

Étude GENV33 – Analyse approfondie des résultats du Programme d’acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES)

**Document produit dans le cadre de l’évaluation
environnementale stratégique globale**

Juin 2014

Direction générale des évaluations environnementales et stratégiques

Contenu

Résumé	3
Introduction	5
<i>Objectifs des deux ÉES en cours</i>	5
Notions sur les aquifères I.....	6
Le programme PACES	6
Méthodologie des projets PACES	8
Notions de vulnérabilité des aquifères.....	8
Analyse des constats des projets	9
<i>Nature de l'aquifère régional pour le territoire d'intérêt</i>	9
Notions sur les aquifères II.....	9
<i>Vulnérabilité de l'aquifère régional (aux activités industrielles en surface)</i>	10
<i>Qualité de l'eau</i>	11
<i>Autres retombées des projets PACES</i>	12
Développement de méthodologies.....	12
Réseau de suivi des eaux souterraines (niveaux et qualité)	12
Base de données sur la qualité de l'eau souterraine.....	13
Amélioration du niveau de connaissance générale sur l'eau souterraine.....	13
Poursuite du programme.....	13
Conclusion	14

Annexe 1 : Liste des livrables des projets PACES

Annexe 2 : Information sur la méthode DRASTIC (pour établir la vulnérabilité)

Annexe 3 : Constats des projets PACES couvrant le territoire susceptible de contenir du gaz de schiste

<i>Constats du PACES Montérégie-Est</i>	5
<i>Constats pour la section du projet Mauricie recouvrant le shale d'Utica</i>	8
<i>Constats du PACES Nicolet–Saint-François</i>	8
<i>Constats du PACES Bécancour</i>	9
<i>Constats du PACES Chaudière-Appalaches</i>	12
<i>Constats du PACES Communauté métropolitaine de Québec</i>	14

Résumé

Les treize rapports préparés dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) ont grandement amélioré la connaissance générale et publique sur les eaux souterraines et ont apporté plusieurs informations concernant l'impact potentiel de l'industrie des hydrocarbures sur l'environnement.

Les nouveaux éléments de connaissance les plus pertinents sont :

1. La vulnérabilité des aquifères rocheux a été évaluée pour tous les projets PACES. En général, celle-ci va de faible à modérée. Les zones à vulnérabilité élevée représentent en moyenne moins de 20 % de l'ensemble des zones vulnérables. Il est à noter toutefois que c'est la vulnérabilité des aquifères aux activités se déroulant en surface (comme les activités industrielles et le transport de fluides par oléoducs, camions ou trains) qui a été calculée et non une vulnérabilité aux activités réalisées en profondeur (comme la fracturation hydraulique).
2. Pour tous les projets PACES réalisés jusqu'à maintenant, l'aquifère régional (donc principal) est situé dans le roc fracturé, à faible profondeur (à moins de 30 m sous l'interface entre les sédiments non consolidés et le roc). Localement, des aquifères peuvent être présents dans le matériau granulaire. Les aquifères granulaires, bien que typiquement plus productifs que l'aquifère rocheux régional, sont généralement d'étendue limitée.
3. Une grande surface du territoire des basses-terres du Saint-Laurent est recouverte d'argile marine pratiquement imperméable, qui constitue une protection pour les aquifères sous-jacents contre tout déversement d'hydrocarbures en surface. Le projet Montérégie-Est a confirmé et cartographié une zone d'eau souterraine saumâtre d'environ 2 200 km² sous cette couche d'argile, localisée au nord des collines Montérégiennes. Cette eau saumâtre, relique de l'invasion marine postglaciaire (la mer de Champlain), se dilue très lentement étant donné que très peu d'eau douce, provenant de l'est (des Appalaches) et de la recharge, y circule. Elle ne constitue pas une source d'eau potable en raison de sa salinité trop élevée. Pour cette raison, les activités de l'industrie des gaz de schiste ne pourraient en compromettre l'usage.
4. Les méthodologies développées dans le cadre du PACES constituent une ressource importante pour la réalisation d'études hydrogéologiques futures comme celles qui sont exigées dans le chapitre V du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection.

5. Les résultats des analyses de méthane réalisées sur des puits situés dans la portion ouest du projet Chaudière-Appalaches confirment les résultats de l'étude réalisée dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste : du méthane est naturellement présent, à faible concentration (0,2 mg/l), dans la majorité des puits (plus de 50 %), mais il n'y a qu'un faible pourcentage de puits (15 %) qui présente des concentrations préoccupantes (> 7 mg/L). Ce gaz est majoritairement bactériogénique, c'est-à-dire qu'il est créé près de la surface par des microorganismes et n'a donc rien à voir avec le gaz présent dans le shale d'Utica ciblé par l'industrie.

Le PACES a permis de bonifier grandement le réseau de surveillance (niveau et qualité) des eaux souterraines existant. Ainsi, plus de 60 puits d'observation sont dorénavant en place sur le territoire prospectif pour le gaz de schiste. Les données géochimiques, récoltées dans le cadre des projets PACES et du programme de surveillance, permettent d'avoir un portrait actuel de la qualité de la ressource et des données de référence si un changement dans la chimie de l'eau survenait.

Introduction

Le 30 mai 2014, le gouvernement du Québec annonçait le [Plan d'action sur les hydrocarbures](#). Ce plan d'action inclut la réalisation de deux évaluations environnementales stratégiques (ÉES) ainsi que la création d'un comité directeur composé de représentants du gouvernement et d'experts indépendants.

Lors de l'annonce du plan d'action, le ministre Arcand a précisé qu'il était essentiel de faire le point sur l'état des connaissances et d'acquérir les renseignements nécessaires pour définir les orientations gouvernementales au regard des enjeux environnementaux, sociaux, économiques et de sécurité liés au développement des hydrocarbures et à leur transport.

Objectifs des deux ÉES ;

- Mieux connaître le potentiel exploitable économiquement en hydrocarbures sur le territoire,
- Combler le manque d'information concernant les techniques utilisées, notamment la fracturation hydraulique et les conditions d'exploration et d'exploitation en milieu marin,
- Analyser les risques environnementaux et établir les mesures à mettre en place pour les minimiser et en assurer la bonne gestion,
- Étudier les mécanismes de consultation et de concertation favorisant l'acceptabilité des communautés et l'aménagement durable des territoires,
- Répertorier les meilleures pratiques à mettre en œuvre avec l'industrie et les partenaires,
- Étudier les besoins en pétrole et en gaz naturel,
- Comparer les risques associés aux différents modes de transport.

Les travaux sont réalisés en fonction de cinq chantiers portant sur :

- l'environnement;
- la société;
- l'économie;
- le transport;
- les aspects techniques.

En avril 2015, après consultation avec des groupes de représentants sur diverses thématiques, le Comité directeur des ÉES publiait son Plan d'acquisition de connaissances additionnelles, dont fait partie cette étude. Tel qu'il est indiqué dans ce plan, l'étude GENV33 porte sur l'analyse approfondie des résultats du PACES en vue d'une meilleure connaissance des impacts possibles de l'industrie des hydrocarbures sur les eaux souterraines et les puits municipaux pour les régions déjà étudiées.

Notions sur les aquifères I

Bien que l'eau souterraine soit utilisée par la plupart des résidents hors des grands centres urbains, il y a peu de grands aquifères en raison de notre géologie. On est loin des vastes aquifères poreux gréseux ou carbonatés comme ceux de l'Ogallala, aux États-Unis. Au Québec, c'est uniquement aux îles de la Madeleine que sont présentes des unités rocheuses qui sont des aquifères de grande épaisseur, à grande porosité (beaucoup de place pour l'eau) et à grande transmissivité (l'eau peut y voyager facilement). Par contre, l'étendue limitée et la présence d'eau salée limitent grandement la capacité de l'aquifère.

Le programme PACES

Le Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) s'inscrit dans la poursuite de l'engagement n° 5 de la Politique nationale de l'eau relatif à l'inventaire des grands aquifères. En 2008, le gouvernement a mis en place des mesures permettant de parfaire cette connaissance, notamment par la mise en œuvre du PACES. Ce programme visait principalement à dresser un portrait de la ressource en eaux souterraines des territoires municipalisés du Québec méridional dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité.

Le PACES a fait l'objet de trois appels de propositions depuis 2008. En 2011, pour faire suite aux recommandations du Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) concernant l'industrie du gaz de shale les projets soumis dans le cadre du troisième et dernier appel de propositions devaient préférentiellement couvrir des territoires ciblés par l'industrie du gaz de shale pour l'exploration du gaz naturel.

Les objectifs du PACES étaient les suivants :

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

Pour le troisième appel de propositions, un troisième objectif s'est ajouté :

- Compléter la couverture des territoires ciblés par l'industrie du gaz de shale pour l'exploration du gaz naturel.

Le [Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines](#) (PACES) était encadré par l'équipe des eaux souterraines de la Direction des politiques de l'eau du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les

changements climatiques (MDDELCC) grâce à certains outils dont, notamment, un guide destiné aux demandeurs, un comité de sélection des projets, une méthode de calcul des subventions selon la superficie du projet soumis et une liste de produits livrables très spécifiques (incluse en annexe).

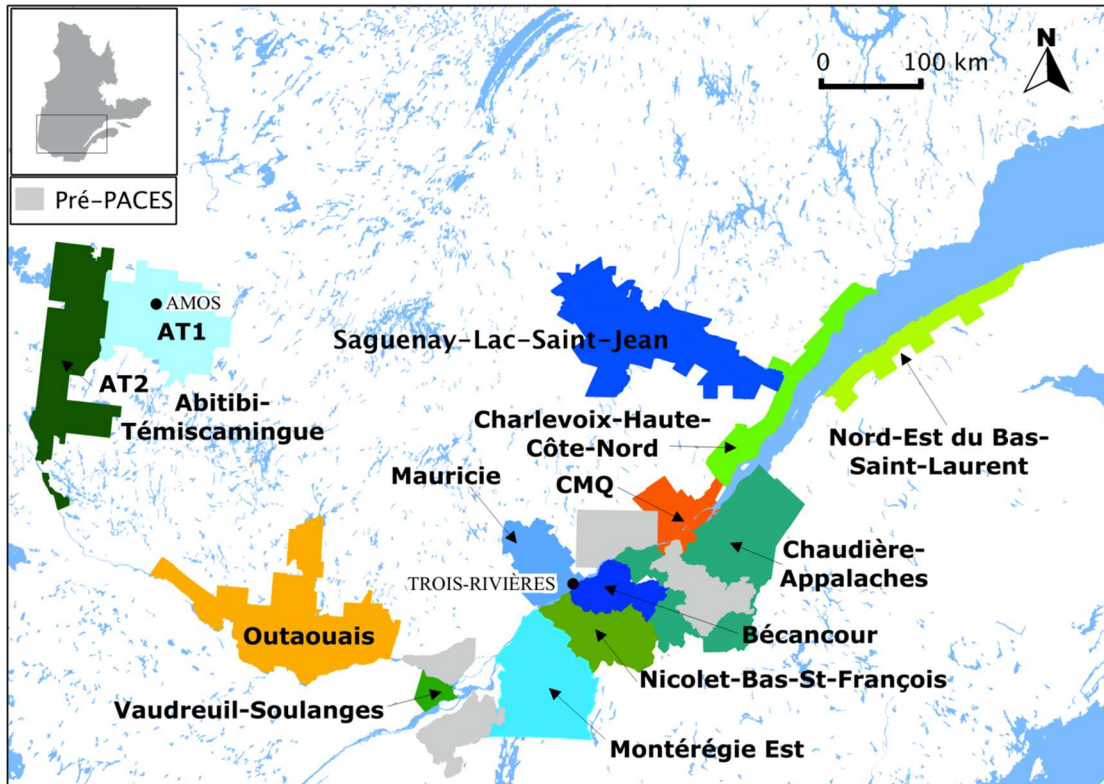


Figure 1. Territoire caractérisé dans le cadre des projets PACES réalisés jusqu'à maintenant (<http://rqes-gries.ca/fr/archives-et-documents/rapports-memoires-et-cartes/260-quest-ce-que-les-paces.html>)

Dès le premier appel de propositions, les universités participantes ont décidé de travailler ensemble en créant le [Réseau québécois sur les eaux souterraines](#) afin de mettre en commun leurs expertises et équipements, de réduire les coûts et d'harmoniser les résultats. Par ailleurs, à la demande du Ministère, elles ont développé une série de protocoles (par exemple, comment prélever un échantillon d'eau souterraine ou évaluer la vulnérabilité) afin que les différents livrables soient homogènes. Ces protocoles incluaient la série des paramètres à analyser dans l'eau souterraine qui, malheureusement, n'incluait pas initialement les hydrocarbures et le méthane. Plusieurs projets PACES ont couvert des territoires où la géologie n'est pas propice à la présence d'hydrocarbures et ne seront donc pas mentionnés dans le présent rapport.

Certains chercheurs du réseau ont participé directement aux travaux sur les gaz de schiste en réalisant des études pour l'ÉES, dont l'étude sur le méthane dans l'eau des basses terres ainsi que l'étude sur la migration potentielle des gaz le long des tubages de puits. Bien que ces rapports n'aient pas été réalisés dans le cadre du PACES, ils ont été

rédigés par des chercheurs participant au PACES. Ils sont disponibles aux adresses suivantes :

http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/gaz_de_schiste-enjeux/documents/PR3.6.9.pdf
http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/gaz_de_schiste-enjeux/documents/PR3.6.10.pdf

Méthodologie des projets PACES

Les portraits sur la connaissance des eaux souterraines du PACES donnent une image de la ressource à l'échelle régionale et ont été conçus pour fournir des éléments de réponse aux questions fondamentales suivantes :

- D'où vient l'eau et où va-t-elle?
- Est-elle potable?
- Quelle est la nature des formations géologiques qui la contiennent (le contenant)?
- Quelles sont les quantités exploitables de façon durable (le contenu)?
- Est-elle vulnérable (quantité et qualité) aux activités humaines?

Dans le PACES, la démarche à suivre pour dresser un portrait de la connaissance des eaux souterraines comportait trois étapes.

- 1) La collecte des données existantes et leur intégration dans une base de données géoréférencée. Cette étape se termine par la rédaction d'un rapport synthèse des informations existantes, l'identification des données manquantes et la planification des travaux requis pour compléter le portrait.
- 2) La réalisation de travaux de terrain nécessaires à l'obtention d'informations complémentaires ou manquantes (échantillonnages et essais, le cas échéant, pour déterminer les paramètres d'aquifères et inventaire des prélèvements).
- 3) L'intégration et l'analyse de ces données et la production d'un rapport et de cartes hydrogéologiques finales ainsi que la formulation de recommandations portant sur la protection et la gestion de l'eau souterraine sur le territoire que couvre le projet.

Par ailleurs, il faut souligner que le PACES a été conçu avant la prise de conscience à propos de la présence de gaz de schiste sur le territoire et n'examine pas directement cet aspect.

Un résumé du programme et des rapports finaux est disponible sur le site Internet du MDDELCC à l'adresse suivante :

<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>

Notions de vulnérabilité des aquifères

Le PACES spécifie que la méthode qu'il faut utiliser pour évaluer la vulnérabilité des aquifères à une contamination par la surface est la méthode DRASTIC. La méthode

DRASTIC a été développé par l'U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) dans les années 1980 pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères aux États-Unis (Aller et coll., 1987). Les détails sont fournis à l'annexe 2. La vulnérabilité intrinsèque correspond à la « sensibilité » des eaux souterraines aux pressions anthropiques par la considération des caractéristiques du milieu naturel (et non par la nature et les propriétés de polluants, qui correspond à la vulnérabilité spécifique).

Les rapports finaux des projets PACES sont disponibles sur le site Internet du Réseau québécois des eaux souterraines au lien suivant :

<http://rques-gries.ca/fr/archives-et-documents/rapports-memoires-et-cartes.html>

Analyse des constats des projets

Nature de l'aquifère régional pour le territoire d'intérêt

Pour tous les projets, l'aquifère régional est situé dans le roc fracturé, sa partie supérieure se trouvant à moins de 30 m de la surface du roc.

L'équipe de la Montérégie-Est a trouvé que « la conductivité hydraulique du roc fracturé diminue [considérablement] avec la profondeur. Bien qu'elle varie d'un contexte hydrogéologique à l'autre, cette variation ne serait pas importante en comparaison des variations associées à la profondeur ».

Cependant, il faut noter que les puits ne pénètrent généralement le roc que dans les 25 m supérieurs, ce qui peut affecter la fiabilité ou la représentativité de cette répartition du nombre de fractures selon la profondeur. Concernant les puits plus profonds, de 25 à 100 m de profondeur, le nombre de fractures diminue progressivement avec la profondeur et la majeure partie des fractures serait concentrée dans les 15 à 35 m supérieurs du roc.

Notions sur les aquifères II

Comme on peut le constater avec les conclusions des différents projets PACES, présentées plus loin dans le présent rapport, la plus grande partie du territoire des basses terres est constitué de roches sédimentaires à grain très fin. Les pores sont petits et l'eau y circule difficilement. En surface du socle rocheux, un réseau de fractures est présent et c'est dans cette mince couche (une trentaine de mètres) contenant un réseau de fractures ouvertes, située près de la surface du roc, que circule la majorité de l'eau souterraine dans les basses terres.

Pourtant, sur le territoire des basses terres, plusieurs puits domestiques ont plus de 30 m de profondeur. L'explication est simple : normalement, quand on fore un puits, on creuse jusqu'à avoir suffisamment d'eau pour nos besoins et on arrête, car les forages sont

facturés au mètre et on ne veut pas que le puits coûte trop cher. Dans de rares cas, le puits ne fournit pas assez d'eau ou les besoins en eau sont trop importants

Quand les besoins sont importants (par exemple pour un puits municipal), il est plus facile et moins dispendieux de changer d'endroit et de tenter d'intercepter plus de fractures à un nouveau site que de creuser plus profondément et d'espérer intercepter une fracture contenant beaucoup d'eau.

Quand il s'agit d'un forage résidentiel, on a un terrain limité et on n'a pas le loisir de creuser chez le voisin. À ce moment, le foreur construit un puits réservoir : l'eau provient du sommet, dans les 10 à 30 m de roc fracturé, et le débit vers le puits est faible mais le prolongement du forage sert de réservoir et c'est au fond du réservoir qu'on installe la pompe. Ainsi, avec un usage domestique standard, on ne vide pas le puits, car il se recharge lentement le soir et quand on n'utilise pas l'eau. Le réservoir formé par le trou est suffisant pour l'usage normal.

L'utilisateur moyen utilise 225 litres d'eau par jour et un puits de 150 mm sur 100 m de profondeur contient 1,7 m³ ou 1 700 litres, une quantité suffisante pour sept personnes. Dans ces cas, l'aquifère est peu profond et peu transmissif, mais la méthode de construction du puits fournit assez d'eau pour la résidence.

Localement, des aquifères sont présents dans le matériau granulaire, mais, sauf quelques exceptions bien définies pour chacun des projets, les aquifères granulaires, bien que plus productifs que l'aquifère régional dans le roc fracturé, sont d'étendue limitée.

Vulnérabilité de l'aquifère régional (aux activités industrielles en surface)

Une des activités réalisées en parallèle aux projets PACES a été une mise à jour de la cartographie des dépôts meubles sur le territoire des basses-terres du Saint-Laurent. Cette cartographie est essentielle à la caractérisation des aquifères, entre autres pour l'estimation des taux de recharge et la définition des conditions de confinement des aquifères, ainsi que pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères avec l'indice DRASTIC. En effet, les précipitations n'alimentent pas les aquifères si ceux-ci sont surmontés d'une épaisse couche d'argile (plus de 3 m).

Cette mise à jour pourra permettre, le cas échéant, une planification sécuritaire pour la mise en place d'oléoducs, car elle devrait être faite surtout là où les dépôts meubles sont peu perméables, limitant ainsi grandement les impacts d'une fuite éventuelle sur les eaux souterraines.

À l'examen des cartes de vulnérabilité, il y a une grande surface du territoire des basses-terres du Saint-Laurent qui est recouverte d'argile marine peu perméable qui constitue une protection pour les aquifères contre tout déversement d'hydrocarbures en surface.

Qualité de l'eau

Dans tous les projets, les analyses d'eau de certains puits ont révélé des dépassements de normes et de critères esthétiques en raison d'éléments naturellement présents dans l'eau. Toutefois, dans la grande majorité des cas, l'eau souterraine est de qualité adéquate pour l'alimentation en eau. La présence de sols fins (p. ex., argiles, silts et tills silteux) sur le territoire des basses-terres et du piémont appalachien contribue à fournir une bonne protection contre la surfertilisation et, bien que les nitrates soient parfois présents dans l'eau échantillonnée, les concentrations sont typiquement bien en dessous des normes de potabilité.

Le projet Montérégie-Est a confirmé et cartographié une zone d'eau saline d'environ 2 200 km², qui est interprétée comme étant une relique de l'invasion marine postglaciaire (la mer de Champlain). Cette eau, localisée au nord des collines Montérégiennes, ne constitue pas une source d'alimentation en raison de la salinité élevée et, pour cette raison, les activités de l'industrie des gaz de schiste ne peuvent en compromettre l'usage.

Étant donné que les préoccupations environnementales et la mobilisation de la population contre la fracturation hydraulique n'étaient pas encore fortes avant 2009, l'analyse des hydrocarbures dans l'eau souterraine ne faisait pas partie initialement du PACES. Comme ces analyses n'avaient pas été planifiées au départ, la plupart des projets ne les ont pas ajoutées à leur plan d'échantillonnage.

Seul le projet Chaudière-Appalaches, entre autres grâce à une collaboration avec la Commission géologique du Canada (CGC), a pu faire faire ces analyses. Celles-ci incluaient des analyses de concentrations en méthane, éthane et propane, ainsi qu'une analyse des isotopes du méthane. Les isotopes permettent d'obtenir des informations sur les molécules qui peuvent aider à déterminer l'origine du méthane. En effet, le méthane peut être d'origine bactériogénique (produit par des microorganismes, en général près de la surface) ou thermogénique (créé par dégradation de la matière organique à température élevée et à plus grande profondeur). À noter toutefois que du gaz thermogénique peut être trouvé à n'importe quelle profondeur puisque dans les basses-terres, les formations géologiques étaient enfouies de 4 à 5 km il y a quelques centaines de millions d'années soit une période suffisamment longue pour que le méthane migre vers la surface.

Dans la partie nord-ouest de cette région (Lotbinière), à l'intérieur de la zone prospective pour le gaz de shale, 44 des 74 échantillons d'eau analysés, soit 59%, ont montré des concentrations en méthane quantifiables. Onze (11) échantillons (15 %) ont présenté des concentrations excédant le seuil d'alerte de 7 mg/L. Le méthane n'a pas d'incidence sur la santé. Ce méthane est d'origine biogénique prédominante, c'est-à-dire qu'il a été formé en place à faible profondeur.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude de Pinti et coll. (2013) réalisée dans le cadre de l'ÉES sur le gaz de schiste. Ils tendent à confirmer la représentativité du

méthane, donc ce qu'il faut s'attendre à observer comme concentration en méthane dans les eaux souterraines exploitées dans les basses-terres du Saint-Laurent et sur l'origine de ce gaz. Le méthane est naturellement présent, à faible concentration (0,2 mg/L) dans la majorité des puits (plus de 50 %), mais il n'y a qu'un faible pourcentage de puits qui présentent des concentrations préoccupantes. Lorsque présent, le méthane est généralement d'origine biogénique.

Autres retombées des projets PACES

Développement de méthodologies

Comme mentionné dans la section qui décrit le PACES, les partenaires universitaires ont préparé un protocole uniforme pour tous les livrables PACES. Ces protocoles portent tout autant sur la façon de calculer l'indice DRASTIC que sur la façon d'échantillonner l'eau souterraine ou de monter une base de données hydrogéologiques.

Ces informations constituent une ressource importante pour la réalisation d'études hydrogéologiques futures comme celles qui sont exigées dans le chapitre V du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection.

Réseau de suivi des eaux souterraines (niveaux et qualité)

Bien que le MDDELCC ait mis sur pied un réseau de surveillance des niveaux d'eau souterraine (<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm>) bien avant les projets PACES, ce programme a permis de bonifier grandement le réseau existant. Ainsi, plus de 60 puits d'observation sont dorénavant en place sur le territoire prospectif pour le gaz de schiste.

Par ailleurs, le MDDELCC a commencé à échantillonner les puits du réseau pour obtenir une image de la qualité des eaux souterraines. Pour les stations piézométriques situées dans des environnements géologiques susceptibles de receler des hydrocarbures (p. ex., les stations situées sur le territoire des basses-terres du Saint-Laurent), les substances et les paramètres analysés sont ceux de l'annexe II du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (chapitre Q-2, r. 35.2), soit les mêmes que ce règlement impose aux entreprises pour la caractérisation initiale du territoire. Cette caractérisation doit être faite par les entreprises avant de procéder à l'aménagement d'un site de forage à des fins d'exploration ou d'exploitation pétrolière ou gazière. Ainsi, dans quelques années, tous les puits du réseau sur le territoire prospectif pour les hydrocarbures pourront servir comme référence pour la teneur de fond des eaux souterraines.

Base de données sur la qualité de l'eau souterraine

Dans le cadre de tous les projets PACES, 2 338 échantillons d'eau souterraine ont été analysés, dont 838 sur le territoire des basses-terres du Saint-Laurent. Bien que seulement 74 analyses pour le méthane aient été réalisées, cet exercice a contribué à constituer une banque de données de haute qualité qui a permis aux chercheurs de comprendre l'évolution de la chimie des eaux souterraines lors de leur lente circulation dans les aquifères du Québec. Cette information constitue un portrait de la qualité des eaux souterraines qui peut servir de référence pour les années futures.

Amélioration du niveau de connaissance générale sur l'eau souterraine

Les projets PACES ont généré de la connaissance nouvelle sur plus de 70 % du territoire municipalisé du Québec. Les travaux ont suscité une grande collaboration interuniversitaire et la participation des partenaires régionaux.

Par ailleurs, des dizaines de projets de maîtrise et plusieurs thèses de doctorat ont été réalisés durant les trois phases de projets PACES, ce qui a permis d'élaborer plusieurs projets de recherche liés à l'hydrogéologie, la géologie et l'environnement et de former de nombreux hydrogéologues spécialisés et très qualifiés.

Les bases de données et les cartes fournies sous forme électronique (ArcGIS) et dans les atlas de vulgarisation ainsi que la compréhension régionale tirée de ces projets constituent une source d'information considérable et précieuse. Cette information servira d'ailleurs de base pour différents travaux devant être réalisés à l'échelle locale dans ces régions et devrait faciliter le travail de départ des consultants en hydrogéologie qui recherchent, par exemple, des sources d'approvisionnement en eau pour des municipalités.

Poursuite du programme

Une portion importante du territoire municipalisé du Québec (près de 30 %) n'a pas encore été couverte par un projet PACES. La prochaine politique sur l'eau pourrait permettre de poursuivre ce programme d'acquisition de connaissances et de procéder à un appel de propositions supplémentaires. Puisqu'une portion du territoire non couvert est ciblée par l'industrie (p. ex., la Gaspésie), il y aurait lieu de compléter la couverture du territoire municipalisé du Québec.

Bien que le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (chapitre Q-2, r. 35.2) oblige l'industrie à procéder à une caractérisation initiale du territoire avant d'aménager un site de forage à des fins d'exploration ou d'exploitation pétrolière ou gazière (superficie correspondant à un rayon minimal de 2 km autour du site de forage projeté), il serait avantageux, tant pour l'industrie que pour l'État, de disposer au préalable d'une étude PACES qui camperait le contexte hydrogéologique régionale et fournirait une assise à la réalisation d'une telle caractérisation.

Pour l'État, la réalisation de projets PACES sur les territoires ciblés par l'exploration ou l'exploitation des hydrocarbures permettrait de connaître l'état des ressources en eau et leur importance pour l'occupation actuelle et future du territoire. Il serait alors plus aisé d'anticiper les effets potentiels du développement de cette industrie sur les ressources en eau, notamment en ce qui a trait à l'utilisation de l'eau.

Conclusion

Il faut souligner que le PACES a été conçu avant la prise de conscience à propos de la présence de gaz de schiste sur le territoire et n'examine pas directement cet aspect.

Les principales conclusions qu'on peut tirer des rapports PACES des territoires susceptibles de contenir du gaz de schiste sont :

- La vulnérabilité des aquifères rocheux envers les activités en surface va de faible à modérée. Les zones à vulnérabilité élevée représentent en moyenne moins de 20 % de l'ensemble des zones vulnérables. Il est à noter toutefois que c'est la vulnérabilité des aquifères aux activités se déroulant en surface (comme les activités industrielles et le transport de fluides par oléoducs, camions ou trains) qui a été calculée et non une vulnérabilité aux activités réalisées en profondeur (comme la fracturation hydraulique).
- Pour tous les projets PACES réalisés jusqu'à maintenant, l'aquifère régional (donc principal) est situé dans le roc fracturé, à faible profondeur (à moins de 30 m sous l'interface entre les sédiments non consolidés et le roc).
- Localement, des aquifères peuvent être présents dans le matériau granulaire. Les aquifères granulaires, bien que typiquement plus productifs que l'aquifère rocheux régional, sont généralement d'étendue limitée.
- Une grande surface du territoire des basses-terres du Saint-Laurent est recouverte d'argile marine pratiquement imperméable, qui constitue une protection pour les aquifères sous-jacents contre tout déversement d'hydrocarbures en surface.
- Sur le territoire du projet Montérégie-Est il y a une zone d'eau souterraine saumâtre d'environ 2 200 km² sous la couche d'argile, localisée au nord des collines

Montérégiennes. Cette eau saumâtre, relique de l'invasion marine postglaciaire (la mer de Champlain), se dilue très lentement étant donné que très peu d'eau douce, provenant de l'est (des Appalaches) et de la recharge, y circule, bien que très lentement. Elle ne constitue pas une source d'eau potable en raison de sa salinité trop élevée. Pour cette raison, les activités de l'industrie des gaz de schiste ne pourraient en compromettre l'usage.

- Les méthodologies développées dans le cadre du PACES constituent une ressource importante pour la réalisation d'études hydrogéologiques futures comme celles qui sont exigées dans le chapitre V du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection.
- Les résultats des analyses de méthane réalisées sur des puits situés dans la portion ouest du projet Chaudière-Appalaches confirment les résultats de l'étude réalisée dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste : du méthane est naturellement présent, à faible concentration (0,2 mg/l), dans la majorité des puits (plus de 50 %), mais il n'y a qu'un faible pourcentage de puits (15 %) qui présente des concentrations préoccupantes (> 7 mg/L). Ce gaz est majoritairement bactériogénique, c'est-à-dire qu'il est créé près de la surface par des microorganismes et n'a donc rien à voir avec le gaz présent dans le shale d'Utica ciblé par l'industrie.
- Le PACES a permis de bonifier grandement le réseau de surveillance (niveau et qualité) des eaux souterraines existant. Ainsi, plus de 60 puits d'observation sont dorénavant en place sur le territoire prospectif pour le gaz de schiste. Les données géochimiques, récoltées dans le cadre des projets PACES et du programme de surveillance, permettent d'avoir un portrait actuel de la qualité de la ressource et des données de référence si un changement dans la chimie de l'eau survenait.

ANNEXE 1 : LIVRABLES FINAUX DES PROJETS PACES

Phase III – Synthèse et transfert		
Activité	Biens livrables	Remarques
<p>Analyse et interprétation de l'ensemble des données colligées dans le cadre du projet selon les thèmes suivants :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Description de la région 2. Contexte géologique 3. Contexte hydrogéologique (modèle conceptuel, propriétés hydrauliques, conditions d'écoulement) 4. Bilan hydrologique (recharge, utilisation de la ressource, résurgences) 5. Qualité de l'eau 6. Vulnérabilité et activités anthropiques 7. Pérennité de la ressource (quantité et qualité) 8. Recommandations (gestion et suivi de la ressource) 	<p>Pour chacun des thèmes, le résultat de l'analyse et de l'interprétation des données sera présenté sous la forme de cartes thématiques accompagnées d'un texte technique, destiné à un public spécialisé. De plus, un second texte « grand public » devra être produit afin d'en vulgariser le contenu.</p> <p>Pour la préparation de ces thèmes, il sera nécessaire, notamment, de produire les couches d'information suivantes :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Topographie 2. Routes, limites municipales et toponymie 3. Modèle altimétrique numérique (MAN) 4. Pente du sol 5. Hydrographie 6. Limites de bassins et de sous-bassins 7. Occupation du sol 8. Couverture végétale 9. Milieux humides (zones d'intérêt écologique) 10. Affectation du territoire 11. Pédologie 12. Géologie du Quaternaire 13. Géologie du roc 14. Coupes stratigraphiques et hydrostratigraphiques 	<p>Voir le <i>Guide méthodologique pour la caractérisation des aquifères granulaires de surface</i> et le <i>Guide méthodologique pour la caractérisation des aquifères en roches sédimentaires fracturées</i>.</p> <p>Voir aussi les atlas produits dans le cadre de la caractérisation hydrogéologique des bassins des rivières Chaudière (2008) et Châteauguay (2006).</p> <p>Toutes les cartes doivent être basées sur les mêmes territoires et utiliser les mêmes toponymes.</p> <p>La préparation des couches doit être réalisée en tenant compte des considérations suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La pente du sol doit être dérivée du MAN corrigé. • Un regroupement des séries de sols est requis pour la préparation de la couche pédologique. • La géologie des dépôts meubles (Quaternaire) doit être présentée en

	<p>15. Épaisseur des dépôts meubles</p> <p>16. Topographie du roc</p> <p>17. Contextes hydrogéologiques</p> <p>18. Épaisseur et limites des aquifères régionaux</p> <p>19. Piézométrie dans les formations superficielles</p> <p>20. Piézométrie dans le roc</p> <p>21. Paramètres hydrogéologiques – base de données ou cartes (K, T, S, porosité, etc.)</p> <p>22. Vulnérabilité des aquifères selon la méthode DRASTIC (couche synthèse + couches de chacune des composantes de l'indice)</p> <p>23. Activités potentiellement polluantes (dépôts de matériaux secs, anciens dépotoirs, lieux d'entreposage de pneus, bassins de traitement d'eaux usées, zones où se déroulent des activités agricoles, etc.)</p> <p>24. Qualité (critères eau potable)</p> <p>25. Qualité (objectifs esthétiques)</p> <p>26. Utilisation de l'eau</p> <p>27. Emplacement des stations météorologiques, hydrométriques et de suivi de la nappe</p> <p>28. Zones de recharge préférentielles et de résurgence</p>	<p>employant la nomenclature de la Commission géologique du Canada (CGC).</p> <ul style="list-style-type: none"> • La géologie du roc doit être présentée en employant la nomenclature de Géologie Québec (ministère des Ressources naturelles et de la Faune) et les affleurements doivent être géoréférencés. • La présentation du contexte hydrogéologique régional doit indiquer les conditions de nappe libre, semi-confinée ou confinée. • Les couches présentant la piézométrie doivent indiquer les limites de partage des eaux et les liens avec l'eau de surface. • Les paramètres hydrogéologiques peuvent être présentés sous forme de tableaux. • La présentation de la vulnérabilité selon DRASTIC doit employer des pixels de 250 m x 250 m. • La qualité de l'eau doit être présentée de manière à indiquer les problèmes connus, mais également présenter les statistiques décrivant les résultats. • L'utilisation de l'eau doit indiquer l'emplacement des grands utilisateurs, ainsi qu'une présentation des statistiques.
<p>Transfert au MDDEP de l'ensemble des résultats du projet</p>	<p>Base de données</p> <p>Documents thématiques</p> <p>Couches numériques</p>	

ANNEXE 2 : DÉTAILS SUR LA VULNÉRABILITÉ DRASTIC

La valeur de chaque paramètre est classée en intervalles (pour les variables quantitatives) ou en types de milieu (pour les variables qualitatives), selon leur contribution potentielle au risque de pollution d'un aquifère par une contamination provenant de la surface du sol.

Autrement dit, des points (ou cotes) sont attribués, selon un gabarit, en fonction de la valeur d'un paramètre ou des caractéristiques géologiques pour un site donné. Ces intervalles de valeurs vont généralement de 1 (faible vulnérabilité) à 10 (forte vulnérabilité). Des poids de 1 à 5 ont aussi été attribués à chacun des sept paramètres en fonction de l'importance relative présumée des processus physiques représentés par les paramètres par rapport à leur contribution à la vulnérabilité d'un aquifère.

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

$$\text{Indice DRASTIC} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$



ANNEXE 3 : CONSTATS DES PROJETS PACES DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT

Cette annexe présente des constats pertinents provenant des rapports des projets PACES du territoire prospectif pour le gaz de schiste, soit la rive sud du Saint-Laurent entre Québec et Montréal. Les projets PACES visés sont : Montérégie-Est, Nicolet–Saint-François, Bécancour, Communauté métropolitaine de Québec et Chaudière-Appalaches. Par ailleurs, une partie du projet Mauricie est également concernée.

Constats du PACES Montérégie-Est

Le roc fracturé constitue l'aquifère régional principalement exploité dans la majorité des contextes de la Montérégie-Est. La conductivité hydraulique du roc fracturé diminue considérablement avec la profondeur et que, bien qu'elle varie d'un contexte hydrogéologique à l'autre, cette variation ne serait pas importante en comparaison des variations associées à la profondeur. Par contre, les puits ne pénètrent généralement le roc que dans les 25 m supérieurs, ce qui peut affecter la fiabilité ou la représentativité de cette répartition du nombre de fractures selon la profondeur. Concernant les puits plus profonds, de 25 à 100 m de profondeur, le nombre de fractures diminue progressivement avec la profondeur et la majeure partie des fractures serait concentrée dans les 15 à 35 m supérieurs du roc.

En Montérégie-Est, les aquifères granulaires (dans le sable) ont une extension limitée et ne sont pas d'envergure régionale.

Cinq contextes hydrogéologiques distincts sont présents sur le territoire du PACES Montérégie-Est.

1) *Le contexte de la zone nord de la Plate-forme du Saint-Laurent* (basses-terres nord) est caractérisé par un faible relief et surtout par une épaisse couverture argileuse (> 10 m). Ces conditions impliquent une recharge minimale de l'aquifère rocheux régional ainsi qu'un très faible écoulement de l'eau souterraine. De cette situation découle la présence d'eau saumâtre dans l'aquifère rocheux de la zone nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (superficie d'environ 2 200 km²) due au lessivage partiel des eaux de la mer de Champlain. Cette eau saumâtre n'est pas potable, ce qui fait que le potentiel aquifère de ce contexte est très faible, d'où une utilisation minimale de l'eau souterraine.

2) *Dans le contexte de la zone sud de la Plate-forme du Saint-Laurent* (basses-terres sud), il n'y a pas de couverture continue et épaisse de sédiments argileux, le socle rocheux étant plutôt recouvert de till de moins de 10 m d'épaisseur qui permet une recharge importante de l'aquifère rocheux. Il y a des liens entre l'aquifère rocheux et les cours d'eau, particulièrement la rivière Richelieu qui

constitue une zone de résurgence. Le potentiel aquifère repose principalement sur l'aquifère rocheux fracturé. Il y a une utilisation importante d'eau souterraine pour l'approvisionnement dans ce contexte.

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

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

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

Vulnérabilité de l'aquifère

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

Dans le contexte de la *Plate-forme sud*, les conditions semi-captives sont prédominantes en relation avec un recouvrement du roc par des épaisseurs variables de till, généralement considéré semi-perméable. Ces conditions

amènent des vulnérabilités intermédiaires sur une grande partie de ce contexte. Cependant, à certains endroits où on retrouve une couche argileuse, comme le long de la rivière Richelieu, la vulnérabilité est faible, alors qu'à d'autres endroits la vulnérabilité est élevée, et même très élevée, à cause d'une combinaison de facteurs (p. ex., recharge plus élevée, type de sol plus vulnérable, zone non saturée plus mince).

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

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

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

À l'échelle municipale, 75 puits municipaux exploitent l'eau souterraine, dont environ un tiers capte de l'eau dans les dépôts meubles, le reste captant de l'eau dans l'aquifère de roc fracturé. La capacité des puits dans les dépôts meubles s'avère nettement plus importante que celle des puits au roc, et ce, même si les aquifères en milieu granulaire sont d'étendue limitée. Ainsi, même si, hors de la zone d'eau saumâtre, les ressources sont relativement abondantes dans la région, leur exploitabilité est limitée par la capacité des puits au roc et l'étendue limitée des aquifères granulaires plus productifs.

Constats pour la section du projet Mauricie recouvrant le shale d'Utica

En bordure nord du lac Saint-Pierre, on retrouve une grande plaine argileuse déposée par-dessus le till et les roches ordoviciennes. Ces sédiments fins, déposés dans la mer de Champlain, constituent un aquitard qui maintient captive une nappe d'eau fossilisée fortement minéralisée avec des accumulations de gaz naturel par endroits, ce qui la rend impropre à la consommation. Certains puits privés puisent toutefois leur eau dans les grès et les calcaires de ce secteur.

Constats du PACES Nicolet–Saint-François

Trois contextes hydrogéologiques sont présents sur le territoire couvert.

1) *La zone appalachienne* est dominée par les contextes d'affleurements de roc, de till, de till remanié et de dépôts granulaires reposant sur du till. Ce type de contexte est principalement rencontré dans le fond des vallées, là où les dépôts ont pu s'accumuler. Il est possible que des dépôts silteux ou argileux soient présents sous les dépôts granulaires. Cependant, les informations n'ont pas permis de généraliser ce contexte à toutes les vallées de la portion aval de la zone d'étude. La vallée de la rivière Nicolet-Sud-Ouest, entre le secteur des Trois-Lacs et Kingsey Falls, est caractérisée par une séquence de dépôts granulaires superposés à un till reposant sur des dépôts argileux compacts et parfois des graviers. L'épaisseur des dépôts fins peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Le forage NSF-R11, localisé près de la rivière Nicolet, à Asbestos, ainsi qu'un forage de consultant localisé à Danville ont permis de valider l'étendue de la vallée enfouie. Cette dépression du roc, causée sans doute par le réseau de failles dans le secteur, s'étend de la région de Kingsey Falls jusqu'en amont du secteur des Trois-Lacs et peut-être même plus en amont.

2) Dans *la partie centrale* (entre le piémont et l'autoroute 20), les dépôts argileux gagnent en importance et leur épaisseur augmente, en général, vers la partie aval. L'argile affleure en surface à quelques endroits, mais elle est généralement recouverte par des dépôts sableux d'origine littorale ou éolienne. C'est dans ce contexte particulier de sables éoliens et littoraux reposant sur une couche d'argile ou de till que la majorité des tourbières de la zone d'étude se sont développées.

Des dépôts granulaires sont aussi présents sous l'argile dans la zone comprise entre les rivières Nicolet et Nicolet-Sud-Ouest. Les dépôts sableux superficiels de ce même secteur forment un potentiel aquifère, car leur épaisseur demeure supérieure à 5 m sur plusieurs kilomètres carrés, comme c'est le cas dans le secteur de Saint-Albert. Les contextes de till sur roc sont localisés sur les topographies plus hautes. À ces endroits, les dépôts argileux ont été érodés lors du retrait de la mer de Champlain. Un contexte particulier de dépôts granulaires d'origine fluvioglaciaire forme l'esker Asbestos-Tingwick. Ce cordon de sable et de

gravier est orienté sud-ouest/nord-est. Ces dépôts de granulométrie grossière reposent en général directement sur le roc, bien qu'on puisse y retrouver un till. Leur épaisseur, qui peut atteindre plusieurs mètres, en fait un aquifère important dans la région. Les argiles ont recouvert les flancs de l'esker, ce qui pourrait créer des conditions de nappe semi-captive par endroit.

3) Dans *la partie aval*, les contextes argileux gagnent en importance et la stratigraphie est complexifiée par la présence, combinée ou non, de matériaux granulaires sous les argiles marines et sous le till. Les dépôts granulaires présents sous les argiles de la mer de Champlain peuvent constituer des aquifères, notamment dans le secteur de Sainte-Perpétue et de Saint-François-du-Lac. Près du fleuve, le contexte « argile-granulaire-till » est dominant.

Vulnérabilité de l'aquifère

En aval de la zone d'étude, l'indice DRASTIC indique une vulnérabilité allant de faible à très faible (indice DRASTIC de 24 à 75) pour les secteurs où l'aquifère au roc est en conditions captives, soit pour tout le secteur couvrant l'aval de la zone, de l'axe entre Sainte-Perpétue et Saint-Bonaventure jusqu'au fleuve. Ce secteur est associé à la présence de dépôts argileux (dans le cas d'un aquifère à nappe captive, la profondeur de la nappe correspond à la base de l'argile), à la recharge nulle en présence d'argile.

Bien que des dépôts d'argile recouvrent généralement la partie aval de la zone d'étude, des dépôts plus grossiers se superposent aux dépôts argileux par endroits. Il est à noter qu'un important affleurement rocheux dans le secteur de Baie-du-Febvre représente le seul contexte non confiné de la portion aval de la zone d'étude.

Dans la partie centrale de la zone d'étude et vers le piémont appalachien, la méthode DRASTIC indique une vulnérabilité contrastée avec présence simultanée de zones dont la vulnérabilité varie de faible à très élevée.

Pour le *secteur des Appalaches*, la vulnérabilité DRASTIC est généralement d'élevée (indice DRASTIC de 126 à 150) à très élevée (indice DRASTIC de supérieur à 150). La vallée de la rivière Nicolet, dans le secteur de Danville et d'Asbestos, est caractérisée par une vulnérabilité faible étant donné les conditions de nappe captive qui y prévalent. Cette situation est cependant circonscrite au fond de la vallée.

Constats du PACES Bécancour

Trois contextes hydrogéologiques sont présents sur le territoire du projet.

1) *La zone amont*, qui s'étend du piémont des Appalaches aux secteurs de topographie plus élevée, est caractérisée par une faible couverture de till remanié sur le roc fracturé. Celui-ci représente l'aquifère principal et est à nappe libre. Ces conditions géologiques et une précipitation importante en font la principale zone de recharge du territoire étudié.

L'aquifère rocheux présente des conductivités hydrauliques relativement faibles, mais légèrement plus élevées que celles de l'aquifère rocheux des zones centrale et aval. Même si elle n'est pas très marquée, cette différence est due à une plus grande fracturation dans la zone amont. Il est donc plus probable d'obtenir un puits productif dans cette partie du territoire à l'étude.

Dans la zone amont, les niveaux piézométriques sont peu profonds et suivent généralement la topographie. Ceci indique la présence de gradients hydrauliques vers le bas et d'un écoulement souterrain vertical. Plus en aval dans la zone d'étude, c'est-à-dire vers la zone centrale, l'eau souterraine rejoint l'écoulement régional peu profond et celui-ci devient horizontal. Une partie de l'eau souterraine atteint également l'écoulement régional profond. La combinaison d'une recharge élevée et d'un relief accidenté est favorable à la résurgence de l'eau souterraine dans les parties basses du paysage. À ces endroits, les niveaux piézométriques peuvent être égaux ou supérieurs à la surface topographique, ce qui induit des suintements le long des escarpements rocheux et la décharge d'eau souterraine dans les cours d'eau et dans les fonds de vallées.

La signature géochimique de l'eau souterraine de cette zone est représentative d'une eau n'ayant pas résidé longtemps dans l'aquifère, elle est faiblement minéralisée et de bonne qualité.

Dans ce contexte, les types d'eau Ca-HCO₃ et Mg-HCO₃ sont généralement associés à de l'eau de recharge, c'est-à-dire à une eau de pluie qui a faiblement dissous les minéraux carbonatés présents dans le sol et dont le taux de renouvellement est trop court pour que l'eau puisse se minéraliser de manière importante au sein de l'aquifère. L'aquifère fracturé de la zone amont a une vulnérabilité variant de moyenne à élevée.

2) *La zone centrale* du territoire à l'étude est caractérisée par une couverture quasi continue de till compact d'une épaisseur de 0 à 5 m qui crée localement des conditions de nappe semi-captive, notamment près de la rivière Bécancour, entre les rivières Bourbon et Noire, de même qu'en amont des rivières Gentilly et Petite du Chêne. La majorité des tourbières se retrouve dans ces secteurs, signe de la présence de dépôts meubles peu perméables sous-jacents aux dépôts organiques. Les conditions de nappe libre sont rencontrées de part et d'autre de l'autoroute 20 et dans la zone située au nord-ouest de Princeville et de Plessisville.

Les secteurs de nappe libre dans la zone centrale sont généralement recouverts d'une unité de sable et ont une pente faible. Cette unité sableuse est aussi

présente dans les secteurs semi-captifs. Des aquifères superficiels sont parfois présents dans ces dépôts sableux, mais ceux-ci sont cependant discontinus dans l'espace et dépassent rarement 10 m d'épaisseur.

Les roches de la partie centrale sont relativement peu fracturées et peu productives. La conductivité hydraulique y est faible. La conductivité hydraulique des unités sableuses de surface est élevée, mais la faible épaisseur des dépôts limite leur potentiel d'exploitation. L'aquifère fracturé de la zone centrale a une vulnérabilité variant de moyenne à très élevée. Les portions les plus vulnérables sont celles où la nappe est libre.

Dans cette partie de la zone d'étude, les niveaux piézométriques sont peu profonds. L'écoulement souterrain dans l'aquifère rocheux est majoritairement horizontal, à l'exception des zones de résurgence où l'eau souterraine rejoint les cours d'eau principaux. Dans les dépôts granulaires superficiels, la nappe libre se situe près de la surface. L'eau s'écoule donc selon la pente du sol et rejoint généralement les cours d'eau ou les milieux humides.

Plusieurs types d'eau sont rencontrés dans cette portion du territoire. Les zones d'aquifère rocheux ou granulaire à nappe libre étant des zones de recharge, le type d'eau Ca-HCO_3 y est fréquemment rencontré. Aux endroits où la couverture de till devient assez importante pour créer des conditions de nappe semi-captive, la recharge est plus faible, l'eau est plus minéralisée et son pH augmente. L'eau de type Na-HCO_3 est principalement observée dans ces zones. La vulnérabilité de l'aquifère fracturé en nappe libre et des aquifères granulaires de surface de la zone centrale varie d'élévée à très élevée.

3) *La zone aval* est caractérisée par une couverture importante de dépôts meubles imperméables qui créent des conditions de nappe captive. Des unités perméables sableuses d'épaisseur supérieure à 10 m y sont retrouvées. La recharge de l'aquifère fracturé est donc quasiment nulle. Le niveau piézométrique y est généralement beaucoup plus élevé que le toit du roc. L'aquifère du roc est donc en conditions de nappe captive.

La zone aval héberge également l'aquifère granulaire des sables des Vieilles Forges. Celui-ci couvre une grande partie de la zone aval et l'eau souterraine y circule en conditions semi-captives et libres. Il est supposé que cette unité est en contact dans sa portion amont avec l'aquifère du roc fracturé. Sa limite nord-ouest est constituée par une crête topographique importante où le relief diminue rapidement et où se trouve l'approvisionnement municipal des sources de Gentilly. Les zones de recharge de cet aquifère ainsi que ses limites latérales sont cependant encore mal connues.

La zone aval est caractérisée par des types d'eau Na-Cl et Na-HCO_3 . Ces eaux parfois saumâtres indiquent un très faible taux de renouvellement, des temps de résidence longs et un aquifère fracturé peu dynamique en profondeur. L'eau des zones de recharges n'atteint la zone aval qu'en très faible quantité, ce qui limite l'écoulement des eaux saumâtres minéralisées vers le fleuve. La vulnérabilité de

l'aquifère fracturé de cette partie du territoire à l'étude est généralement faible en raison de l'importante couverture de dépôts imperméables combinée à de faibles taux de recharge.

Vulnérabilité de l'aquifère

En aval de la zone d'étude, l'indice DRASTIC indique une vulnérabilité allant de faible à très faible (indice DRASTIC de 33 à 75) pour les secteurs où l'aquifère au roc est en conditions captives, soit pour un secteur couvrant une douzaine de kilomètres de largeur entre les villes de Saint-Célestin, Grand-Saint-Louis, Sainte-Cécile-de-Lévrard et Parisville. Ce secteur est associé à la présence de dépôts argileux.

Des nuances pour les zones les moins vulnérables sont apportées par l'indice A (milieu aquifère), pour les différentes formations du Groupe de Bécancour, ce qui contribue à apporter plus ou moins de points aux zones les moins vulnérables situées dans la portion aval du bassin.

Dans la *partie centrale* de la zone d'étude et vers le piémont appalachien, la vulnérabilité DRASTIC varie généralement d'élevée (indice DRASTIC de 126 à 150) à très élevée (indice DRASTIC de supérieur à 150).

Pour le *secteur des Appalaches*, la méthode DRASTIC indique une vulnérabilité contrastée avec présence simultanée de zones dont la vulnérabilité varie de faible à très élevée. Les zones pour lesquelles la vulnérabilité est très élevée (indice DRASTIC supérieur à 150) sont caractérisées par la présence de dépôts granulaires fluvioglaciers où la profondeur de la nappe est peu élevée, comme c'est le cas dans la vallée de la rivière Bécancour entre le lac Saint-Joseph et l'extrémité est de la zone d'étude.

Constats du PACES Chaudière-Appalaches

Sur le territoire du projet, le roc fracturé représente un aquifère régional continu, alors que des aquifères granulaires d'étendue restreinte se retrouvent par endroits dans les dépôts meubles. Il est important de mentionner que les analyses de K (conductivité hydraulique) en fonction de la profondeur démontrent que la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux est contrôlée par la profondeur dans le roc davantage que par la géologie locale.

Sur la base de la physiographie et de la nature des dépôts meubles, trois contextes hydrogéologiques peuvent être définis dans la région d'étude.

1) *Les basses-terres du Saint-Laurent* se retrouvent sur une bande ayant de 10 à 30 km de largeur en bordure du fleuve Saint-Laurent. On y retrouve une topographie de bas plateau qui a été recouvert par la mer de Champlain, ce qui fait qu'on y retrouve d'épaisses accumulations de sédiments à grains fins (plus de

10 m). Au sud des basses-terres, on retrouve une topographie de collines, montagnes et vallées.

2) *Les hautes-terres appalachiennes* ne sont généralement recouvertes que d'une mince couche de till relativement perméable, ce qui en fait une vaste zone de recharge préférentielle de l'aquifère régional.

3) *Les vallées appalachiennes* peuvent être comblées d'épaisseurs importantes de sédiments (plus de 15 m), mais leur potentiel aquifère est généralement faible. Toutefois, on retrouve par endroits des sédiments fluvioglaciaires qui peuvent avoir un potentiel aquifère local.

L'équipe du projet Chaudière-Appalaches est la seule qui a pu réunir les fonds requis pour analyser le méthane dans l'eau de certains puits. Ainsi, dans la partie nord-ouest de la région à l'intérieur de la zone prospective pour le gaz de shale, 44 (59 %) des 74 échantillons d'eau analysés ont montré des concentrations en méthane quantifiables. Onze (11) échantillons (15 %) ont présenté des concentrations excédant le seuil d'alerte de 7 mg/L. Le méthane n'a pas d'incidence sur la santé. Ce méthane est d'origine biogénique prédominante, c'est-à-dire qu'il a été formé en place à faible profondeur.

La profondeur des puits au roc installés pour l'approvisionnement municipal est le plus souvent entre 60 et 90 m, alors que la profondeur des puits résidentiels est généralement moindre, soit de 20 à 40 m. Cette profondeur accrue des puits municipaux permet d'aller chercher la capacité de production souhaitée. On peut en déduire que les consultants ont tendance à installer et mettre en production des puits qui ont des propriétés hydrauliques avantageuses, ce qui place ces puits nettement au-dessus des autres puits de la région en matière de capacité de production.

En ce qui concerne la contamination industrielle reliée à l'exploration et à l'exploitation éventuelle du gaz de shale, la caractérisation géochimique de l'eau souterraine en Chaudière-Appalaches est allée au-delà de ce qui est requis des projets PACES en analysant la présence de gaz d'hydrocarbures dissous (méthane, éthane et propane) dans l'eau souterraine. Ces analyses ont été faites pour les puits localisés à l'intérieur de la province géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent qui couvre surtout la partie nord de la MRC de Lotbinière. Il faut d'abord mentionner que la présence de méthane dans l'eau souterraine n'a pas d'effet néfaste pour la santé, mais l'accumulation de méthane dans la tuyauterie d'une résidence peut comporter des risques. Le méthane dans les eaux souterraines peut se former dans trois environnements distincts : 1) le méthane biogénique peut être présent dans les aquifères de faible profondeur et il est formé par la réduction microbienne de la matière organique; 2) le méthane thermocatalytique est plutôt formé par la décomposition, à température élevée, d'hydrocarbures lourds. Il est associé au gaz naturel se trouvant dans les bassins sédimentaires à plus grande profondeur; 3) le méthane abiogénique est formé en conditions extrêmement réductrices, sans intervention bactérienne, en présence d'un catalyseur inorganique (p. ex., du fer). La méthanogenèse microbienne dans

les eaux souterraines est un phénomène très répandu; la majorité des aquifères superficiels caractérisés par des eaux peu oxygénées contiennent des quantités mesurables de méthane dissous en raison de l'activité microbienne (Gorody, 2012).

Pinti et coll. (2013), dans l'étude réalisée dans le cadre de l'ÉES sur le gaz de schiste, ont montré que le méthane dans les eaux souterraines des basses-terres du Saint-Laurent a une origine biogénique dominante, bien que quelques évidences d'apport de gaz thermogéniques aient été observées dans les Appalaches. Un projet de recherche, réalisé par la Commission géologique du Canada dans la région de Lotbinière, va évaluer l'origine du méthane dans l'eau souterraine de ce secteur (Rivard et coll., 2013). Les détails de ce projet sont disponibles sur le lien Internet suivant :

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516213002711>

En ce qui concerne la présence d'un oléoduc, il faut mettre les préoccupations en perspective par rapport à la fréquence, mais surtout à l'incidence que peuvent représenter d'éventuelles fuites. Ainsi, la carte de vulnérabilité de l'aquifère permet de juger si les secteurs où il y a des préoccupations se trouvent dans des zones vulnérables ou non. De façon générale, la carte de vulnérabilité montre que la vulnérabilité varie généralement de faible à très faible dans le contexte des basses-terres du Saint-Laurent, mais qu'il y a des parties où la vulnérabilité peut être élevée, voire très élevée, relativement parlant.

Constats du PACES Communauté métropolitaine de Québec

La Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) est le point de rencontre de trois grandes provinces géologiques (le Grenville, la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches) dont les lithologies, la structure et la fracturation sont distinctes. Depuis la dernière période glaciaire du Quaternaire, plusieurs événements géologiques ont mené à la mise en place de différents dépôts meubles et au développement de plusieurs contextes hydrogéologiques.

Il y a six grands contextes hydrogéologiques sur le territoire.

1) *Les Laurentides* : le contexte hydrogéologique des Laurentides, portant le même nom que la région physiographique dans laquelle il se trouve, est présent dans la partie nord de la CMQ et reflète les conditions prévalant sur près du deux tiers du territoire étudié. Des dépôts de tills, composés de sable et gravier silteux, y sont généralement minces et ont des perméabilités moyennement élevées. Par conséquent, ces dépôts ne confinent pas l'aquifère de roc fracturé sous-jacent.

Cet aquifère est caractérisé par des perméabilités allant de très faibles à moyennes qui dépendent de l'ouverture, de l'espacement et de la connectivité des réseaux de fractures au sein du roc. L'eau souterraine s'écoule dans ces réseaux

de fractures et son écoulement est sous l'influence des variations topographiques. À l'échelle locale, l'écoulement se fait des zones de recharge de l'eau souterraine sur les hauts topographiques vers les zones de résurgence dans les cours d'eau circulant entre les collines.

Les taux de recharge de l'aquifère de roc des Laurentides sont parmi les plus élevés de la région de la CMQ, car cette portion du territoire bénéficie notamment d'une plus grande quantité de précipitation et de la présence de sols perméables. La recharge élevée a pour effet de renouveler l'eau souterraine qui peut résider plus ou moins longtemps dans l'aquifère selon les conditions hydrauliques variables du roc (densité, ouverture, connectivité des fractures). Ainsi, l'eau souterraine est très peu évoluée et, conséquemment, peu chargée en ions majeurs.

2) *Les complexes fluvioglaciaires et deltaïques* : les complexes fluvioglaciaires et deltaïques sont également localisés dans le nord de la CMQ, dans la région physiographique des Laurentides et sur le piémont laurentien. Ce contexte hydrogéologique représente les grands ensembles sédimentaires déposés dans les anciennes vallées glaciaires creusées dans le socle rocheux de la province géologique de Grenville et débouchant sur la Plate-forme du Saint-Laurent.

Ces complexes sont particulièrement importants dans les vallées des rivières Jacques-Cartier, Montmorency et Sainte-Anne. Les dépôts meubles sont généralement composés de sable et/ou de gravier d'épaisseur variable et ils constituent un bon aquifère compte tenu des conductivités hydrauliques variant d'élevées à très élevées. Les dépôts sont généralement plus minces au nord de la CMQ et peuvent atteindre 50 m et plus à l'approche du piémont. Lorsqu'ils sont plus épais, ces complexes peuvent contenir des horizons de silt prodeltaïque d'épaisseurs variables et discontinus. Ces horizons peuvent alors mener à des conditions hydrogéologiques complexes et difficiles à caractériser, tant à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale. Ainsi, il est possible de retrouver localement des aquifères de dépôts meubles non confinés, parfois perchés sur les silts, tout comme des aquifères semi-confinés et confinés sous ces horizons silteux de faible perméabilité.

Régionalement, ces complexes aquifères semblent en lien hydraulique avec le roc sous-jacent. La structure interne de ces ensembles sédimentaires peut mener à des directions d'écoulement souterrain fort complexes. La recharge de l'aquifère dans ce contexte est la plus élevée de la région de la CMQ, car la perméabilité des dépôts en surface favorise l'infiltration des précipitations dans le sol jusqu'à l'aquifère. Une grande variabilité des conditions de confinement expliquerait également que la signature géochimique soit caractéristique d'une eau jeune à évoluée, selon les différents parcours empruntés par l'eau dans le sous-sol.

3) *La couronne nord des basses-terres du Saint-Laurent* : la couronne nord des basses-terres du Saint-Laurent est un contexte présentant des dépôts de sable silteux, de silt sableux et de silt argileux ayant une perméabilité de moyenne à très

faible. Lorsque peu perméables, ces dépôts d'origine marine agissent comme une couche qui, selon son épaisseur, confine ou non l'aquifère sous-jacent de roc fracturé de la Plate-forme du Saint-Laurent.

Ces unités de roc fracturé, constituées de calcaire silteux, de shale et de lamines de grès, ont des perméabilités similaires à celles de la province géologique de Grenville, c'est-à-dire allant de très faibles à moyennes. L'eau souterraine s'écoule à partir du sommet des collines pour faire résurgence à des distances moyennes au niveau des cours d'eau ou directement dans le fleuve Saint-Laurent. La perméabilité moyenne à très faible des dépôts qui recouvrent l'aquifère de roc, combinée à des précipitations plus faibles que dans le nord de la CMQ et à l'imperméabilisation des sols provenant de l'urbanisation, diminuent considérablement la recharge de l'aquifère de roc.

Bien que peu d'analyses géochimiques aient été réalisées dans ce contexte à cause d'une faible disponibilité de puits, cette zone offre une transition entre les eaux de recharge des Laurentides et les eaux souterraines généralement plus évoluées des basses-terres du Saint-Laurent.

4) *Le Proto-Saint-Laurent* : le contexte du Proto-Saint-Laurent est situé dans la basse ville de Québec et à l'embouchure de la rivière Cap-Rouge. Ce contexte est caractérisé par un empilement de silt sur sable sur silt sur roc. Les aquifères de dépôts sableux de perméabilité élevée peuvent atteindre une épaisseur maximale de 24 m à la hauteur de la rivière Saint-Charles et de 30 m à l'embouchure de la rivière Cap-Rouge. De manière générale, ces aquifères sont non confinés, mais ils peuvent être semi-confinés où les alluvions silteuses de faible perméabilité sont plus épaisses.

Cet aquifère de roc est présent sous cette succession de dépôts meubles. Il est majoritairement confiné et il est composé d'ardoise et dolomie de la Plate-forme du Saint-Laurent. Dans les aquifères sableux, l'eau souterraine s'écoule vers la rivière Saint-Charles ou la rivière Cap-Rouge, puis vers le fleuve Saint-Laurent. Ces aquifères se rechargent à un taux moyen en raison de la densité du milieu urbain ainsi que de la faible perméabilité des dépôts de silt en surface. La composition hydrogéochimique des aquifères de dépôts meubles suggère que l'eau souterraine qui y circule est très évoluée ou d'origine marine.

5) *L'île d'Orléans et le Promontoire de Québec* : dans le contexte hydrogéologique de l'île d'Orléans, l'unité hydrostratigraphique dominante est un silt sableux et graveleux de faible perméabilité, ayant une épaisseur généralement inférieure à 7 m. Par endroit, là où les dépôts sont plus épais, il est possible de distinguer de petites zones de silt ou d'argile silteuse qui confinent localement le roc fracturé, seul aquifère exploitable sur l'île.

Les roches qui composent cet aquifère sont un mélange de shale et de grès typique des Appalaches, avec des perméabilités variant de très faibles à moyennes selon l'intensité de fracturation. L'eau souterraine s'écoule radialement, du centre de l'île vers son contour, pour faire résurgence au fleuve Saint-Laurent.

Le taux de recharge de l'aquifère est moyen en comparaison avec les autres contextes hydrogéologiques de la région.

Un niveau d'évolution géochimique intermédiaire est observé sur le pourtour de l'île où sont localisées la plupart des habitations. Cela signifie que le temps de résidence de l'eau souterraine est relativement élevé, et donc que l'écoulement est plutôt lent en regard de la faible distance de parcours entre la zone d'infiltration et la résurgence au fleuve.

6) *La rive sud* : le contexte hydrogéologique de la rive sud montre quelques variabilités. Cependant, le contexte stratigraphique dominant est caractérisé par des unités silto-argileuse de faible à très faible perméabilité, parfois recouverte d'un dépôt plus sableux de perméabilité moyenne. Quoique des unités fluvioglaciales sableuses aient été répertoriées sur la rive sud, l'aquifère régional prédominant est l'unité de roc fracturé composé d'un mélange de roches sédimentaires des Appalaches, telles que des shales, des grès, des conglomérats et des calcarénites.

Comme les autres aquifères fracturés de la CMQ, la perméabilité du roc varie de très faible à moyenne. L'aquifère de roc de la rive sud est majoritairement confiné, mais il peut être semi-confiné ou libre lorsque le roc est subaffleurant, notamment dans la partie nord-ouest de Lévis où les dépôts sont également plus sableux. L'écoulement régional s'effectue du sud-est vers le nord-ouest en direction du fleuve Saint-Laurent. La recharge dans le contexte de la rive sud varie de très faible à moyenne, compte tenu des différents degrés de confinement de l'aquifère rocheux et de la densité urbaine de certains secteurs.

L'eau souterraine montre une évolution géochimique intermédiaire, ce qui est cohérent avec les conditions de confinement de l'aquifère. L'eau souterraine prend ainsi source à plus grande distance, circule plus longtemps dans les fractures du roc et se charge en ions.

Vulnérabilité des aquifères

Sur le territoire de la CMQ, les secteurs où la vulnérabilité est la plus élevée se trouvent dans les vallées des Laurentides et sur le piémont laurentien. En effet, les grands complexes deltaïques et fluvioglaciales qui forment d'importants aquifères de dépôts meubles sont très vulnérables à la contamination. L'aquifère de roc fracturé au nord-est de la ville de Lévis est aussi très vulnérable. Les zones les moins vulnérables se retrouvent au centre de la ville de Lévis, dans la partie est de la MRC de La Côte-de-Beaupré et dans l'Agglomération de Québec, où d'importantes épaisseurs de dépôts de silt protègent l'aquifère de roc fracturé. La vulnérabilité varie de moyenne à élevée à l'île d'Orléans et sur le reste du territoire où le roc est subaffleurant.

Les paramètres ayant le plus de poids dans l'évaluation de la vulnérabilité sont la profondeur de l'aquifère, l'impact de la zone vadose et la recharge. Ces trois paramètres dépendent largement de la nature des dépôts de surface et des

contextes hydrostratigraphiques. Toutefois, d'importantes variations de la vulnérabilité sont observables dans la région. La grande diversité physiographique et géologique de la CMQ explique cette variabilité et souligne l'importance de faire des études locales détaillées pour mieux définir un secteur.

Les volumes d'eau souterraine prélevés par chaque municipalité ou ville de la CMQ pour l'utilisation résidentielle, industrielle, commerciale et institutionnelle ont été estimés. La MRC prélevant le plus d'eau souterraine, soit environ 5,4 Mm³/an, est la MRC de La Jacques-Cartier, dont le territoire est vaste et la recharge importante. L'Agglomération de Québec prélève des quantités du même ordre (5,4 Mm³/an), bien que seulement 12 % de sa population s'alimente en eau souterraine.

La Ville de Lévis et les MRC de La Côte-de-Beaupré et de L'Île-d'Orléans prélèvent chacun environ 1 Mm³/an d'eau souterraine. À l'île d'Orléans, cette ressource est particulièrement importante, car l'eau souterraine est la seule source d'eau potable. La consommation totale annuelle, excluant l'utilisation agricole, est estimée à 15 Mm³/an d'eau souterraine pour l'ensemble de la CMQ. En 2008, l'eau souterraine approvisionnait 21 % de la population.

