiques et coûts projetés des forages du RSESQ proposés

Site	Altitude m	Distance au puits le plus proche		Épaisseur de dépôts meubles m	Profondeur probable du forage* m	Coût prévisionnel \$
		Puits municipal m	Puits résidentiel m			
1	395	7 514	1 093	4	19	3 750
2	520	2 203	1 080	3	18	3 750
3	420	2 450	654	13	28	3 788
4	385	2 951	512	26	41	4 743
5	202	5 099	336	21	36	4 378
6	297	8 137	615	1	16	3 750
7	281	5 145	311	3	18	3 750
8	253	5 236	386	4	19	3 750
9	237	8 596	850	9	24	3 485
10	607	4 251	544	1	16	3 750
SOMME					234	38 894

* La profondeur probable du forage projeté tient compte d'une pénétration de 15 m dans le roc.

Le MELCC va faire la supervision des forages et de l'installation des puits et mettre des capteurs de pression dans les 10 puits d'observation. L'acquisition et l'enregistrement de mesures se feront à une fréquence de 15 minutes afin de capter les fluctuations de la nappe dues aux changements de pression (dans le cas d'une nappe captive) ou à l'infiltration des précipitations (pour une nappe libre). La collecte de données à long terme permettra d'estimer l'impact des changements climatiques ou d'activités anthropogéniques sur les taux de recharge. Puisque ces puits d'observation seront intégrés au RSESQ, les capteurs de pression seront maintenus en place après la fin du projet PACES Estrie.

9.2 Caractérisation géochimique

Les travaux d'échantillonnage d'eau souterraine seront réalisés de juillet à août 2019 pour les puits résidentiels et durant une semaine en septembre 2019 pour les puits municipaux. La campagne de terrain permettra le prélèvement d'échantillons par le biais de puits d'alimentation en eau potable privés (résidentiels et agricoles principalement), de puits d'observation du RSESQ (déjà en places ou aménagés dans le cadre du présent projet) et de puits municipaux.

Dans le but de sélectionner les puits à échantillonner lors du programme de caractérisation, la zone d'échantillonnage du PACES Estrie a été divisée selon une grille avec un maillage de 7 km par 7 km. Cette zone d'échantillonnage couvre seulement la portion du territoire qui n'a pas encore été couverte par les projets PACES. À part 10 % de blancs (de terrain et de transport) et de duplicatas, il est prévu d'échantillonner environ 151 puits résidentiels. L'échantillonnage a été doublé dans quelques mailles où il était susceptible que les concentrations en arsenic soient plus élevées. De plus, 14 puits du RSESQ feront l'objet d'un échantillonnage à l'aide d'une pompe Rediflo. Enfin, 15 puits municipaux vont être échantillonnés. Le rapport de la Phase 2 va documenter ces travaux et leurs résultats. Pour l'échantillonnage de puits privés, deux équipes de deux personnes travailleront au prélèvement des échantillons. Une troisième équipe sera dédiée à l'échantillonnage des puits du RSESQ durant une semaine. Deux équipes seront à nouveau dédiées à l'échantillonnage des puits municipaux en septembre.

L'échantillonnage sera réalisé conformément au protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine élaboré par le GRIES dans le cadre des projets du PACES. Lors de l'échantillonnage, certains paramètres seront mesurés *in situ* à l'aide d'une sonde multi-paramètres de marque Hanna, notamment la température,

le pH, la conductivité électrique, les solides totaux dissous ainsi que l'oxygène dissous. Les échantillons prélevés seront ensuite analysés pour les paramètres suivants :

- Anions (alcalinité, bromures, chlorures, fluorures, nitrites, nitrates, sulfates)
- Nutriments (azote ammoniacal, phosphore total inorganique)
- Métaux (Al, Li, Sb, Mg, Ag, Mn, As, Mo, Ba, Ni, Be, K, Bi, Pb, B, Se, Ca, Si, Cd, Na, Cr, Sr, Co, Ti, Cu, U, Sn, V, Fe, Zn)
- Sulfures totaux
- Azote total, carbone inorganique dissous
- Spéciation de l'arsenic lorsque détecté dans les analyses globales

Des échantillons seront sélectionnés pour des analyses isotopiques de façon à assurer une bonne couverture spatiale et pour que tous les types d'eau soient caractérisés. Les analyses isotopiques suivantes sont prévues aux laboratoires indiqués :

- Tritium (indicateur de temps de résidence des eaux jeunes) : 40 puits résidentiels et 15 puits municipaux [André E. Lalonde AMS Laboratory, Université d'Ottawa] ;
- ^{14}C et ^{13}C (respectivement indicateur de temps de résidence des eaux anciennes et indicateur des processus affectant le carbone) : 40 puits résidentiels et 15 puits municipaux [Environmental Isotope Laboratory, Université de Waterloo] ;
- Isotopes stables de l'eau (^{18}O et ^2H) (indicateur des processus de recharge et de l'origine de l'eau) : 60 puits résidentiels et 15 puits municipaux [Environmental Isotope Laboratory, Université de Waterloo] ;
- Isotopes de l'hélium et du néon (permet la datation avec la méthode tritium-hélium pour les eaux jeunes) : 12 puits résidentiels et 15 puits municipaux [André E. Lalonde AMS Laboratory, Université d'Ottawa] ;
- CFC, SF6 et gaz nobles (datation des eaux jeunes et proportion d'eau jeune) : 12 puits résidentiels et 15 puits municipaux [Observatoire des sciences de l'univers de Rennes, Université de Rennes 1].

10 BIBLIOGRAPHIE

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, UQAT. 154 p.

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. Géologie des formations superficielles du bassin versant de la Rivière Chaudière, Québec, Université du Québec à Montréal, 21E06, 21E07, 21E09, 21E10, 21E11, 21E14, 21E15, 21E16, 21L01, 21L02, 21L03, 21L06, 21L07, 21L08, 21L09, 21L10, 21L11, 1 : 100 000, 3 cartes, 3p.

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., Blouin, M., Gloaguen, E., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Bleser, J., Martin, A., 2013. Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska, l'IRDA et Géomont, Rapport final INRS, soumis au MDDEFP et aux partenaires régionaux du projet en mars 2013.

CEHQ (Centre d'expertise hydrique du Québec), 2018. Bassins versants des stations hydrométriques. Shapefile.

Choinière, J., Leduc, M., 1990. Géochimie des sédiments de ruisseaux – Région de l'Estrie-Beauce. Ministère de l'Énergie et des Ressources, MB 89-42, 8 p. et cartes.

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.

Croteau, A., Nastev, M., Lefebvre, R., 2010. Groundwater recharge assessment in the Chateauguay River watershed. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 451-468.

Delmotte, S., 2017. Projet RADEAU – Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique. Présentation au Symposium d'Ouranos, 15 novembre 2017.

De Souza, S., 2012. Évolution tectonostratigraphique du domaine océanique des Appalaches du sud du Québec dans son contexte péri-laurentien. Thèse doctorale, UQAM, janvier 2012, 191 p.

Dubé-Loubert, H., Parent, M. et Brazeau, A., 2013. Cartographie des dépôts de surface du bassin versant contigu des rivières Yamaska, Richelieu et de la baie Missisquoi. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources Naturelles (MRN), Bureau de l'exploration géologique du Québec, échelle 1/50 000.

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.

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.

Gosselin, J.-S., Raynauld, M., Huchet, F., Lefebvre, R., 2019. PyHELP: an open source Python library to estimate spatially distributed groundwater recharge with the HELP infiltration model. Québec 2019, GAC-MAC-AIH/CNC Joint Meeting, May 12-15, 2019, Quebec City, Canada.

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., 2018. Pharmaceuticals and pesticides in rural community drinking waters of Quebec, Canada – A regional study on the susceptibility to source contamination. Manuscrit d'un article soumis au *Water Quality Research Journal*.

Institut de la statistique, 2018. 05 - L'Estrie ainsi que ses municipalités régionales de comté (MRC). http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/profils/region_05/region_05_00.htm [accédé en novembre 2018].

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 2018a. Comté de Bagot, Feuillet 31H09101. Échelle de numérisation 1/20 000, Échelle originale 1/63 360, 1959.

IRDA, 2018b. Comté de Drummond, Feuillet 31H09201, 31H09202, 31H16102. 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. 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. 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. 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. 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. Échelle de numérisation 1/20 000, Année de numérisation 2000, Échelle originale 1/50 000, 1998.

Kokalj, Žiga, Klemen Zakšek and Krištof Oštir. 2013. Visualizations of Lidar Derived Relief Models. In *Interpreting Archaeological Topography – Airborne Laser Scanning, Aerial Photographs and Ground Observation*, edited by Rachel Opitz and C. David Cowley, 100–114. Oxford: Oxbow Books.

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.

Larocque, M., Gagné, S., Barnetche, D., Meyzonnat, G, Graveline, M. H. et 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. 258 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 de doctorat, INRS, Mai 2018.

Lefebvre, R., 2018. The southern Quebec water resources synthesis project (PSyRESQ). Présentation invitée, *Workshop on surface-ground water modeling for the Great Lakes basin*, International Joint Commission - Canada and United States, April 4-5, 2018, NOAA Great Lakes Environmental Research Laboratory, Ann Arbor, MI, USA.

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.

MAMOT (Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire), 2018. Portrait provincial en aménagement du territoire (PPAT), mise à jour d'avril 2018.

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.

MDDELCC (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques), 2016. *Bilan de la qualité de l'eau potable au Québec 2010-2014*. 80 pages. [En ligne] <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/> [accédé le 25/10/2018].

MDDELCC, 2016. Utilisation du territoire en 2016. Version 1.4.

MDDELCC, 2017. Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec (Échelles 1/20 000 et 1/50 000). Version 1.3, mise à jour juin 2017.

MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques), 2018a. Couverture territoriale de la connaissance sur les eaux souterraines. [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/carte-projets.pdf> [accédé en octobre 2018].

MELCC, 2018b. Données des prélèvements d'eau municipaux de catégorie 1 à 3. Fichier Excel.

- MELCC, 2018c. Données d'installations municipales de distribution d'eau potable. Fichier Excel.
- MELCC, 2018d. Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm> [accédé le 7 novembre 2018].
- MELCC, 2018e. Système d'information hydrogéologique (SIH). Version mise à jour en mars 2018.
- MELCC, 2018f. Zones de gestion intégrée des ressources en eau par bassins versants. Shapefile. Version mise à jour le 14 novembre 2018.
- MERN (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles), 2014. Symboles et abréviations de la carte géoscientifique. Rapport DV 2014-06.
- MERN, 2017. Système sur les découpages administratifs (SDA) à l'échelle de 1/20 000. Version mise à jour en juin 2017.
- MERN, 2018a. Carte écoforestière avec perturbations, Cartographie du 5^e inventaire écoforestier du Québec méridional, juin 2018.
- MERN, 2018b. Géologie du Quaternaire. SIGÉOM.
- MERN, 2018c. Géologie du roc et linéaments. SIGÉOM.
- MERN, 2018d. Modèles numériques de terrain hydro cohérents à l'échelle régionale (MNT).
- MRN (Ministère des Ressources naturelles), 2006. Base de données topographique du Québec (BDTQ) à l'échelle 1 / 20 000. Version mise à jour en juillet 2006.
- MRNF, 2008. Base de données géographique et administratives à l'échelle 1 / 1 000 000 (BDGA 1M). Mai 2008.
- 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, Thomas J., Keith C. Clarke, and William A. McBride. "An Improved Simple Morphological Filter for the Terrain Classification of Airborne LIDAR Data." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 77 (2013): 21–30.
- QUÉBEC, 2001. *Règlement sur la qualité de l'eau potable (RLRQ, chapitre Q-2, r. 40)*, à jour au 1^{er} août 2018, Éditeur officiel du Québec, 2001. [En ligne]. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2040> (Accédé en novembre 2018).
- QUÉBEC, 2014. *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RLRQ, chapitre Q-2, r. 35.2)*, à jour au 1^{er} août 2018, Éditeur officiel du Québec, 2014. [En ligne]. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2035.2> (Accédé en novembre 2018).
- 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 pages et 5 annexes.

Santé Canada, 2019. 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.

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.

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.

Vincent, T., 2019. Évaluation du potentiel aquifère des vallées enfouies de l'Estrie à l'aide d'un modèle géologique 3D. Rapport de stage de fin de Master 1 Sciences de l'eau, Université de Rennes 1, juin 2019.

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), 4 79- 490.

Annexe 1 :

Cartes thématiques préliminaires

Annexe présentée sous forme électronique.

Liste des livrables présentés sous forme de carte, le numéro de la carte correspond au numéro du livrable² :

- Livrable no.1 : Topographie
- Livrable no.2 : Routes, limites administratives et toponymie
- Livrable no.3 : Modèle altimétrique numériques (MAN)
- Livrable no.4 : Hydrographie
- Livrable no.5 : Limites de bassins et de sous-bassins
- Livrable no.6 : Occupation du sol
- Livrable no.7 : Couverture végétale
- Livrable no.8 : Milieux humides
- Livrable no.9 : Affectation du territoire
- Livrable no.10 : Pédologie
- Livrable no.11A : Géologie du Quaternaire
- Livrable no.11B : Épaisseur totale des formations superficielles
- Livrable no.11C : Confinement de l'aquifère rocheux régional
- Livrable no.12 : Géologie du roc
- Livrable no.13 : Piézométrie et emplacement des points de suivi de nappe
- Livrable no.15A : Géochimie de l'eau souterraine – Critère esthétiques
- Livrable no.15B : Géochimie de l'eau souterraine – Critère pour la santé
- Livrable no.16 : Utilisation de l'eau souterraine et de l'eau de surface

² À noter que le Livrable PACES Phase 1 no.14 n'est pas présenté sous forme de carte

Annexe 2 :

Détails de l'estimation des propriétés hydrauliques

L'essai de capacité spécifique est assimilable à un essai de pompage réalisé à un débit constant (ex. $Q = 6$ gallons US par minute ≈ 22.7 L/min) sur une courte durée (ex. $t_f = 1$ h) durant lequel le niveau dynamique de l'eau (z_{dyn}) n'est suivi que dans le puits pompé. Toutefois, à la différence des essais de pompage conventionnels, seul le niveau dynamique final est rapporté dans le cas des essais de capacité spécifique. En considérant conjointement le niveau statique de l'eau dans le puits mesuré juste avant l'essai (z_{stat}), on calcule le rabattement final dans le puits pompé ($s_{w,f}$) tout simplement par $s_{w,f} = z_{dyn} - z_{stat}$. L'autre paramètre nécessaire à la documentation de l'essai est le rayon du puits pompé (ex. $r_w = 3$ pouces ≈ 7.62 cm). Des informations sur la profondeur du puits par rapport au toit du roc (d_w), sur la localisation du puits (X, Y) et sur l'emmagasinement local estimé de l'aquifère (S) sont aussi requises pour mener à bien l'exercice de caractérisation hydraulique. Les coordonnées X, Y sont typiquement utilisées afin d'assigner au puits le nom de la « zone » (c'est-à-dire la subdivision du territoire à l'étude basée par exemple sur la géologie) dans laquelle il se situe. En somme, les données d'un essai de capacité spécifique incluent : le débit pompé (Q), le rabattement final et les niveaux statique et dynamique ($s_{w,f} = z_{dyn} - z_{stat}$), la durée de l'essai (t_f), le rayon du puits pompé (r_w), une estimation grossière de l'emmagasinement (S), la profondeur du puits dans le roc (d_w) et, enfin, sa localisation géographique (X, Y, zone).

L'estimation de la transmissivité à partir des données d'un essai de capacité spécifique, notée T(CS), est faite en suivant la méthodologie décrite dans le chapitre 6 de la thèse de doctorat de Marc Laurencelle (2018). La méthode s'exécute essai par essai et consiste, en un premier temps, à trouver par optimisation la T qui satisfait l'équation 13 de la thèse qui relie entre eux les cinq principaux paramètres de l'essai ($s_{w,f}$, Q , t_f , r_w , S). Les estimations de T(CS) ainsi obtenues sont dites brutes puisqu'elles ne renseignent pas sur leur fiabilité. Ensuite, la fiabilité de l'estimation est évaluée en réalisant une analyse d'incertitude propre aux paramètres de l'essai. Les résultats de l'analyse d'incertitude permettent alors de déterminer l'intervalle de valeurs de $\log T$ à l'intérieur duquel la transmissivité estimée peut être considérée quantitativement fiable. À titre d'exemple, si l'intervalle de fiabilité quantitative va de -6.0 à -3.5 et que le logarithme de la T estimée est de -7.2, on dira donc de l'estimation de T qu'elle n'est ici pas quantitativement fiable, tout en observant que le \log de la T réelle est fort probablement inférieur à -6.0. Trois classes de similitude qualitative ('<' ou '≈' ou '>') sont ainsi définies, selon la position du \log de la T estimée par rapport aux bornes de l'intervalle de fiabilité quantitative. Une fois cette méthode appliquée à l'ensemble du jeu de données, les indications sur la T peuvent être résumées sous la forme de graphiques ou d'autres statistiques.

Ensuite, la méthodologie décrite dans le chapitre 7 de la thèse de doctorat de Marc Laurencelle (2018) est appliquée afin d'estimer la variabilité verticale de la conductivité équivalente du roc fracturé, $K_b(z)$, à l'intérieur de chacun des grands contextes géologiques de la zone d'étude. En Estrie, quatre zones sont ainsi définies, du nord-ouest vers le sud-est, en commençant par les domaines appalachiens externe (en dehors de la zone cartographiée du PACES Estrie) et interne (Zone de Humber) puis océanique (Zone de Dunnage), pour terminer par les terrains siluro-dévonien de la Ceinture de Gaspé (carte 8). La méthode utilisée repose sur la simulation Monte Carlo de milieux fracturés puis de forages à travers ceux-ci afin de reproduire au mieux le jeu de données de puits (indications sur la T aux puits et la profondeur des puits dans le roc) observé. Cette nouvelle méthode présente l'avantage clé qu'elle tient compte à la fois de la fiabilité limitée des estimations de T(CS) et de l'important biais d'échantillonnage lié aux pratiques optimisatrices des puisatiers, un biais qui complexifie l'utilisation des données de puits (T et d_w). La nouvelle méthode vient reproduire le jeu de données biaisé, réglant ainsi ce problème. Une fois le modèle Monte Carlo suffisamment bien calé aux observations, les milieux fracturés qu'il a simulés sont analysés pour en extraire des statistiques sur la conductivité équivalente du roc (K_b), répondant finalement à l'objectif clé de cet exercice de caractérisation hydraulique du roc. Par ailleurs, les résultats simulés par le modèle Monte Carlo peuvent aussi être valorisés sous la forme de statistiques sur la T réelle à laquelle on peut s'attendre si l'on fore dans le roc jusqu'à une profondeur donnée.

Jeu de données d'entrée pour l'Estric

Pour les fins de 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. En effet, plus de la moitié des essais rapportés dans le SIH pour la zone d'étude avaient au moins un paramètre non renseigné ou non valide, par exemple un rabattement négatif ou nul ($s_{w,f} \leq 0$ m), et ont donc dû être exclus. À titre informatif, les champs les plus fréquemment incomplets dans le jeu de données avant filtrage étaient le niveau dynamique (9 332 : 30 %) et le niveau statique (6 732 : 22 %), sans lesquels il est bien évidemment impossible d'estimer la T(CS) puisque ces deux variables sont requises pour calculer le rabattement final ($s_{w,f}$) et la capacité spécifique en tant que tel ($Q / s_{w,f}$). Le tableau A2.1 dresse un portrait du jeu de données d'entrée après filtrage.

Tableau A2.1 : Portrait statistique du jeu de données hydrauliques d'entrée après filtrage

Paramètre	Étendue des valeurs rapportées	Valeur ou intervalle de valeurs le plus fréquent	Valeurs valides perdues par filtrage
Q	$1.7 \times 10^{-7} - 1.6 \times 10^{-2}$ m ³ /s	3.78×10^{-4} m ³ /s	11 738
	$1.0 \times 10^{-2} - 910$ L/min	22.7 L/min	
	$2.6 \times 10^{-3} - 240$ US gal/min	6 US gal/min (8 %)	
s_{w,f}	0.06 – 217 m	[30, 40] m (18 %)	2 196
t_f	360 – 2.7×10^6 s	3 600 s	10 825
	0.1 h – 31 j	1 h (80 %)	
r_w	$1.3 \times 10^{-2} - 2.6 \times 10^{-1}$ m	7.6×10^{-2} m	12 089
	0.5 – 10.4 po	3 po	
d_w	0.0 – 222.5 m	[20, 40] m (34 %)	11 245

Le tableau A2.1 montre essentiellement que 1) les données brutes s'étendent sur de très larges gammes de valeurs incluant des valeurs extrêmes peu réalistes et que 2) le filtrage des rangées incomplètes du jeu de données de départ implique l'exclusion de plusieurs milliers de données valides ; une perte d'informations malheureusement inévitable en préparation à l'estimation de T(CS).

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-vidage du puits pompé durant l'essai. En effet, en comparant le rabattement final ($s_{w,f}$) à la hauteur d'eau initialement disponible dans le puits au-dessus de la pompe ($s_{w,a} \approx Z_{\text{fond}} - Z_{\text{stat}}$), on constate que le rapport $s_{w,f}/s_{w,a}$ est supérieur à 0.9 ou même 1.0 pour plus de 80 % des essais (tableau A2.2). Cela fournit une première indication comme quoi le roc fracturé est généralement peu productif dans la région, et peut-être aussi que les puisatiers utilisent (ou rapportent) des débits souvent trop élevés par rapport à la perméabilité du roc, lorsqu'ils effectuent leurs essais de capacité spécifique. De plus, il est important de souligner que même si ces données d'essais sont loin d'être idéales, elles doivent être conservées puisqu'elles permettent malgré tout d'obtenir, dans la majorité des cas, une indication qualitative sur la T réelle ('<' ou '>').

Tableau A2.2 : Rapport entre le rabattement final et le rabattement disponible informant sur le degré de vidage des puits à la fin des essais de capacité spécifique

$s_{w,f}/s_{w,a}$	Nombre d'essais	Part (%)
< 0.0	1	-
0.0 – 0.5	1 181	6.7
0.5 – 0.9	2 132	12.1
0.9 – 1.0	10 382	58.9
> 1.0	3 908	22.2

Résultats préliminaires de la caractérisation hydraulique

L'estimation de la T(CS), mais surtout les indications sur la T réelle obtenues par l'application de la méthode décrite plus haut, ont permis d'obtenir les résultats suivants en termes de T. Dans la figure A2.1a, les indications sur la T réelle sont exprimées en valeurs log-transformées ($\log T^*$) et par classe de similitude qualitative ('<' ou '≈' ou '>'). Dans le deuxième graphique (figure A2.1b), les indications sont comptées par intervalle de profondeur des puits dans le roc plutôt que par intervalle de $\log T^*$. Le graphique 'a' met en évidence la plage étroite et la faible proportion des indications quantitativement fiables ('≈', en vert) et le graphique 'b' révèle que cette proportion diminue rapidement avec la profondeur des puits dans le roc. La grande majorité des indications renseignent seulement que la T réelle est fort probablement inférieure à la valeur indiquée ('<'), avec 14 514 (82.4 %) indications qualitatives de type '<' et 55 (0.3 %) de type '>', contre à peine 3 035 (17.2 %) indications quantitatives de type '≈'. Plus de 6 000 puits (soit un tiers des puits-essais du jeu de données) auraient ainsi une T^* réelle inférieure à $10^{-5.5}$ m²/s, ce qui suggère déjà un roc fracturé assez peu productif en général. En raison de l'importante part d'indications non quantitatives, la proposition de distributions statistiques complètes plausibles pour décrire la variabilité de la transmissivité réelle ($\log T^*$) par intervalle régulier de profondeur (d_w) ne pourra se faire qu'après la phase de calage du modèle Monte Carlo utilisé pour estimer la variabilité verticale de la K du roc fracturé, $K_b(z)$. C'est pourquoi les distributions de $\log T^*$ ne sont présentées que plus loin, dans la figure A2.2.

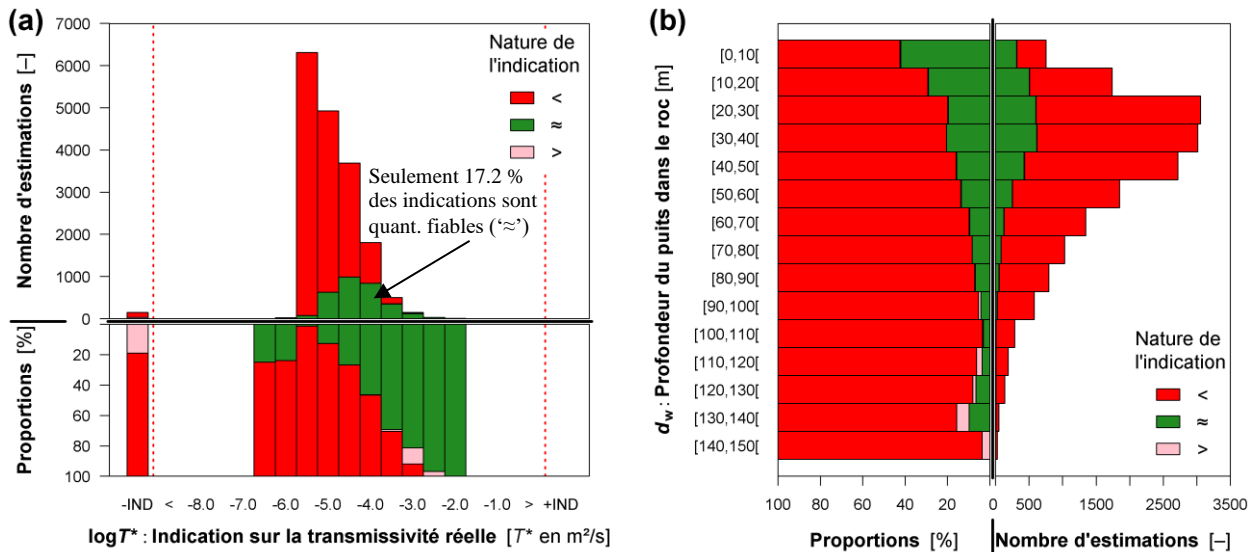


Figure A2.1 : Indications sur la transmissivité réelle aux puits ($\log T^*$) obtenues par l'exploitation du jeu de données hydrauliques du PACES Estrie. Certaines indications sont qualitatives ('<', '>') tandis que d'autres apportent une estimation quantitativement fiable du $\log T^*$ ('≈')

Enfin, les résultats des simulations Monte Carlo sont exploités afin d'en tirer des informations sur la productivité probable de l'aquifère rocheux aux puits. Ces informations sont présentées dans la figure A2.2 ci-après. Cette figure A2.2 montre des statistiques sur la transmissivité (T^*) et la productivité (Q) auxquelles on peut s'attendre en forant un puits à une profondeur de 30 m dans le roc. La transmissivité attendue correspond directement aux valeurs de T simulées par le modèle Monte Carlo, tandis que la productivité correspond à un débit constant et « durable » déterminé par la solution de Thiem en considérant un rabattement maximal de 10 m sous le toit du roc, un rapport de distances $R/r_w = 10\,000$ et les valeurs de T issues de la simulation Monte Carlo. Les distributions statistiques sont évaluées pour chacune des quatre zones géologiques de la région d'étude.

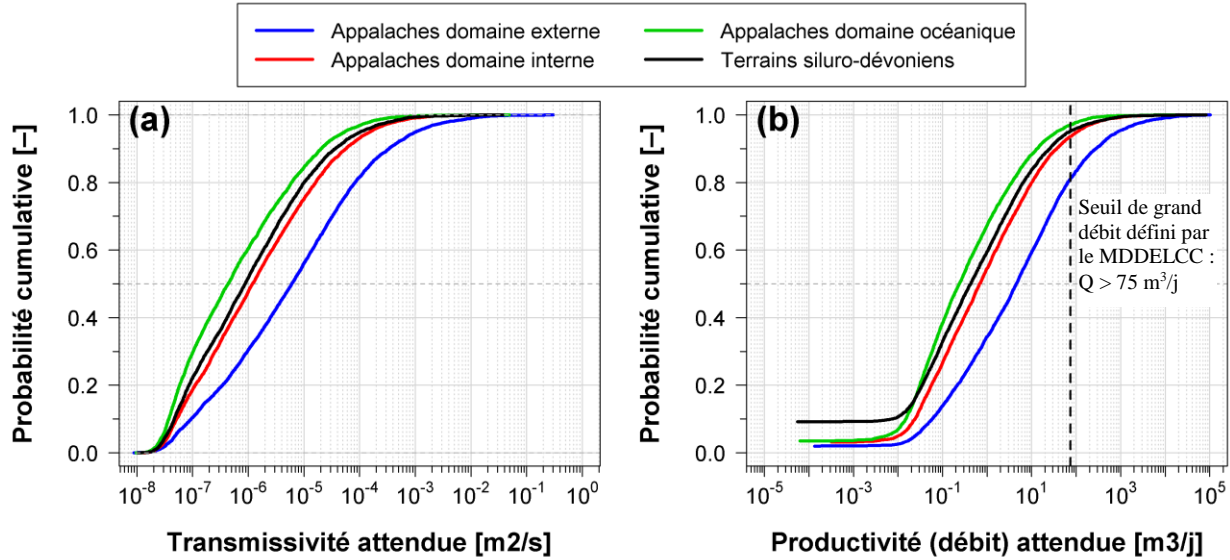


Figure A2.2 : Informations sur la productivité de l'aquifère rocheux régional dérivées des résultats des simulations Monte Carlo, préparées ici spécifiquement pour des puits forés à 30 m dans le roc fracturé.

- (a) Distributions cumulatives de la transmissivité réelle (T^* , en m^2/s) attendues dans chaque zone.
 (b) Distributions cumulatives du débit de production maximal auxquelles on peut s'attendre en acceptant un dénuyage des 10 m supérieurs de l'aquifère rocheux, dans chacune des zones géologiques. La ligne pointillée horizontale à $P = 0.5$ aide à repérer les valeurs médianes, tandis que la ligne pointillée verticale dans le graphique 'b' indique le seuil de $75 m^3/j$ défini par le MDDELCC pour distinguer les grands préleveurs d'eau souterraine

La figure A2.2 confirme que la productivité moyenne de l'aquifère rocheux régional est faible. En effet, la T^* serait inférieure à $10^{-6} m^2/s$ dans 50 % des puits pour trois des quatre zones géologiques, les valeurs médianes de T^* n'étant plus élevées que pour la première zone ('domaine externe') avec 50 % de chance d'obtenir une $T^* > 6 \times 10^{-6} m^2/s$ (en fait il s'agit de la seule zone qui n'est pas incluse dans le territoire, mais seulement dans la zone tampon). En termes de débits, la figure A2.2b révèle qu'il est plutôt rare d'obtenir une productivité excédant $75 m^3/j$ dans la région, avec des probabilités d'environ 20 % pour le 'domaine externe' et inférieures à 10 % pour les trois autres zones géologiques. De façon générale, la zone offrant la plus faible productivité semble être le 'domaine océanique' appalachien.

Annexe 3 : **Coupes géologiques dans les sédiments superficiels**

Annexe présentée sous forme électronique.

Annexe 4 : **Sommaire des cibles de forage pour les puits du RSESQ**

Annexe présentée sous forme électronique.

