



Synthèse hydrogéologique du Shale d'Utica et des unités sus-jacentes (Lorraine, Queenston et dépôts meubles)

Stephan Séjourné, géo.
Xavier Malet et René Lefebvre

Rapport soumis à
Denis Lavoie, Commission Géologique du Canada
Charles Lamontagne, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Rapport de recherche I292

17 avril 2012

Le présent document a été réalisé dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique (ÉES) sur le gaz de schiste. Les auteurs sont responsables du choix et de la présentation des faits. Les opinions exprimées dans ce document sont celles des auteurs et n'engagent aucunement le comité de l'évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste ou le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.

La présente certifie que je suis l'auteur du document intitulé « **Synthèse hydrogéologique du Shale d'Utica et des unités sus-jacentes (Lorraine, Queenston et dépôts meubles)** » à l'exception de la section 3.1 rédigée par M. René Lefebvre, et que toutes les informations présentées dans le rapport et les annexes sont exactes, au mieux de mes connaissances.

Montréal, le 17 avril 2012




Stephan Séjourné, géo. (OGQ#1377)

Résumé

Le présent rapport a été rédigé dans le cadre d'un mandat donné à l'INRS-ETE par la Commission géologique du Canada (CGC) et le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) du Québec. Ce mandat impliquait la production d'une synthèse des connaissances et des données publiques disponibles sur le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes, sédiments quaternaires inclus, dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. L'objectif de cette synthèse est de supporter et orienter des travaux futurs destinés à évaluer le degré d'imperméabilité géologique des successions rocheuses entre les shales cibles pour l'exploitation du gaz de shale et les aquifères peu profonds, dans les dépôts meubles ou le roc fracturé. Cette synthèse doit notamment permettre de faire ressortir des régions ou des types de données pour lesquelles il y a peu d'information, guidant ainsi le choix de travaux futurs de recherche scientifique sur la problématique des gaz de shale au Québec.

Dans cette optique, le rapport est divisé en deux sections. La première section, géologique, met en contexte le Shale d'Utica et les groupes de Lorraine et de Queenston sus-jacents dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, présentant sommairement les relations tectoniques et stratigraphiques d'importance pour la présente étude. Elle s'attarde ensuite aux propriétés physiques et chimiques des différentes unités. Les principales sources de données consultées pour la géologie proviennent du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) et ont été fournies par la Chaire de recherche sur la séquestration géologique du dioxyde de carbone du Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE). La seconde section, hydrogéologique, documente l'état d'avancement des Programmes d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES) ainsi que les données disponibles pour caractériser l'environnement hydrogéologique peu profond (dépôts meubles et roc fracturé) et profond (roc). Les principales sources de données consultées pour l'hydrogéologie proviennent du MDDEP ainsi que du Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES) qui a réalisé des projets PACES dans diverses régions du Québec.

La zone d'intérêt pour le gaz de shale, telle que définie par le MRNF, s'étend à travers les Basses-Terres du Saint-Laurent de part et d'autre du fleuve Saint-Laurent, de Québec à Montréal et au Lac Champlain. L'examen des données géologiques de surface et de sous-surface indique qu'il est toutefois possible de restreindre cette zone, en particulier sur ses bordures ouest et nord-ouest, et que l'essentiel de l'effort de caractérisation hydrogéologique devrait porter sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent.

Le présent rapport démontre qu'il n'existe pas de réelle lacune géographique dans la couverture des données déjà disponibles (géologie et forages pétroliers et gaziers) ou qui seront disponibles au terme des Programmes d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES) actuellement en cours. Les projets PACES couvrent en effet l'ensemble de la rive sud du fleuve Saint-Laurent à l'intérieur de la zone d'intérêt. Quant aux données géologiques de sous-surface, elles demeurent certes plus lacunaires dans le secteur sud-est, qui correspond au domaine appalachien, mais

cette région ne paraît pas représenter un intérêt immédiat pour l'exploration – et *a fortiori* l'exploitation – du gaz de shale.

Plusieurs lacunes de nature thématique sont en revanche mises en lumière, notamment en ce qui a trait aux propriétés physiques et chimiques de l'environnement hydrogéologique profond. Si les principales caractéristiques des aquifères proches de la surface – dépôts meubles et roc fracturé peu profond – sont ou seront bien documentées grâce aux efforts de cartographie des aquifères initiés dans les années 1960 et qui culminent avec la réalisation des projets PACES en cours (compilation des données existantes, travaux de terrain et modélisation), la caractérisation de l'environnement hydrogéologique profond ne pourra être approchée que par l'intermédiaire des données disponibles pour les puits d'exploration pétrolière et gazière déjà forés. Une revue de détail de ces données géologiques a été réalisée afin d'orienter et de faciliter le travail d'intégration avec les données hydrogéologiques peu profondes. En particulier, le cadre tectonostratigraphique, la disponibilité des enregistrements diagraphiques et des carottes, ainsi que les propriétés physiques et chimiques du roc (composition minéralogique, pression, température, porosité et perméabilité notamment) font ici l'objet d'une synthèse détaillée. Ce travail de compilation s'accompagne d'un recensement des informations disponibles sur la nature des fluides documentés dans le roc et les dépôts meubles à partir des forages pétroliers et gaziers, en particulier les indices et analyses d'eau, de gaz et de pétrole.

Une grande partie des lacunes thématiques identifiées pourraient être comblées en tirant parti des données géologiques publiques inventoriées dans le présent rapport, au moins à une échelle semi-quantitative ou semi-régionale. La variabilité géologique naturelle, la répartition des lignes sismiques et des forages pétroliers et gaziers, de même que la nature et la qualité variables des données publiées pour ces forages, ne permettent cependant pas d'espérer caractériser l'environnement hydrogéologique profond avec le même degré de finesse que celui obtenu pour les dépôts meubles et le roc fracturé peu profond.

Remerciements

Les auteurs remercient toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce rapport en acceptant de fournir certains jeux de données. En particulier : Mme Édith Bourque (MDDEP) qui a donné l'autorisation d'utiliser les rapports d'étape des projets PACES; M. Guillaume Meyzonnat (GRIES) pour son support dans la cartographie des projets PACES; M. Normand Rousseau (MDDEP) qui a bien voulu transmettre aux auteurs la banque de données SIH; M. Robert Thériault (MRNF) qui a accepté de partager plusieurs rapports en cours de publication; Mme Karine Bédard, M. Félix-Antoine Comeau et M. Michel Malo (INRS-ETE) qui ont bien voulu transmettre aux auteurs l'essentiel des données SIGPEG acquises par l'INRS pour la Chaire de recherche sur la séquestration géologique du dioxyde de carbone de l'INRS-ETE.

Table des matières

1. Introduction.....	12
1.1. Description du mandat et objectifs du rapport.....	12
1.2 Produits livrables et limitations.....	12
1.3 Zone d'intérêt.....	13
1.4 Sources d'information.....	13
2. Synthèse des données géologiques.....	16
2.1 Cadre structural.....	16
2.1.1 Cadre structural général.....	16
2.1.2 Données géophysiques générales.....	19
2.1.3 Études structurales régionales et semi-régionales.....	20
2.1.4 Données de forages.....	21
2.2 Relations stratigraphiques.....	22
2.3 Régions d'intérêt pour le gaz de shale.....	25
2.4 Profondeur et épaisseur des unités.....	26
2.5 Assemblages pétrographiques et propriétés chimiques.....	31
2.5.1 Lithologie.....	31
2.5.2 Composition minéralogique.....	31
2.5.3 Composition élémentaire.....	33
2.6 Diagraphies et carottes.....	34
2.6.1 Diagraphies des dépôts meubles.....	34
2.6.2 Diagraphies du roc.....	35
2.6.3 Carottes.....	38
2.7 Propriétés physiques du roc.....	39
2.7.1 Pression.....	39
2.7.2 Température.....	43
2.7.3 Porosité, perméabilité et saturation.....	43

3. Synthèse des données hydrogéologiques	45
3.1 Description et avancement des projets de caractérisation régionale	46
3.1.1 Travaux historiques dans les années 1960, 1970 et 1980.....	46
3.1.2 Travaux de 1995 à 2008	51
3.1.3 Travaux du PACES à partir de 2009	54
3.1.4 Information hydrogéologique disponible dans la zone d'intérêt.....	55
3.2 Forages pour l'eau	61
3.3 Indices et analyses de gaz et pétrole.....	62
3.3.1 Dépôts meubles.....	62
3.3.2 Roc	63
3.4 Indices et analyses d'eau.....	66
3.4.1 Dépôts meubles.....	66
3.4.2 Roc	67
3.4.3 Salinité	69
4. Synthèse des données	71
4.1 Synthèse par bassin versant	71
4.2 Synthèse par projet PACES	73
4.3 Lacunes géographiques	75
4.4 Lacunes thématiques.....	76
5. Conclusions.....	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales sources d'information provenant du MRNF.....	15
Tableau 2 : Principales sources d'information d'origine universitaire.....	15
Tableau 3 : Puits comportant des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X.....	33
Tableau 4 : Unités stratigraphiques couvertes à plus 90% par une ou plusieurs diagraphies.....	37
Tableau 5 : Diagraphies disponibles pour le Groupe de Queenston.....	37
Tableau 6 : Unités stratigraphiques comportant des carottes.....	38
Tableau 7 : Synthèse des gradients de pression.	42
Tableau 8 : Synthèse des propriétés pétrophysiques pour le Shale d'Utica et le Groupe de Lorraine.	45
Tableau 9 : Sommaire des projets de cartographie des aquifères du Québec réalisés ou entrepris de 1995 à 2012.	48
Tableau 10 : Liste des produits livrables dans le cadre des projets PACES (MDDEP, 2011).	57
Tableau 11 : Inventaire des indices et analyses de pétrole documentés dans le Shale d'Utica et le Groupe de Lorraine.	65
Tableau 12 : Inventaire des puits profonds pour lesquels des indices d'eau douce et d'eau salée sont rapportés.	70
Tableau 13 : Synthèse des principaux jeux de données disponibles pour chaque bassin versant.	73
Tableau 14 : Synthèse des principaux jeux de données disponibles pour des projets PACES en cours à débiter.	1
Tableau 15 : Inventaire des forages pétroliers et gaziers réalisés ou prévus dans la zone d'intérêt et pour lesquels les données demeurent encore confidentielles à la date de rédaction du rapport.	76

Liste des figures

Figure 1 : Zone ayant un potentiel pour le gaz de shale (SIGPEG, 2010).	14
Figure 2 : Carte structurale régionale (simplifiée de MRNF, 2008).	17
Figure 3 : Ligne sismique M-2002 interprétée par Castonguay et al. (2006).	18
Figure 4 : Couverture sismique de la zone d'intérêt.	20
Figure 5 : Carte de localisation des affleurements.	22
Figure 6 : Carte géologique régionale adaptée de MRNF (2008).	23
Figure 7 : Carte de synthèse de la zone ayant un potentiel pour le gaz de shale.	26
Figure 8 : Carte de localisation des puits forés pour l'eau (SIH, 2012).	28
Figure 9 : Carte de localisation des puits forés pour le pétrole et le gaz naturel (SIGPEG, 2012).	29
Figure 10 : Diagraphies et stratigraphie du puits A167, illustrant les incohérences dans les profondeurs rapportées pour différentes unités.	30
Figure 11 : Localisation des puits avec des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X.	32
Figure 12 : Carte de localisation des puits comportant des diagraphies.	35
Figure 13 : Carte de localisation des puits carottés dans le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes.	39
Figure 14 : Carte de localisation des puits comportant des résultats d'essais aux tiges ou d'essais de production.	41
Figure 15 : Carte de localisation des projets de cartographie des aquifères entrepris entre 1995 et 2012.	47
Figure 16 : Projets de cartographie hydrogéologique dans la zone d'intérêt.	59
Figure 17 : Carte de localisation des indices de gaz et pétrole dans les dépôts meubles.	63
Figure 18 : Carte de localisation des indices et analyses de gaz et pétrole dans le roc.	64
Figure 19 : Carte de localisation des indices et analyses d'eau dans les puits forés pour le pétrole et le gaz naturel (SIGPEG, 2012) et dans les puits forés pour l'eau (SIGEOM, 2012).	67
Figure 20 : Carte de localisation des indices (SIGPEG, 2012) et analyses (SIGEOM, 2012; SIGPEG, 2012) d'eau dans le roc.	68
Figure 21 : Carte de localisation des bassins versants sous la responsabilité d'un OBV.	72

Liste des annexes

Annexe 1 : Puits de Gaz de Shale

Annexe 2 : Stratigraphie du Roc et des Dépôts Meubles

Annexe 3 : Diagraphies dans les Dépôts Meubles

Annexe 4 : Diagraphies dans le Roc

Annexe 5 : Carottes

Annexe 6 : Essais aux Tiges

Annexe 7 : Essais de Production

Annexe 8 : Indices de Gaz et Pétrole dans les Dépôts Meubles

Annexe 9 : Indices de Gaz dans les Puits d'Eau

Annexe 10 : Indices de Gaz et Pétrole dans le Roc

Annexe 11 : Analyses de Gaz et Pétrole dans le Roc

Annexe 12 : Indices d'Eau dans les Dépôts Meubles

Annexe 13 : Analyse d'Eau dans les Dépôts Meubles

Annexe 14 : Indices d'Eau dans le Roc

Annexe 15 : Analyses d'Eau dans le Roc

Les annexes sont disponibles au format numérique uniquement, sur un CD-Rom annexé au rapport.

1. Introduction

1.1. Description du mandat et objectifs du rapport

Le présent rapport a été rédigé dans le cadre d'un mandat donné à l'INRS-ETE par la Commission géologique du Canada (CGC) et le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) du Québec. Ce mandat impliquait la production d'une synthèse des connaissances et des données publiques disponibles sur le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes, sédiments quaternaires inclus, dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. L'objectif de cette synthèse est de supporter et orienter des travaux futurs destinés à évaluer le degré d'imperméabilité géologique des successions rocheuses entre les shales cibles pour l'exploitation du gaz de shale et les aquifères peu profonds, dans les dépôts meubles ou le roc fracturé. Cette synthèse doit notamment permettre de faire ressortir des régions ou des types de données pour lesquelles il y a peu d'information, guidant ainsi le choix de travaux futurs de recherche scientifique sur la problématique des gaz de shale au Québec.

Dans cette optique, le rapport est divisé en deux sections. La première section, à caractère essentiellement géologique, met tout d'abord en contexte le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, présentant sommairement les relations stratigraphiques et tectoniques d'importance pour la présente étude. Elle s'attarde ensuite aux propriétés physiques et chimiques des différentes unités. La deuxième section, hydrogéologique, documente l'état d'avancement des projets réalisés dans le cadre du Programmes d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES) ainsi que les données disponibles pour caractériser l'environnement hydrogéologique peu profond (dépôts meubles et roc fracturé) et profond (roc).

1.2 Produits livrables et limitations

Ce rapport est accompagné d'une annexe en format numérique qui comprend les cartes et tableaux du rapport, les annexes proprement dites sous la forme de données tabulaires, ainsi que les jeux de données géoréférencés.

L'étude se restreint à l'inventaire et à la synthèse des données publiques disponibles pour le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes, dépôts meubles inclus. Les jeux de données pour lesquels il faut acquitter des frais et dont nous avons tiré les informations compilées dans ce rapport ne sont pas retranscrits *in extenso* en annexe, seuls les produits finaux le sont : soient les données filtrées et corrigées au besoin. Les données d'ordre géotechnique (excavations, géothermie) n'ont pas été consultées.

L'étude se base sur des jeux de données publiés à des dates différentes, certains pouvant être sujets à évolution après avoir été transmis à l'auteur. Dans la mesure du possible, une vérification a été faite pour s'assurer que de nouvelles données ou de nouveaux éléments ne sont pas apparus après la transmission des données, et le cas échéant les informations ont été complétées.

Par ailleurs, les informations à caractère géologique n'ont encore jamais fait l'objet d'une revue de synthèse contrairement aux données hydrogéologiques, qui seront pour l'essentiel synthétisées dans les rapports d'étape et finaux des projets PACES. En conséquence, une attention particulière a été consacrée dans ce rapport à l'identification et la synthèse des jeux de données à caractère géologique.

1.3 Zone d'intérêt

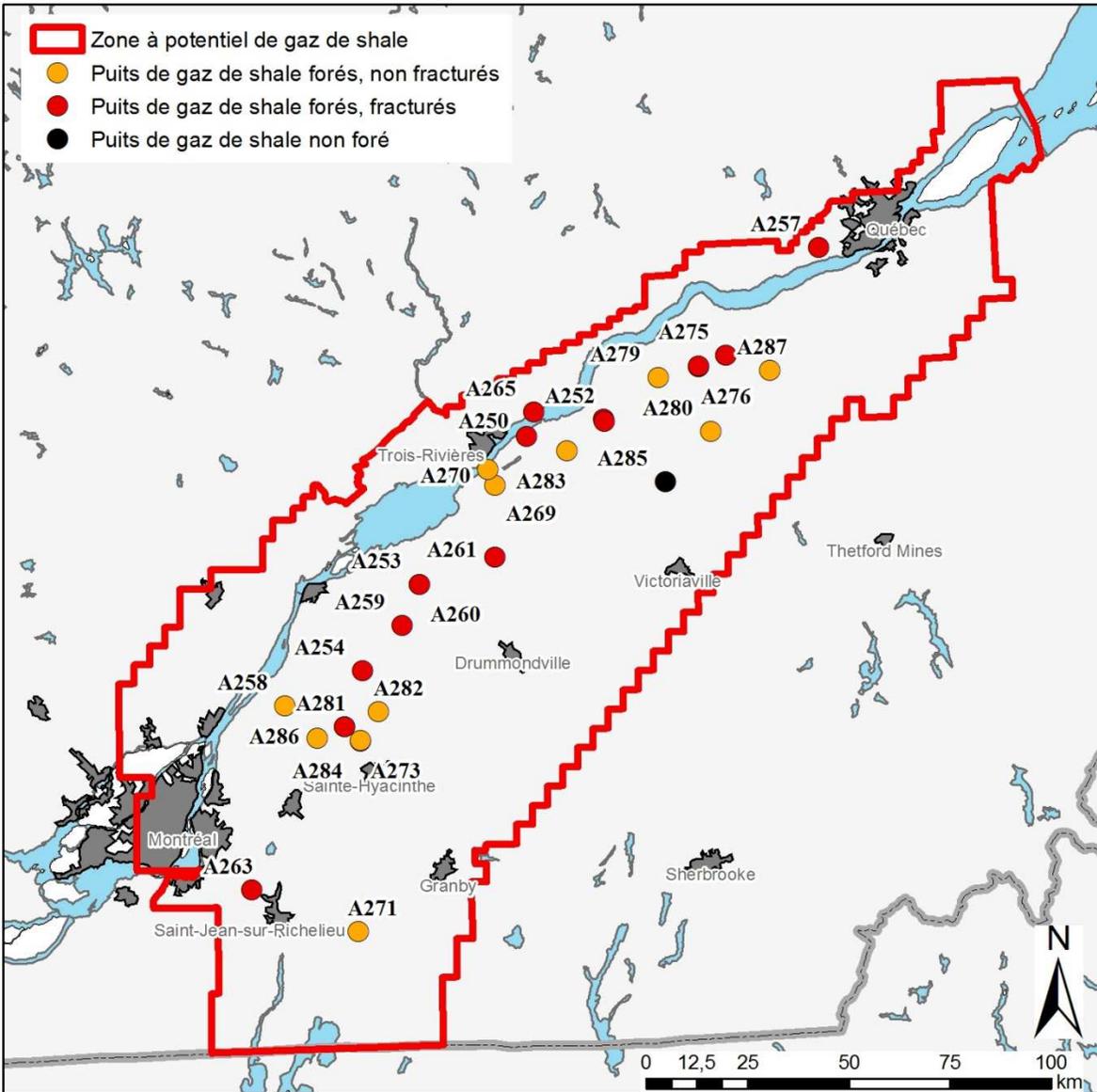
Une zone ayant un potentiel pour le gaz de shale a été définie par le MRNF en 2010 sur la base des limites de permis d'exploration pour le pétrole et le gaz naturel en vigueur à l'époque (SIGPEG, 2010). C'est cette zone qui a été retenue pour la présente étude, même s'il est possible de resserrer quelque peu la zone d'intérêt sur la base d'arguments géologiques, tel qu'il sera discuté dans la section 2.3.

Comme le montre la Figure 1, cette zone recouvre l'essentiel de la région géologique dite des Basses-Terres du Saint-Laurent et s'étend de la ville de Québec jusqu'à Montréal et la frontière avec les États-Unis, occupant une superficie d'environ 20570 km².

1.4 Sources d'information

Les principales sources d'information utilisées proviennent du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec. Les données en provenance du MDDEP (Tableau 9, section 3.1) portent essentiellement sur les projets de cartographie hydrogéologique réalisés avant ou dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES) et sur les puits forés pour l'approvisionnement en eau (Système d'information hydrogéologique, SIH, 2012).

Les jeux de données issus du MRNF (Tableau 1) peuvent être divisés en deux catégories principales, soit les données pétrolières et gazières (Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier, SIGPEG, 2012) et les informations d'ordre géologique général et du domaine minier (Système d'information géominère, SIGEOM, 2012). Il est à noter que l'essentiel des données SIGPEG utilisées dans ce rapport ont été fournies par la Chaire de recherche sur la séquestration géologique du dioxyde de carbone du Centre Eau Terre Environnement de l'INRS.



Fig

ure 1 : Zone ayant un potentiel pour le gaz de shale (SIGPEG, 2010).

La carte montre aussi les localisations des puits de gaz de shale (compilées à l'Annexe 1). La zone à potentiel pour le gaz de shale correspond à la zone d'intérêt du présent rapport.

SIGPEG - Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier
Banque de données des puits pétroliers et gaziers
Rapports de forage et diagraphies
Rapports d'activité (géologie pétrolière et géophysique)
Historique des activités de forage et de complétion depuis 2008
Levés géophysiques Lignes sismiques 2D Levé aéromagnétique haute résolution
Données cartographiques Délimitation de la zone d'intérêt pour le Shale d'Utica Localisation des forages pétroliers et gaziers Localisation des lignes sismiques Compilation géologique de surface Interprétation des failles normales en sous-surface
SIGEOM - Système d'information géominière
Documents Examine et levés Rapports géologiques
Données géoréférencées Géologie Géochimie

Tableau 1 : Principales sources d'information provenant du MRNF.

Ces banques de données sont complétées par diverses sources d'information (Tableau 2) d'origine essentiellement universitaire, en provenance notamment du Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES) et de la Chaire de recherche sur la séquestration géologique du dioxyde de carbone (INRS-ETE). Enfin, des publications scientifiques avec ou sans comité de lecture ont également été consultées.

GRIES - Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines
Couverture cartographique des projets PACES en cours et soumis (les données de ces projets seront diffusées par le MDDEP à partir de 2013)
INRS-ETE - Chaire de recherche sur la séquestration géologique du dioxyde de carbone
Interprétation des contacts stratigraphiques dans les puits pétroliers et gaziers

Tableau 2 : Principales sources d'information d'origine universitaire.

2. Synthèse des données géologiques

2.1 Cadre structural

2.1.1 Cadre structural général

L'évolution du cadre tectonostratigraphique général des séries sédimentaires du sud du Québec a été résumée par St-Julien et Hubert (1975). La Figure 2 illustre les principaux ensembles tectoniques qui forment l'architecture de la région d'étude, à savoir le socle grenvillien, la Plate-forme des Basses-Terres du Saint-Laurent (domaine autochtone) composée de roches cambriennes et ordoviciennes peu déformées et le domaine appalachien (domaine allochtone) composé de roches cambriennes à dévoniennes fortement plissées et faillées. La limite entre les deux domaines est désignée sous le nom de Ligne de Logan, une série de failles inverses à faible pendage. On peut aussi distinguer un domaine intermédiaire (domaine parautochtone ou « zone de failles imbriquées »), constitué de roches de la plate-forme imbriquées et chevauchées au cours de l'orogénie taconienne. Des intrusions magmatiques mésozoïques (Collines montérégiennes) percent localement les séries sédimentaires. Si le cadre défini par St-Julien et Hubert (1975) n'a pas été modifié sensiblement par la suite, il a cependant été raffiné avec des implications importantes pour la problématique du gaz de shale, notamment en ce qui a trait à l'évolution tardi- et post-taconienne. Ces études régionales et semi-régionales sont documentées dans la section 2.1.3.

La Figure 3 représente un transect structural perpendiculaire au grain structural régional, élaboré à partir de la ligne sismique régionale M-2002 (Castonguay et al., 2006). Cette coupe illustre la géométrie en sous-surface des séries sédimentaires de la plate-forme autochtone (dominée par un style structural en extension dans les carbonates et en contraction dans les flyschs sus-jacents) et de la zone de failles imbriquées parautochtone (géométrie dominée par un style structural en contraction). L'unité représentée en brun dans la Figure 3 correspond au Shale d'Utica. Cette coupe révèle notamment que le Shale d'Utica est présent non-seulement dans la plate-forme autochtone de part et d'autre de la Ligne de Logan, mais aussi dans la zone de failles imbriquées sous le domaine appalachien.

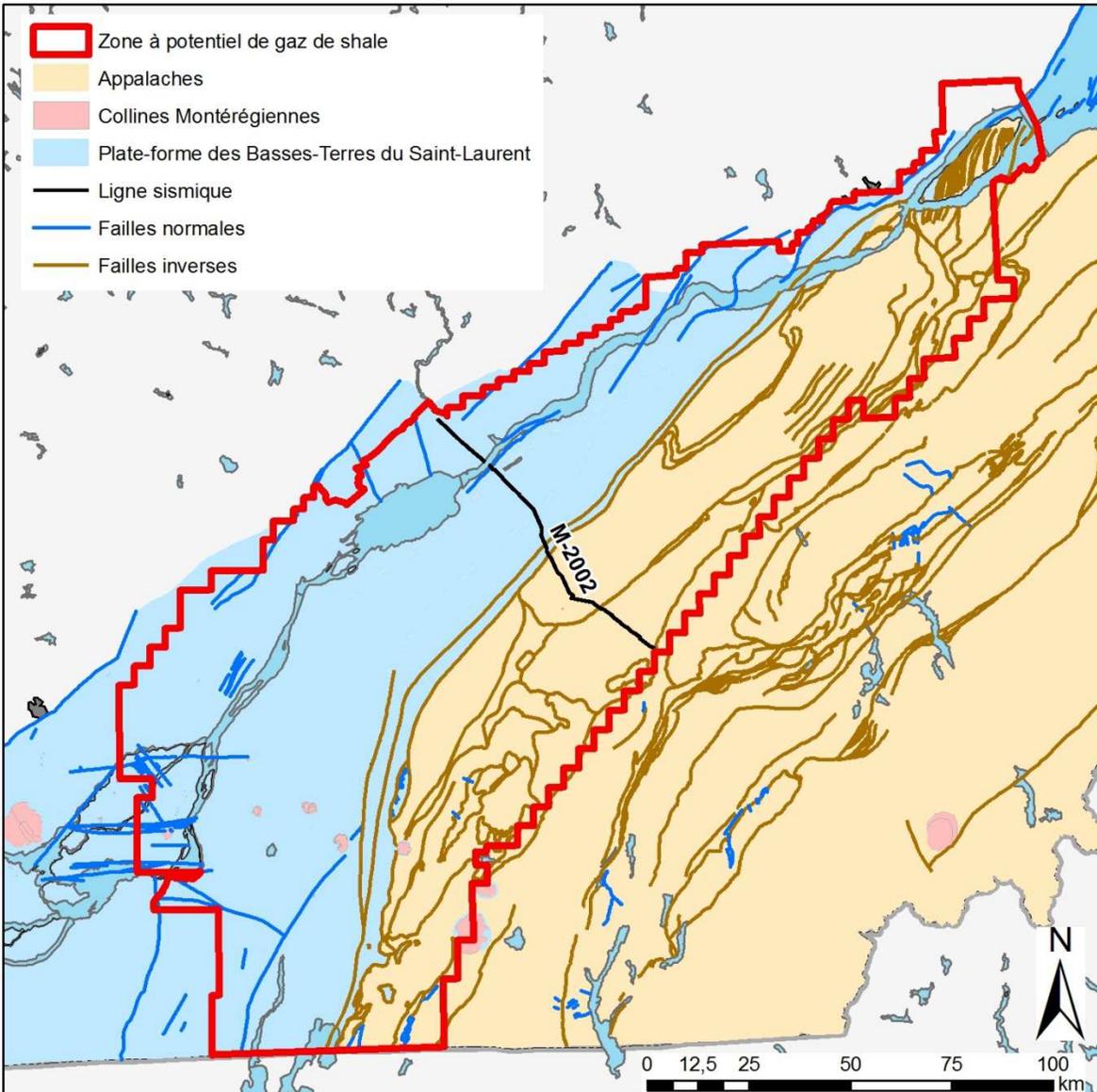


Figure 2 : Carte structurale régionale (simplifiée de MRNF, 2008).
 Le secteur laissé en blanc au nord correspond au socle grenvillien. Le tracé des lignes sismiques correspond aux lignes illustrées dans la Figure 3.

NO

SE

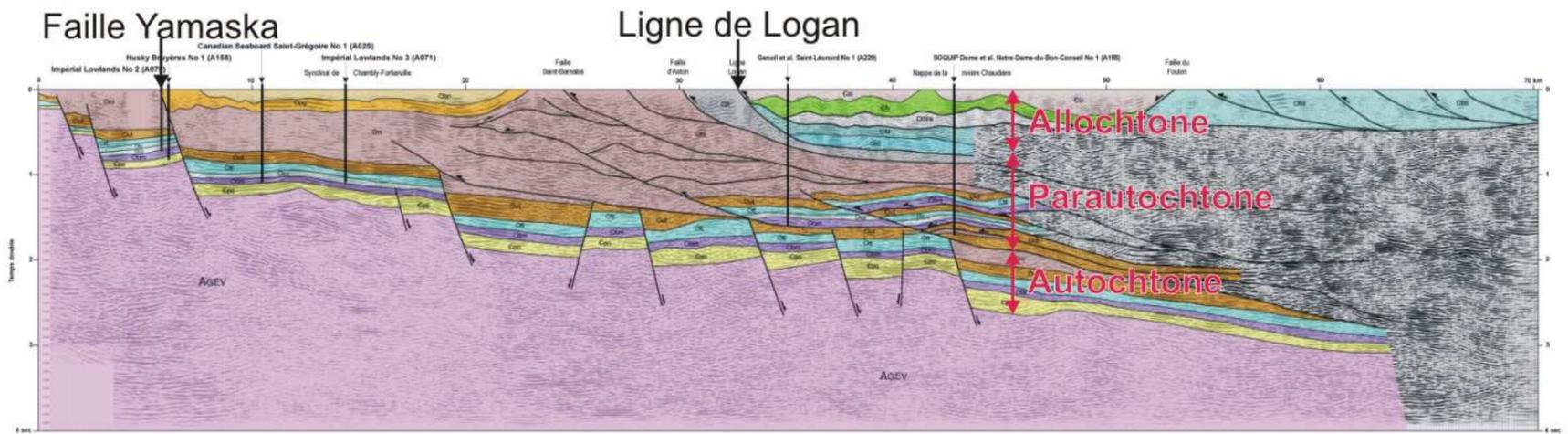


Figure 3 : Ligne sismique M-2002 interprétée par Castonguay et al. (2006).

La ligne illustre le style structural dans la région d'intérêt ainsi que la position stratigraphique du Shale d'Utica (figuré brun). La localisation de cette ligne est indiquée sur la Figure 2.

2.1.2 Données géophysiques générales

Plusieurs levés géophysiques aéroportés couvrent la région à l'étude (Thériault, 2012a). Ces levés présentent un intérêt indirect pour la caractérisation hydrogéologique du roc dans la mesure où ils permettent de mieux définir l'architecture générale de la région, notamment en ce qui a trait à la relation entre le socle grenvillien et la plate-forme, en particulier la présence des failles normales. Les dykes associés aux Collines montérégiennes sont également mis en évidence dans le levé aéromagnétique, ce qui permet d'avoir une idée de leur répartition et de leur orientation dans une région où les affleurements sont peu nombreux. Parce que les dykes représentent des discontinuités dans l'architecture des séries sédimentaires, leur présence et leur géométrie doivent être prises en compte dans l'élaboration des modèles hydrogéologiques. À cet égard, les données aéromagnétiques sont incontournables, puisque le pendage généralement sub-vertical des dykes rend souvent ceux-ci indétectables en sismique.

La région à l'étude est également couverte par un réseau de lignes sismiques qui permettent d'obtenir une image fine de la géométrie en sous-surface. La Figure 4 illustre la répartition de ces lignes à l'intérieur de la région d'étude : le cœur de la région présente une bonne couverture sismique, mais qui s'amointrit vers le sud-est et devient quasi-inexistante à l'ouest. En règle générale, les lignes sismiques acquises dans les années cinquante et soixante sont de mauvaise qualité et n'offrent pas de possibilité de retraitement. Les lignes acquises dans les années soixante-dix et quatre-vingt sont d'une qualité acceptable qui peut être améliorée avec un retraitement. Les lignes plus récentes sont de bonne qualité mais se retrouvent rarement dans le domaine public. Il est à noter également que la dernière mise à jour du document utilisé pour réaliser la carte de la Figure 4 date de 2008, et que de nouvelles lignes sismiques ont été acquises depuis dans la région d'étude, en 2008, 2009 et 2010. Le détail pour ces campagnes d'acquisition récentes est disponible sur SIGPEG (opérateur, contracteur, longueur linéaire et dates).

Une carte de synthèse a été réalisée par SOQUIP (1984), à partir des lignes sismiques de SOQUIP, qui présente la géométrie des failles de socle et du toit des roches du Groupe du Trenton, c'est-à-dire de la base du Shale d'Utica. Le contour de cette carte est représenté sur la Figure 4. Cette carte présente l'intérêt d'illustrer la géométrie générale de la base du Shale d'Utica, mais présente certaines limitations. En particulier, elle ne donne pas d'information sur l'extension verticale des failles au-delà du Shale d'Utica, elle présente la profondeur de la base du shale en millisecondes et non en profondeur, et le tracé des failles est interprété et sujet à caution dans les zones où il est interpolé entre deux lignes sismiques éloignées. Par ailleurs, une limitation commune à cette carte et à toutes les lignes sismiques est que les failles de dimensions modestes (sub-sismiques) ne sont pas détectables.

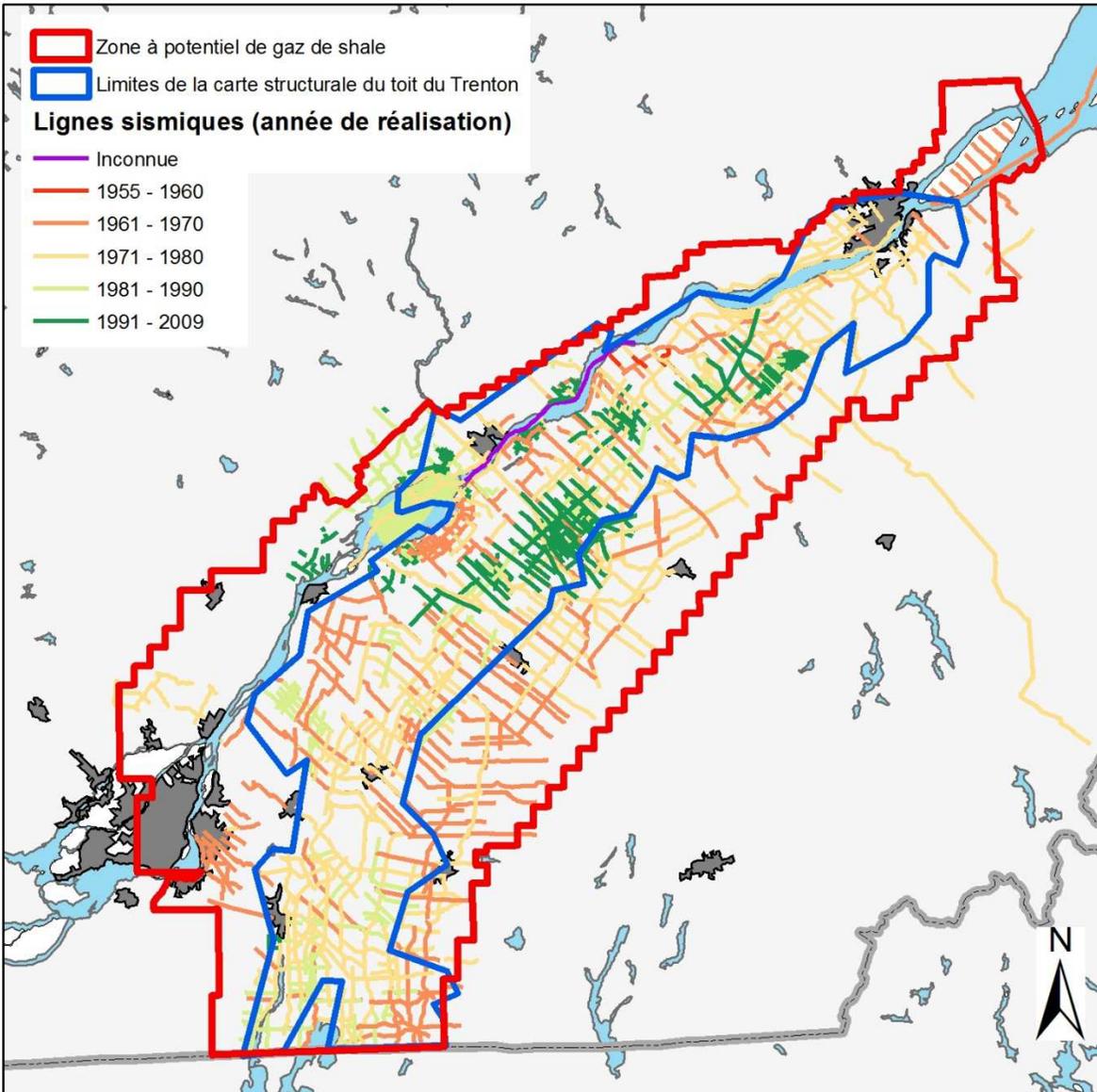


Figure 4 : Couverture sismique de la zone d'intérêt.

Le polygone bleu indique les contours approximatifs de la carte structurale du toit du Trenton réalisée par SOQUIP (1984).

2.1.3 Études structurales régionales et semi-régionales

Le cadre tectonique général de la région à l'étude, tel que défini par St-Julien et Hubert (1975), a été raffiné par un certain nombre d'études structurales à caractère régional ou semi-régional. Plusieurs familles de structures plicatives et cassantes postérieures à la pulsation orogénique principale (orogénie taconienne à l'Ordovicien Supérieur) ont ainsi été reconnues à l'affleurement et en sismique. Les travaux les plus pertinents et les plus récents sont les suivants : Granger (1974), Faure et al. (1996a, 1996b, 2004 et 2006), Rocher et al. (2003), Séjourné et al. (2003), Comeau et al. (2004), Konstantinovskaya et al. (2009), et Séjourné et Malo (2007). Certains de ces travaux reposent entièrement sur des données de

terrain, d'autres intègrent aussi des données de sismique pour élaborer un modèle structural plus complet.

Des travaux complémentaires sont encore possibles, selon des thématiques spécifiques, à partir des zones d'affleurements présentes dans la région à l'étude. La Figure 5 illustre la distribution de ces affleurements tels qu'ils sont recensés par le MRNF (banque de données SIGEOM). Il y a de fait de nombreux affleurements indiqués sur des cartes géologiques anciennes qui n'ont pas été intégrés dans SIGEOM. Dans le cadre du projet PACES réalisé en Montérégie Est, les affleurements indiqués sur les cartes géologiques ont été numérisés et intégrés dans la base de données de ce projet (Figure 5), notamment pour guider l'interpolation des épaisseurs de dépôts meubles.

2.1.4 Données de forages

Les forages réalisés pour l'exploration de pétrole et de gaz naturel peuvent à l'occasion fournir des informations sur la structure des séries sédimentaires traversées. Ainsi la présence d'une unité et son épaisseur constituent des informations de base toujours disponibles. Le pendage d'une couche peut être déduit par la corrélation de plusieurs puits. Les diagraphies à vocation structurale de type pendage-mètre (*dipmeter*) ou *resistivity imager* sont peu courantes dans la région (voir la section 2.6) et seul le premier type est du domaine public. Lorsqu'elles sont disponibles, elles fournissent des informations sur le pendage des couches, la présence de failles, et l'orientation des réseaux de fractures. Ces diagraphies sont essentiellement réservées au domaine appalachien, mais peuvent occasionnellement se rencontrer dans la plate-forme autochtone, comme dans le cas du puits A189. Plus rarement, les diagraphies de température peuvent permettre d'identifier les points d'entrée des fluides vers le trou de forage, et par conséquent aider à définir des intervalles naturellement fracturés. Les rapports géologiques de fin de forage comportent aussi souvent des indications sur la présence de fractures, veines et failles. Plus rarement, les rapports quotidiens de forages fournissent également des indices sur la présence de réseaux de fractures ou de failles et sur leur connectivité quand il est fait mention d'une perte de circulation (ainsi dans le cas du puits A238, une faille a été rencontrée de 403 à 408 mètres et a occasionné une perte de 5 m³ de boue de forage).

Ces informations sont disponibles à l'état brut, pour chaque puits et dans chaque rapport de forage, dans la banque de données SIGPEG. Ces données sont généralement difficiles à exploiter car elles ne sont pas homogènes, parfois manuscrites pour les puits les plus anciens, et présentent souvent un caractère interprétatif dans le cas des rapports géologiques. Aucune tentative n'a été faite ici pour synthétiser ces informations, mais il convient de souligner l'intérêt que ces données peuvent revêtir pour établir les paramètres géométriques d'un modèle hydrogéologique du roc à l'échelle locale à proximité d'un ou plusieurs puits forés pour le pétrole et le gaz naturel.

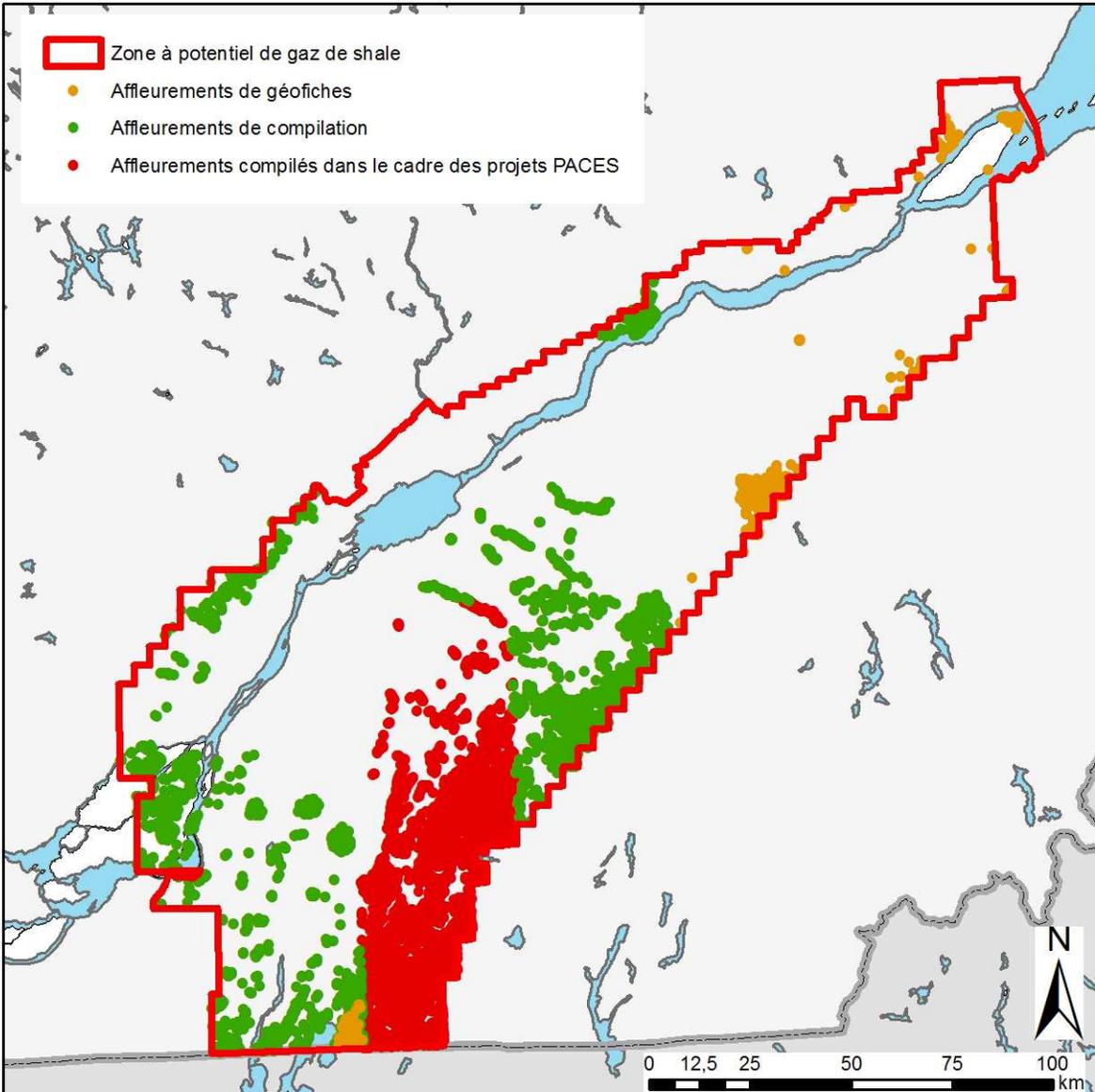


Figure 5 : Carte de localisation des affleurements.

Ces localisations proviennent de géofiches et des affleurements de compilation (SIGEOM, 2012), ainsi que de la numérisation de cartes géologiques dans la région du projet PACES en Montérégie Est.

2.2 Relations stratigraphiques

Les unités d'intérêt pour la présente étude (Figure 6) correspondent à la partie supérieure de la séquence sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent. Cette séquence repose en discordance sur le socle grenvillien et débute avec les grès fluviatiles du Groupe de Potsdam (Cambrien). Elle se poursuit avec les dolomies et calcaires dolomitiques du Groupe de Beekmantown (Ordovicien inférieur). De l'Ordovicien précoce à moyen, des faciès d'eau de plus en plus profonde succèdent aux dépôts de plate-forme proprement dits, définissant un bassin d'avant-pays. Il s'agit, tour à tour, des groupes de Chazy (calcaires argileux et gréseux), Black River (calcaires et grès) et Trenton (calcaires argileux et shales). La

séquence de flyschs qui succède aux roches de la plate-forme carbonatée à l'Ordovicien supérieur débute avec le Shale d'Utica et se poursuit avec le Groupe de Lorraine (formations de Nicolet puis de Pontgravé). À l'extrême sud de la région à l'étude autour du Lac Champlain, des unités d'âge équivalent sont également documentées, soit la Formation de Stony Point équivalente au Shale d'Utica et la Formation d'Iberville équivalente à la Formation de Nicolet du Groupe de Lorraine. Enfin, une séquence régressive souligne, avec le Groupe de Queenston et son unique formation (Formation de Bécancour), le comblement final du bassin et la fin du cycle transgression-régression à l'Ordovicien tardif.

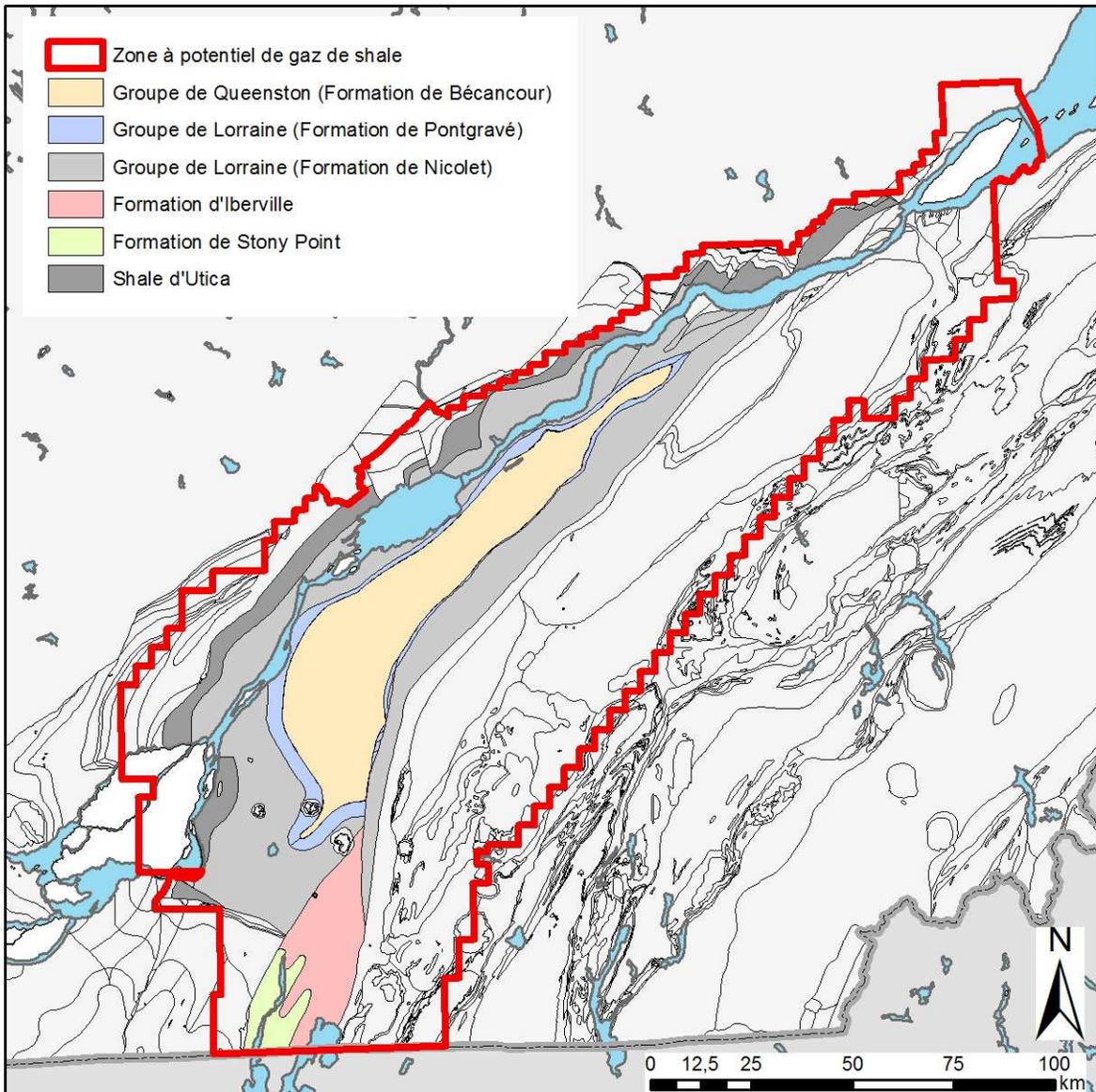


Figure 6 : Carte géologique régionale adaptée de MRNF (2008).

Les unités stratigraphiques en couleur correspondent aux unités documentées dans la section géologie du présent rapport. Il est à noter que le Shale d'Utica cartographié dans la région de Montréal correspond en fait au Groupe de Lorraine, qui repose directement sur le Groupe de Trenton, le Shale d'Utica *stricto sensu* étant absent dans cette région.

Le contact entre le Groupe de Trenton et le Shale d'Utica est graduel (transitionnel) et caractérisé par une augmentation progressive des lits de shale par rapport aux lits de calcaire. En affleurement, le contact est défini là où la proportion de shale calcaireux devient supérieure à celle de calcaire argileux (Thériault, 2012a). Les critères retenus pour définir le contact sur une base diagraphique sont discutés par Comeau et al. (2012) et Thériault (2012a et 2012b). La Formation de Tétreauville, qui constitue le sommet du Groupe de Trenton dans les affleurements à l'ouest de Trois-Rivières, peut parfois être confondue avec la base du Shale d'Utica en forage, ce qui contribue à obscurcir les relations stratigraphiques obtenues à partir des données pétrolières et gazières. Au sein du Shale d'Utica, Thériault (2012a) distingue deux unités (Utica Inférieur et Utica Supérieur) sur la base de critères diagraphiques, minéralogiques et géochimiques.

Le Shale d'Utica, dans son acception moderne (Trempe, 1978; Lavoie et al., 2008; Thériault, 2012a), est un shale calcaireux, ce qui le distingue des shales non-calcaireux du Groupe de Lorraine. Cette définition n'a pas toujours été appliquée par le passé et les cartes géologiques identifient encore localement un shale non-calcaireux (Groupe de Lorraine) au Shale d'Utica. Cette incohérence est particulièrement notable dans la région de Montréal (Trempe, 1978) où de grandes étendues de Shale d'Utica cartographiées en surface correspondent en fait au Groupe de Lorraine, celui-ci reposant directement sur les calcaires argileux de la Formation de Tétreauville du Groupe de Trenton.

Le contact entre le Shale d'Utica et la Formation de Nicolet du Groupe de Lorraine est graduel (transitionnel) dans la partie nord-ouest de la région à l'étude, typiquement au nord du fleuve Saint-Laurent, mais devient de plus en plus marqué et possiblement discordant vers le sud-est sur la base des données de forage. Au sein du Groupe de Lorraine, le contact entre les formations de Nicolet et Pontgravé est graduel et caractérisé par un accroissement des interlits de calcaire.

Finalement, le contact entre les groupes de Lorraine et Queenston est lui aussi graduel et marqué par un accroissement des interlits de grès et de calcaire. La Formation de Bécancour est la dernière de la séquence sédimentaire d'âge Ordovicien observable dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Sur une base lithologique et stratigraphique, elle a parfois été corrélée par les foreurs à la Formation de Medina présente notamment en profondeur dans l'ouest de l'État de New York, où elle constitue un réservoir de type compact (*tight sand*).

La nomenclature stratigraphique des unités considérées ici a évolué avec le temps, ce qui obscurcit parfois les relations stratigraphiques, en particulier dans les rapports géologiques des puits forés pour le pétrole et le gaz naturel. Dans le cadre de la présente étude, rapport et annexes, la terminologie a été homogénéisée autant que possible en suivant le Lexique stratigraphique canadien (Globensky, 1993). Certaines définitions stratigraphiques rapportées dans les rapports de fin de forage demeurent obscures (« Lorraine moyen ») ou imprécises (« Lorraine » indifférencié). Dans ces derniers cas le nom original a été conservé afin d'éviter toute interprétation abusive.

Les principales références à consulter pour clarifier la terminologie et les relations stratigraphiques pour le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes sont les suivantes : Trempe (1978), Globensky (1993), Lavoie et al. (2008), Comeau et al. (2012) et Thériault (2012a). Il n'existe pas encore de modèle stratigraphique

unifié à l'échelle des Basses-Terres du Saint-Laurent pour le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes, qui prenne en compte à la fois les relations observées à l'affleurement et celles en sous-surface et qui permette d'intégrer la définition moderne des unités, leurs contacts graduels ou transitionnels, et les possibles hiatus documentés à l'échelle locale. Un tel modèle est presque achevé pour le Shale d'Utica (Trempe, 1978; Lavoie et al., 2008; Thériault, 2012a), pour lequel l'intégration affleurements-diagraphies demeure toutefois à réaliser. L'essentiel du travail de synthèse demeure à faire pour les groupes de Lorraine et Queenston.

2.3 Régions d'intérêt pour le gaz de shale

La zone présentant un potentiel pour le gaz de shale, telle que définie par le MRNF, correspond à la limite des permis d'exploration dans lesquels l'exploration pour le Shale d'Utica est active ou proposée. Des limites plus strictes peuvent être déterminées sur la base d'arguments géologiques.

Ainsi, Thériault (2012a) identifie trois corridors d'exploration séparés par la Faille Yamaska et la Ligne de Logan (Figure 7). Le premier corridor correspond à la partie la moins profonde du Shale d'Utica, entre 0 et 800 m environ. Le corridor central est celui qui a reçu à ce jour le plus d'attention de la part de l'industrie et le Shale d'Utica y est rencontré entre 1200 et 2500 m environ, la profondeur augmentant vers le sud-est. Le troisième corridor, enfin, est limité au nord-ouest par la Ligne de Logan. Le Shale d'Utica y est rencontré à grande profondeur dans les écailles de la zone de failles imbriquées (domaine parautochtone) mais aussi, potentiellement, dans le domaine autochtone non-chevauché sous-jacent (Figure 3).

Cette distinction des corridors d'exploration proposée par Thériault (2012a) a le mérite de poser des limites relativement claires pour le corridor central, même si son extension au nord-est et au sud-ouest demeure imprécise, mais elle ne permet pas de circonscrire précisément les limites externes de la zone présentant un potentiel pour le gaz de shale.

De façon conservatrice, la limite occidentale peut certainement coïncider avec la bande d'affleurement du Shale d'Utica et de son équivalent latéral, la Formation de Stony Point (Figure 7), auquel cas une portion étroite, mais non négligeable, de la zone définie sur la base des permis d'exploration n'offre pas d'intérêt pour le gaz de shale. Cette limite occidentale pourrait par ailleurs être déplacée vers l'est, au moins dans la région de Montréal, le Shale d'Utica *stricto sensu* n'étant pas présent dans cette région (Trempe, 1978).

La limite orientale est plus ardue à identifier, et ne peut l'être qu'à l'aide de la sismique. Si quelques puits pétroliers et gaziers ont documenté la présence du Shale d'Utica dans les écailles du corridor 3, l'existence du shale autochtone dans ce corridor et à fortiori son potentiel pour le gaz de shale demeurent spéculatifs. A ce jour, un seul puits a été foré pour le shale dans ce corridor, proche de la limite avec le corridor central. Il s'agit du puits A285, pour lequel les données sont encore confidentielles. Ainsi, seules les interprétations sismiques (Figure 3) supportent présentement la présence de Shale d'Utica autochtone dans le corridor 3.

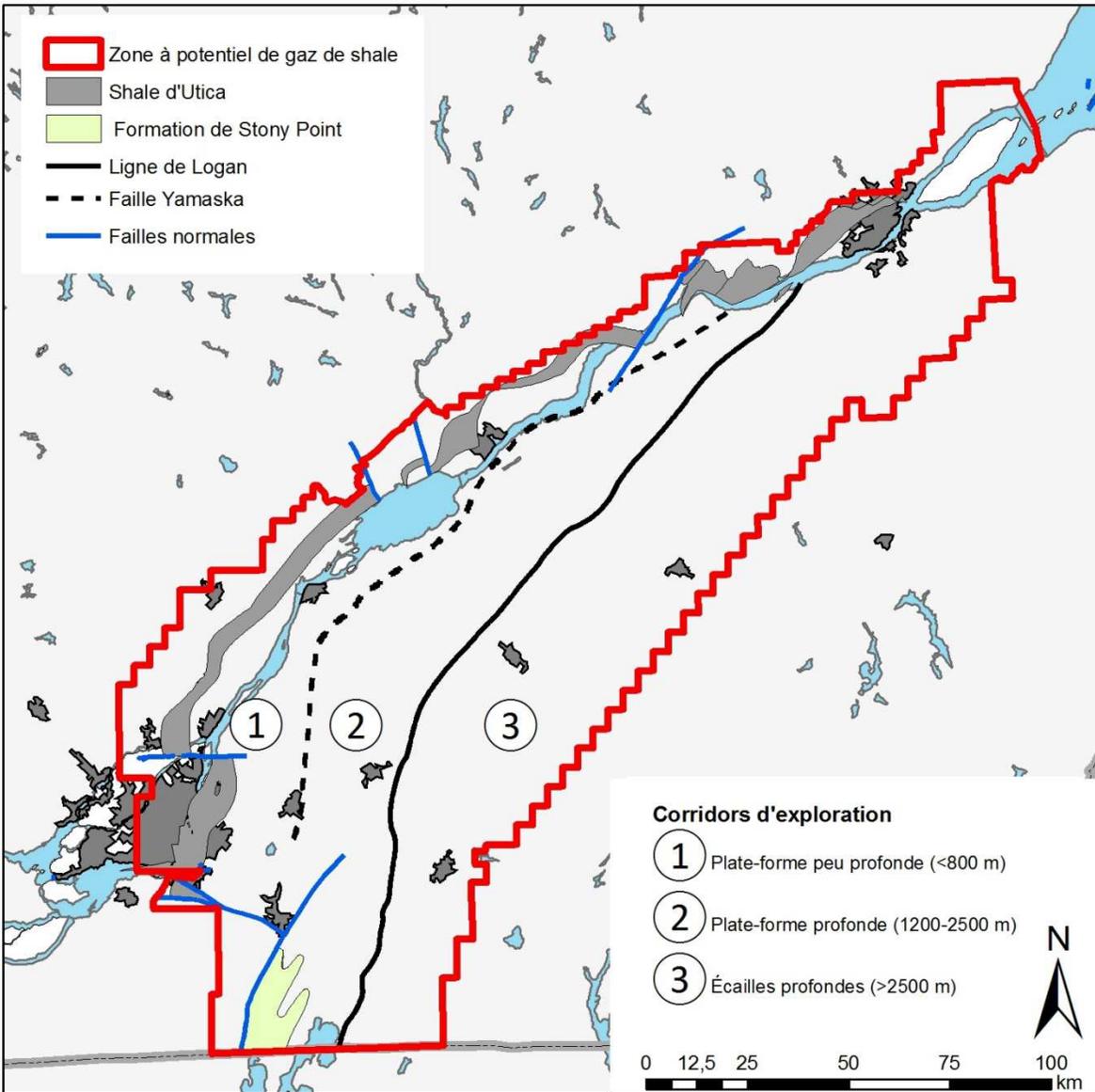


Figure 7 : Carte de synthèse de la zone ayant un potentiel pour le gaz de shale. La carte montre les subdivisions à l'intérieur de cette zone selon Thériault (2012a), et limites d'affleurement pour le Shale d'Utica ainsi que l'unité équivalente Stony Point.

2.4 Profondeur et épaisseur des unités

L'épaisseur des dépôts meubles et la profondeur du roc peuvent être estimées à partir de deux jeux de données. Le jeu de plus complet correspond à la banque de données des puits forés pour l'eau (SIH). La couverture spatiale de ces données est très bonne (Figure 8), seulement limitée par le réseau hydrographique (fleuve Saint-Laurent et lac Saint-Pierre) et la salinité des eaux souterraines au sud du lac Saint-Pierre qui fait en sorte que peu de forages pour l'eau aient été réalisés. Les puits forés pour le

pétrole et le gaz naturel permettent également d’apprécier l’épaisseur des dépôts meubles et la profondeur du roc. Dans le cas des puits de la série « B » (SIGPEG), qui correspond aux puits de moins de 500 pi (152,4 m) de profondeur, une description précise et la profondeur des différentes unités qui constituent les dépôts meubles est souvent disponible dans les rapports géologiques de fin de forage. Des diagraphies permettent occasionnellement de raffiner les contacts (section 2.6.1). Ces puits peu profonds sont pour l’essentiel concentrés le long du fleuve Saint-Laurent (Figure 9). Au sud du fleuve, seule la profondeur au roc peut être estimée, de façon indirecte et approximative, grâce à la profondeur du conducteur installé pour chaque forage de la série « A » (SIGPEG). Ces données de la série A sont difficilement exploitables et peu fiables en regard de la qualité du jeu de données disponible pour les puits forés pour l’eau (SIH). De plus, les projets PACES, qui font la cartographie des ressources en eau souterraine, produisent des cartes de l’épaisseur des dépôts meubles à partir des puits forés pour l’eau inventoriés dans le SIH ainsi que de puits documentés dans des rapports et non compilés dans le SIH (Section 3.1.4).

La profondeur et la puissance du Shale d’Utica et des unités sus-jacentes peut être définie de manière approximative sur la base des relations stratigraphiques et structurales observables à l’affleurement et d’après les rapports géologiques des forages profonds de la série « A » (SIGPEG). La densité des points de contrôle pour les forages profonds est bonne le long du fleuve Saint-Laurent mais décroît rapidement vers le sud-est (Figure 9).

L’épaisseur du Shale d’Utica varie de la marge nord-ouest vers le cœur du bassin, passant d’environ 100 m au nord du fleuve Saint-Laurent à plus de 200 m au sud de la Faille Yamaska et plus de 600 m dans la région du lac Champlain. L’épaisseur maximale du Groupe de Lorraine peut atteindre 2500 m dans le cœur du bassin. En forage, l’épaisseur maximale intersectée est d’environ 1280 m pour la Formation de Nicolet et d’environ 275 m pour la Formation de Pontgravé. Enfin, l’épaisseur maximale de la Formation de Bécancour ne semble pas rencontrer de consensus : un forage exploratoire (A023) suggère que l’épaisseur de cette formation pourrait aller jusqu’à 635 m et Globensky (1993) propose le chiffre de 700 m, mais de façon plus conservatrice les données de forages indiquent une épaisseur maximale de l’ordre de 375 m.

Le détail des épaisseurs et profondeurs disponibles pour le Shale d’Utica et les unités sus-jacentes est donné en annexe (Annexe 2).

La Figure 10 souligne la nécessité d’établir une définition consensuelle et non-ambigüe des limites inférieure et supérieure du Shale d’Utica à partir des diagraphies. Les profondeurs de ces contacts, et par conséquent l’épaisseur du Shale d’Utica, peuvent varier de façon significative selon la définition retenue. Afin d’éviter toute ambiguïté, la référence utilisée dans le cadre du présent rapport est celle des profondeurs indiquées dans les rapports de fin de forage originaux et compilées dans la banque de données SIGPEG. Il s’agit toujours de profondeurs et d’épaisseurs mesurées et non pas absolues, si bien que ces valeurs sont toujours apparentes et peuvent différer sensiblement des valeurs réelles calculées en tenant compte de la déviation des forages.

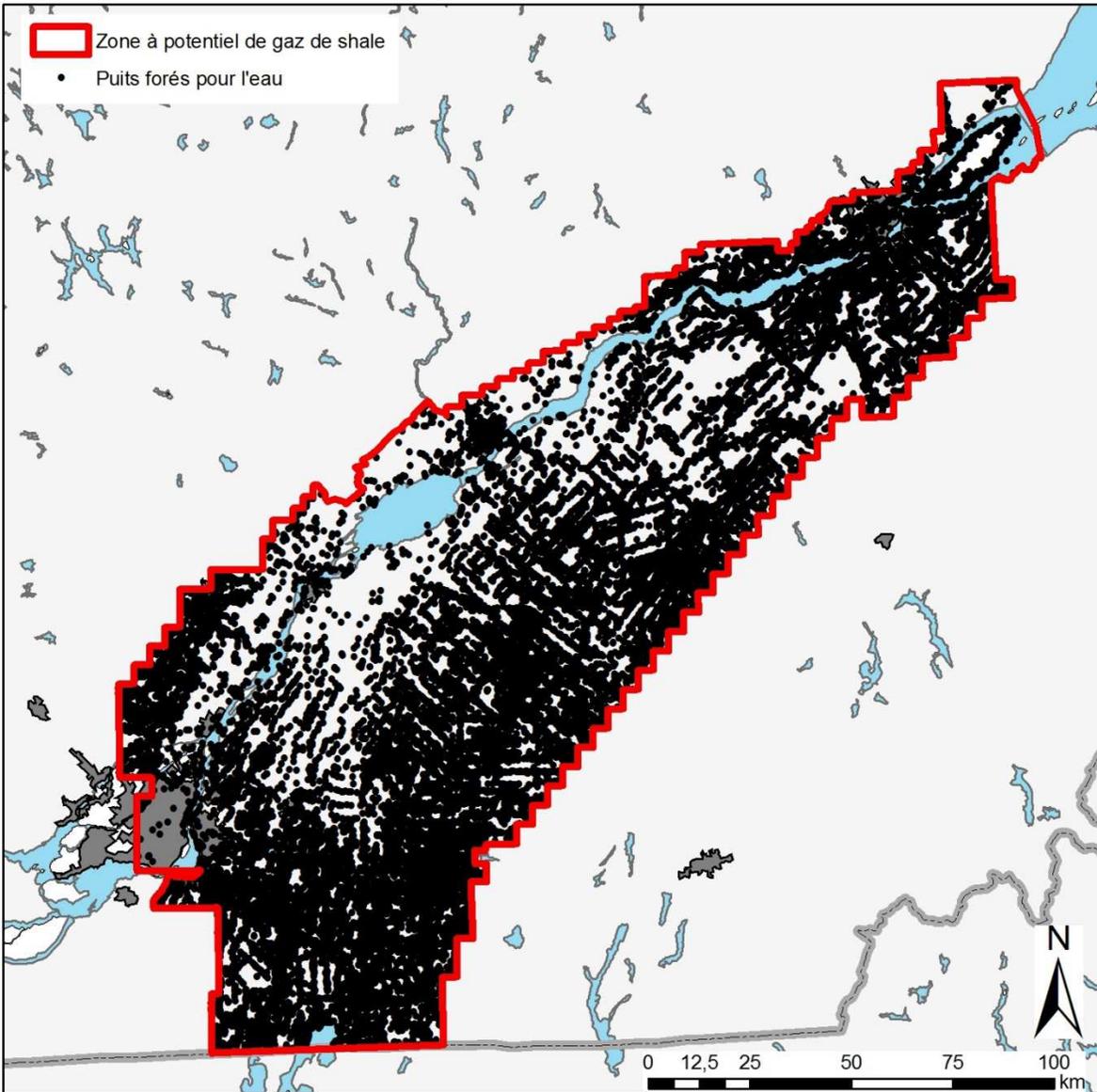
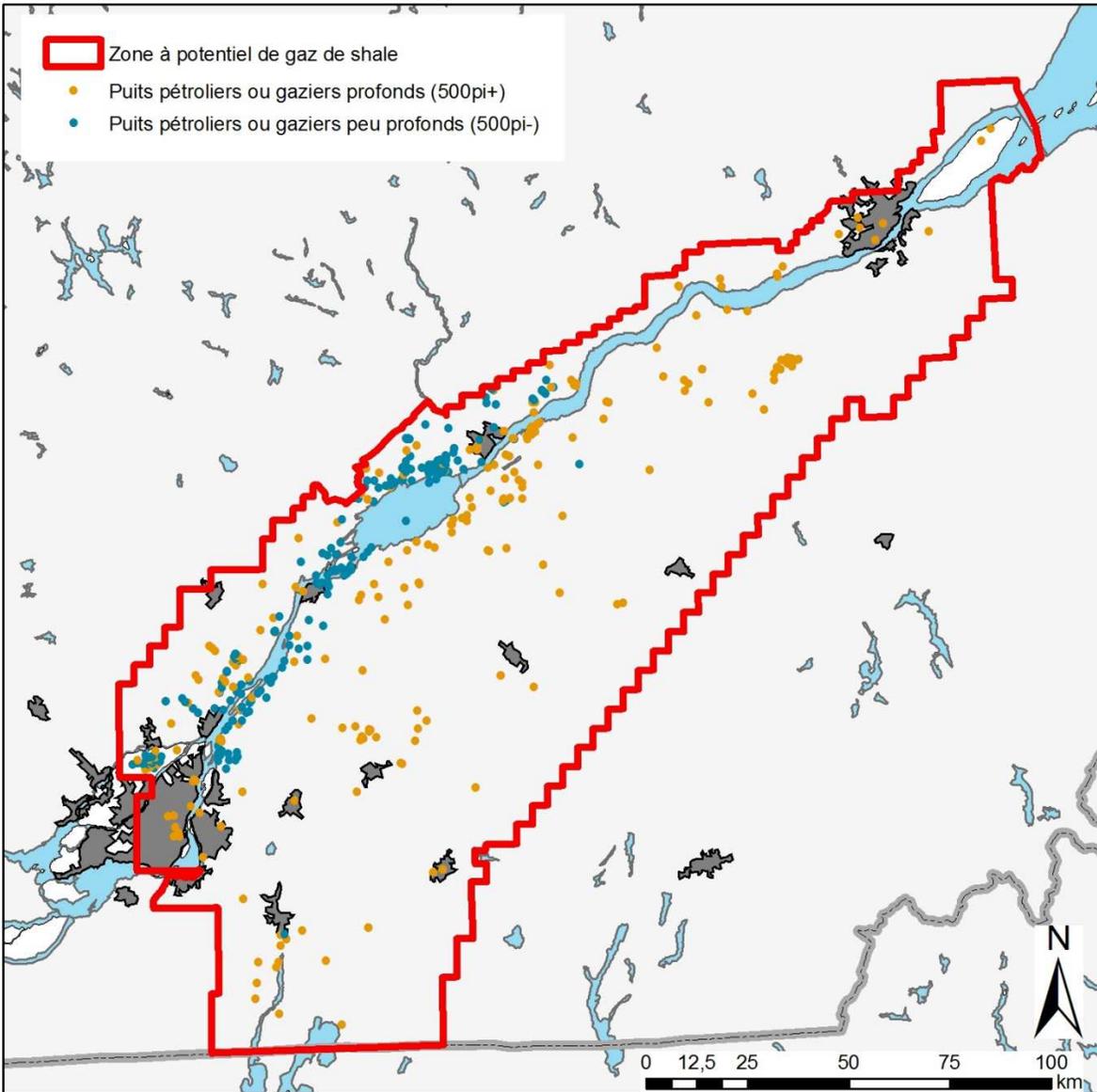


Figure 8 : Carte de localisation des puits forés pour l'eau (SIH, 2012).



Fig

ure 9 : Carte de localisation des puits forés pour le pétrole et le gaz naturel (SIGPEG, 2012). Les puits sont distingués selon leur profondeur inférieure ou supérieure à 500 pi (152,4 m).

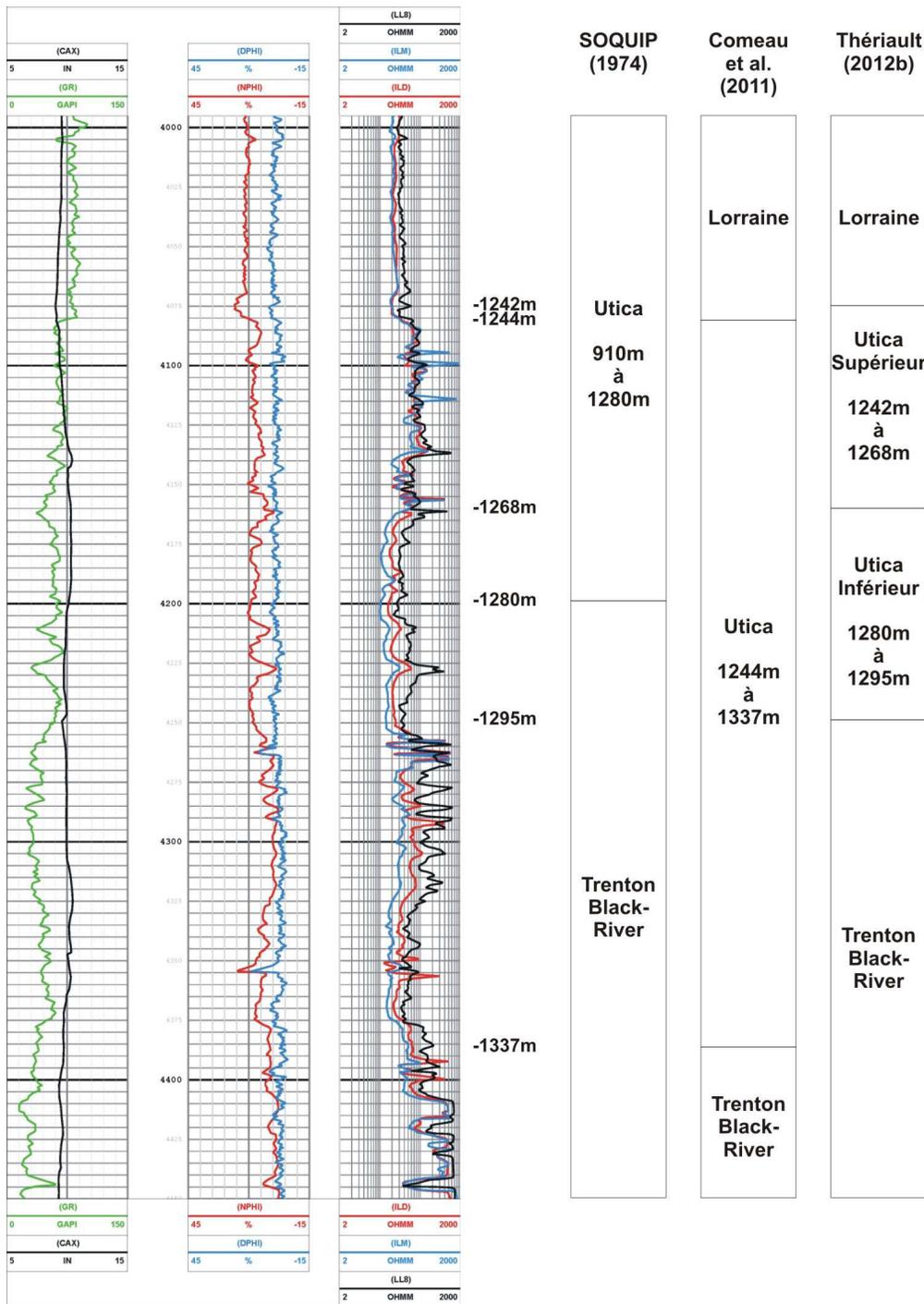


Figure 10 : Diagraphies et stratigraphie du puits A167, illustrant les incohérences dans les profondeurs rapportées pour différentes unités.

Cet exemple illustre le décalage entre les profondeurs des unités telles que rapportées dans les rapports de fin de forage (dans cet exemple : SOQUIP (1974), disponible sur SIGPEG), les profondeurs établies sur la base des diagraphies par la Chaire de recherche sur la séquestration géologique du dioxyde de carbone de l'INRS-ETE (Comeau et al., 2011), et les profondeurs révisées par Thériault (2012b) sur la base des diagraphies et des résultats d'analyse de diffraction par les rayons X.

2.5 Assemblages pétrographiques et propriétés chimiques

L'évolution des assemblages lithologiques qui caractérisent le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes est directement liée à l'évolution de la marge du bassin et à son comblement au cours de l'orogénie taconienne. Comprendre la nature lithologique, minéralogique et élémentaire de ces unités est nécessaire pour appréhender leur variabilité verticale et latérale, notamment en ce qui a trait aux propriétés hydrogéologiques du système. Ces informations sont aussi utiles pour interpréter les diagraphies disponibles.

2.5.1 Lithologie

Le Shale d'Utica est une unité argileuse à dominante calcaire (marne) dont la source détritique émane de la plate-forme carbonatée (Lavoie et al., 2008; Thériault, 2012a). Le Groupe de Lorraine au contraire est dominé par des assemblages argileux à dominante gréseuses dont la source provient de la chaîne appalachienne en surrection. Du fait de son origine turbiditique (Beaulieu et al., 1980; Lavoie et al., 2008), la lithologie de la Formation de Nicolet est par ailleurs très hétérogène, puisqu'on y reconnaît aussi localement – sans que l'on puisse établir de corrélations sur de grandes distances – des bancs de siltstones, de calcarénites, de conglomérats, ainsi que des bancs de grès pouvant mesurer jusqu'à un mètre d'épaisseur en affleurement (Beaulieu et al., 1980). La Formation de Pontgravé, sus-jacente, est constituée d'un assemblage de lits de marnes, de shales, de grès et de calcaires. La Formation de Bécancour du Groupe de Queenston, enfin, est dominée par des shales silteux et des grès. Les références principales à consulter sur le sujet sont Globensky (1987 et 1993), et pour une description à caractère semi-régional à local, les rapports géologiques de Clark (1955, 1964a, 1964b, 1964c, 1972 et 1977), Clark et Globensky (1973, 1975, 1976a, 1976b, 1976c, 1976d et 1977) et Globensky (1978 et 1981).

À l'échelle semi-régionale, les descriptions d'affleurements de compilation et de géofiches (Figure 5) présentent une description sommaire de la lithologie. À l'échelle locale, les rapports géologiques de fin de forage comportent des descriptions pétrographiques littérales des retailles et des carottes et souvent des descriptions (logs) géologiques synthétiques, ainsi que parfois des mesures de calcimétrie. La qualité de ce jeu de données a varié dans le temps, mais les interprétations se restreignent essentiellement à la nomenclature stratigraphique et les descriptions lithologiques sont la plupart du temps fiables. Dans le cas des retailles, le *lag* ou décalage entre le moment où la roche est entaillée par le trépan et le moment où les retailles arrivent en surface, n'est pas toujours pris en compte et il peut exister un décalage entre les profondeurs estimées et les profondeurs réelles.

2.5.2 Composition minéralogique

La plupart des données disponibles pour déterminer la minéralogie des unités à l'étude ne sont pas standardisées. Elles se présentent essentiellement sous deux formes : les rapports géologiques de fin de forage, qui se restreignent souvent à une description lithologique plutôt que minéralogique, et les diagraphies (section 2.6.2).

Il existe très peu de données standardisées permettant de caractériser la composition minéralogique du Shale d'Utica et des unités sus-jacentes. Le travail le plus complet en la matière repose sur l'analyse des déblais de dix-huit forages par diffraction des rayons X (Thériault, 2008 et 2012b), à quoi il faut ajouter au moins trois autres séries d'analyses provenant de carottes latérales (rapports d'analyses pour les puits A166, A194 et A248). Les unités ainsi documentées (Figure 11 et Tableau 3) sont le Shale d'Utica et le Groupe de Lorraine (Formation de Nicolet). Le Groupe Queenston n'est pas documenté.

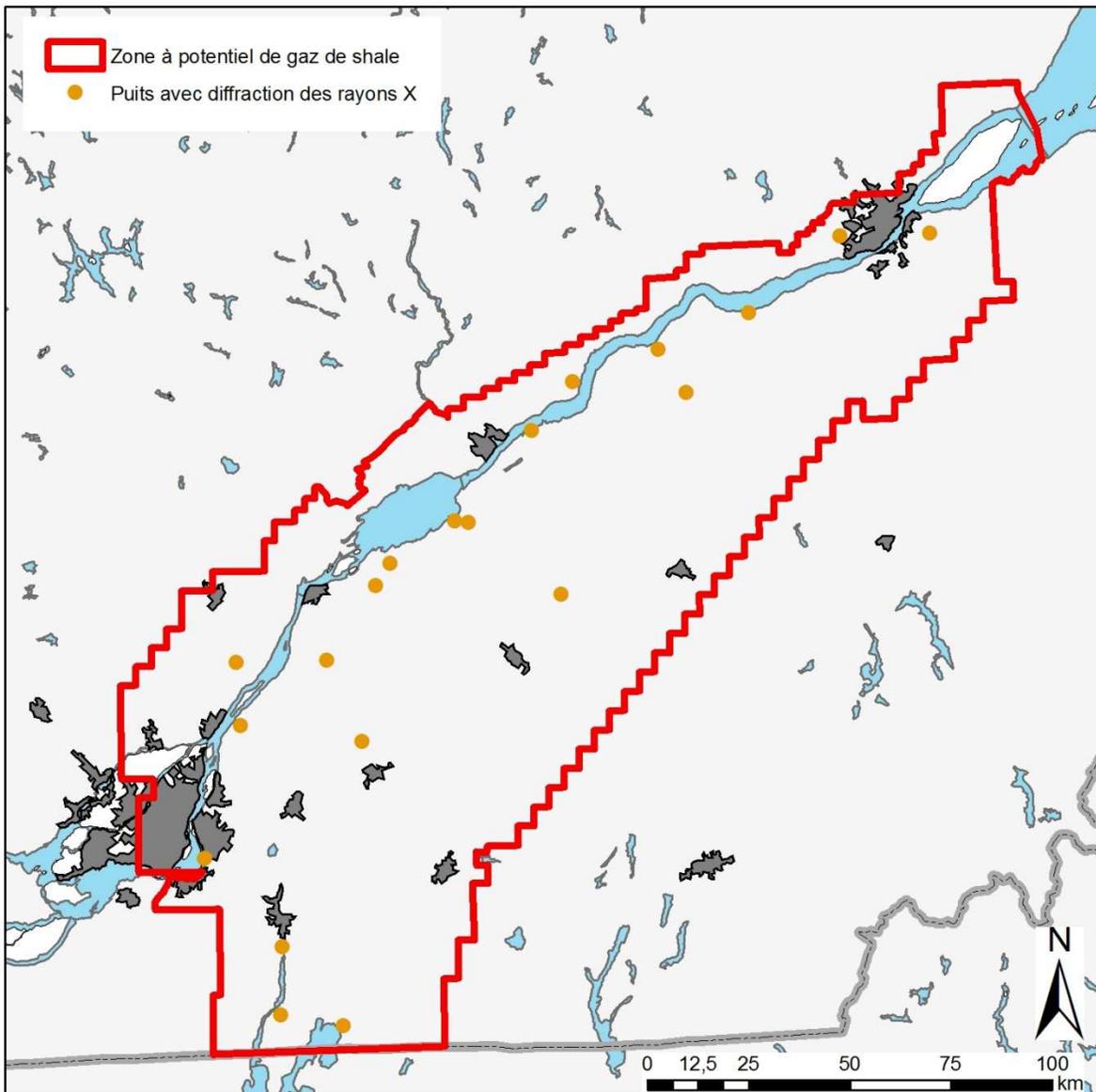


Figure 11 : Localisation des puits avec des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X. Le détail de ces analyses par puits et unité stratigraphique est rapporté dans le Tableau 3.

No du Puits	Lorraine	Utica supérieur	Utica inférieur	Québec (Citadelle)	Lorraine (Écaille)	Source ⁽¹⁾
A038	X	X	X			1
A069	X	X	X			1
A075	X	X	X			1
A120		X	X			1
A151	X	X	X			1
A157	X	X	X			1
A162	X	X	X			1
A165	X	X	X			1
A166		X				3
A167	X	X	X			1
A176	X	X	X			1
A185				X	X	1
A189	X	X	X			1
A190	X	X	X			2
A194	X					3
A197	X	X	X			1
A199	X	X	X			1
A238	X	X	X			1
A241	X	X	X			1
A248	X	X	X			2,4

Tableau 3 : Puits comportant des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X.

⁽¹⁾ = Source : 1 = Thériault (2008 et 2012b); 2 = Thériault (2012b); 3 = CBM Solutions (2009); 4 = Talisman Energy (2006).

2.5.3 Composition élémentaire

Il existe très peu d'information sur la composition chimique élémentaire du Shale d'Utica et des unités sus-jacentes. Les analyses d'échantillons de roche disponibles dans la banque de données SIGEOM pour la région à l'étude ne concernent pas les unités d'intérêt pour le rapport, mais se concentrent sur les intrusions montérégiennes (dykes) et les calcaires du domaine appalachien ou du Trenton autochtone. Seuls quatre échantillons du Groupe de Lorraine semblent avoir fait l'objet d'une analyse (publiée) par spectrométrie de masse par torche à plasma (ICP-MS), sans que la localisation exacte de ces échantillons, près de la ville de Québec, ne soit indiquée (Abanda et Hannigan, 2006). En dehors de cette unique référence, aucune étude systématique ne permet d'apprécier la composition élémentaire des shales,

notamment en ce qui a trait aux éléments pouvant représenter un risque potentiel pour la santé (Reichenbach, 1993).

L'analyse élémentaire des shales par diffraction des rayons X a récemment reçu l'attention de l'industrie, et une unique publication à ce jour (Chatellier et al., 2011a) fait état de la possibilité de distinguer plusieurs assemblages au sein des roches du Groupe de Lorraine sur la base des rapports d'éléments traces. Cette étude ouvre une nouvelle avenue de recherche mais ne présente aucune donnée directement utilisable.

Certaines diagraphies spécialisées de type rayonnement gamma spectral et spectroscopie neutronique permettent aussi d'apprécier de manière semi-quantitative la concentration en certains éléments dans le roc (section 2.6.2). Ces outils présentent certaines limitations car ils doivent être calés à l'aide d'analyses faites sur des carottes, mais ils offrent en retour l'avantage de mettre en lumière les variations verticales des éléments majeurs et traces tout au long d'un forage.

2.6 Diagraphies et carottes

L'analyse des enregistrements diagraphiques et des carottes disponibles pour le Shale d'Utica, les groupes de Lorraine et Queenston ainsi que pour les dépôts meubles permet de caractériser l'environnement géologique des aquifères et de supporter l'élaboration de modèles hydrogéologiques superficiels et profonds. Certains types de diagraphies peuvent en outre aider à développer ou à raffiner les modèles stratigraphiques séquentiels. La distribution spatiale et la nature des données est cependant très variable, tel qu'indiqué dans les sections suivantes.

2.6.1 Diagraphies des dépôts meubles

Les diagraphies enregistrées à travers les dépôts meubles dans les puits forés pour le pétrole et le gaz naturel appartiennent toutes à la série des puits « B » (SIGPEG) (peu profonds, de moins de 500 pi ou 152,4 m) et sont pour l'essentiel concentrées dans la région de Pointe-du-Lac et au nord de Montréal (Figure 12). Dans ce dernier cas, les puits concernés, bien que situés à l'intérieur de la zone d'intérêt pour le gaz de shale, se trouvent à l'ouest des affleurements du Shale d'Utica et n'offrent donc qu'un intérêt limité pour la problématique du gaz de shale. Les principaux types de diagraphies disponibles sont la densité gamma-gamma (avec effet photoélectrique), la porosité neutron, le rayonnement gamma naturel et la résistivité, ainsi que plus rarement la sonde acoustique. Le détail des enregistrements diagraphiques disponibles pour les dépôts meubles pour les puits pétroliers et gaziers est donné en annexe (Annexe 3).

Les diagraphies enregistrées dans le cadre des projets PACES ne sont pas encore disponibles mais sont discutées dans les rapports d'étapes des différents projets (Section 3.1). Ces diagraphies ne sont généralement pas disponibles à travers les dépôts meubles, mais plutôt dans les trous ouverts dans le roc sous les dépôts meubles à des profondeurs de l'ordre de 20 à 100 m. Les diagraphies disponibles sont du type *diamètreur* (*caliper*, localisation de fractures), *multifunction* (lithologie, minéralogie), *acoustic*

televiwer (localisation et géométrie des fractures), *full waveform sonic* (lithologie, minéralogie, porosité) et *flowmeter* (transmissivité des fractures) (Laurencelle et al., 2011).

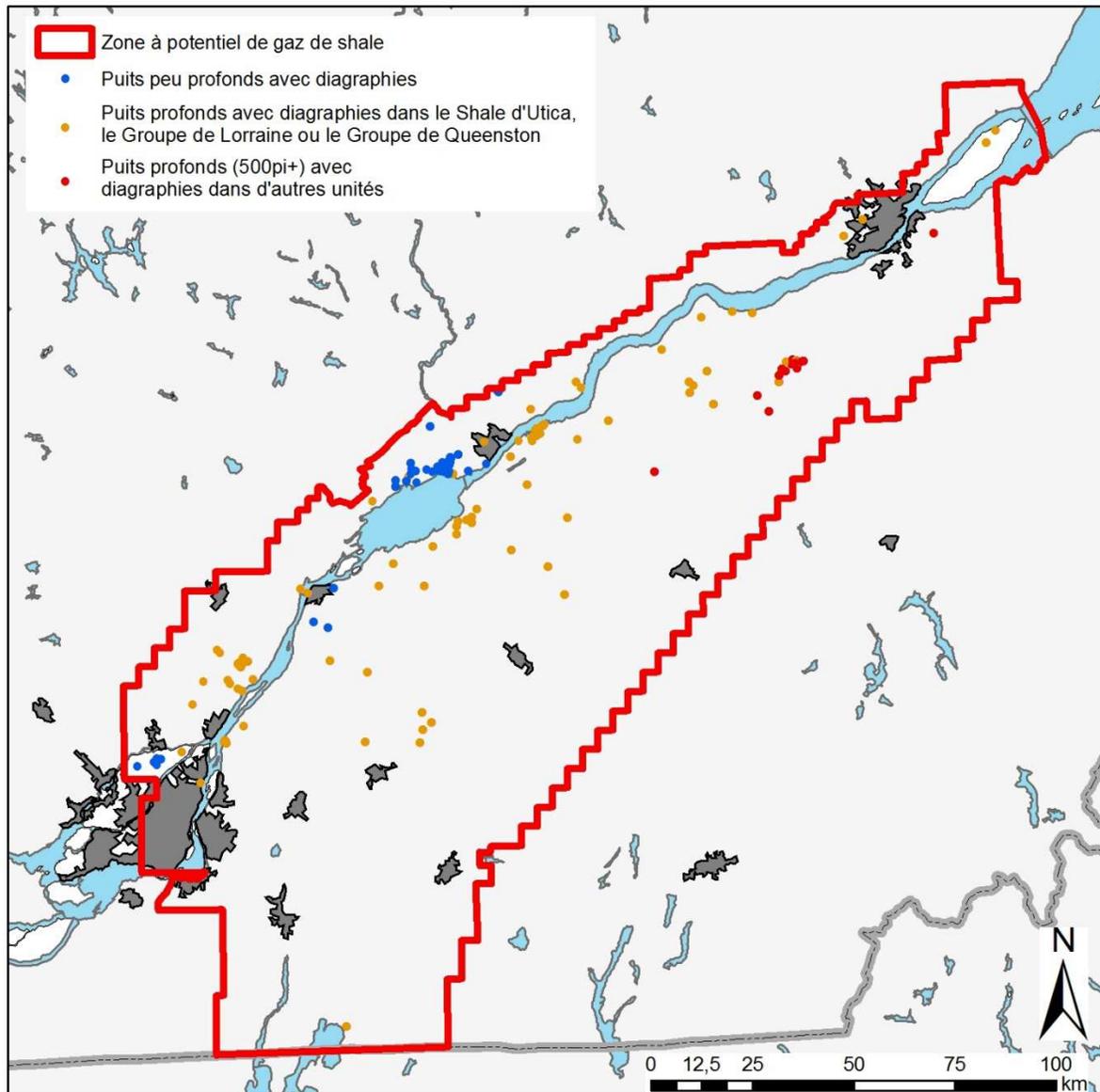


Figure 12 : Carte de localisation des puits comportant des diagraphies. Les puits sont classés en fonction de leur profondeur et des unités traversées (500 pi = 152,4 m).

2.6.2 Diagraphies du roc

Les diagraphies enregistrées à travers le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes dans les puits forés pour le pétrole et le gaz naturel appartiennent à la série de puits « A » (SIGPEG) et sont pour l'essentiel concentrées le long de l'axe du fleuve Saint-Laurent. La couverture s'amenuise rapidement vers le sud-

est et vers le sud (Figure 12). Vers le sud-est, seules les unités appalachiennes et la zone de failles imbriquées sont documentées et il n'existe pas d'enregistrement diagrapgique des roches autochtones sous le domaine appalachien. Vers le sud, deux forages seulement présentent des enregistrements diagrapgiques mais leur utilité est limitée : Le puits A263 comprend une suite diagrapgique complète et a traversé le Shale d'Utica et le Groupe de Lorraine, mais dans une partie peu profonde du bassin qui ne permet pas de corrélations avec les formations adjacentes de Stony Point et Iberville au sud-est. Le puits A166 à l'inverse, documente la partie profonde du bassin mais dans une zone tectonisée où les relations stratigraphiques sont obscurcies par de nombreux chevauchements.

Les principaux types de diagrapgies disponibles sont l'acoustique, le diamétreur, la densité gamma-gamma (avec effet photoélectrique), la porosité neutron, le potentiel spontané, le rayonnement gamma naturel et la résistivité. La nature des sondes et leur résolution a naturellement évolué au fil du temps. Les puits les plus anciens ne comportant souvent qu'une diagrapgie électrique non spécifiée et un rayonnement gamma naturel. Les forages réalisés pour le gaz de shale depuis 2006 présentent des suites diagrapgiques complètes, incluant des sondes spécialisées de type anisotropie acoustique, rayonnement gamma spectral et spectroscopie neutronique. Dans un cas également (puits A263), une diagrapgie de type résonance magnétique nucléaire est également disponible.

Le détail des enregistrements diagrapgiques disponibles pour le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes est documenté en annexe (Annexe 4). Cet inventaire a été élaboré à partir des données SIGPEG qui peuvent être incomplètes. Les incohérences ont été corrigées dans la mesure du possible, certaines diagrapgies non inventoriées ont été identifiées à partir des rapports de fin de forage et ont été ajoutées à l'Annexe 4, mais de nombreuses omissions existent encore dans cette base de données. Parce que de nombreuses diagrapgies de base sont parfois omises, notamment le rayonnement gamma naturel, il n'est pas possible d'élaborer des statistiques très détaillées pour illustrer la couverture diagrapgique du roc. Il apparaît toutefois que de nombreux puits, même anciens, comportent une suite diagrapgique de type radioactivité-porosité-résistivité qui permet d'élaborer un modèle pétrophysique de base pour caractériser les propriétés hydrogéologiques du roc peu profond (formations de Bécancour et de Pontgravé). Les unités plus profondes, beaucoup plus argileuses (Formation de Nicolet et Shale d'Utica), peuvent difficilement se prêter au même type d'analyses sans avoir accès à des diagrapgies spécialisées.

Sur la base des données disponibles, toutefois, il est possible de recenser le nombre de puits pour lesquels une couverture diagrapgique complète ou quasi-complète est disponible pour chacune des unités stratigraphiques d'intérêt (Tableau 4), sans égard pour la nature ou la qualité des diagrapgies enregistrées. Ce recensement met en évidence le déséquilibre qui existe dans la répartition des enregistrements, les unités les plus profondes étant les mieux documentées (83 puits pour le Shale d'Utica, à comparer avec 5 puits pour le Groupe de Queenston). Il est à noter que quatre des cinq puits présentant un enregistrement diagrapgique pour le Groupe de Queenston sont des puits forés pour le gaz de shale, et que dans un cas des diagrapgies de types anisotropie acoustique et spectroscopie neutronique sont disponibles. Le tableau 5 résume les diagrapgies disponibles pour le Groupe de Queenston et permet d'apprécier le potentiel d'exploitation de ce type de données pour ce groupe.

Unité stratigraphique avec couverture diagraphique supérieure à 90%	Nombre de puits
Queenston (Bécancour)	5
Lorraine non différencié	35
Lorraine (Pontgravé)	8
Lorraine (moyen)	8
Lorraine (Nicolet)	37
Lorraine, Utica non différenciés	5
Utica	83
Utica, Trenton non différenciés	3

Tableau 4 : Unités stratigraphiques couvertes à plus 90% par une ou plusieurs diagraphies.

No du puits	A071	A071	A189	A189	A189	A189	A253	A254	A258	A259	A259
Intervalle couvert dans l'unité stratigraphique (m)	86,3	1,5	60	83	90	90	341	473	99	235	235
Pourcentage de l'unité stratigraphique couvert	100	100	27	37,4	40,5	40,5	100	100	91,7	97,9	97,9
Acoustique				X							X ⁽¹⁾
Coffrage (Casing)											
Densité de formation							X	X	X	X	
Diamètreur (Caliper)							X	X	X		X
Directionnel						X					
Effet photoélectrique (PEF)							X	X	X	X	
Electric log											
Pendagemètre (Dipmeter)					X						
Porosité-Densité									X	X	
Porosité-Neutron							X	X	X	X	
Potentiel spontané (SP)							X	X		X	
Rayon gamma	X	X					X	X	X	X	X
Résistivité			X				X	X	X	X	
Température									X	X	
Autres diagraphies							(2)			(3)	

Tableau 5 : Diagaphies disponibles pour le Groupe de Queenston.

(1) : La diagraphie acoustique comporte les ondes P et S ; (2) : Résistivité de la boue ; (3) : Spectroscopie neutronique, rayon gamma spectral. Les puits A253 à A259 sont des puits récents forés pour le gaz de shale. Six puits sont représentés dans ce tableau. L'intervalle enregistré dans le Groupe de Queenston pour le puits A071 est inférieur à 90% et ce puits n'est donc pas comptabilisé dans le Tableau 4, où seuls cinq puits sont répertoriés.

2.6.3 Carottes

Les carottes échantillonnées dans le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes au cours des forages pétroliers et gaziers appartiennent à la série de puits « A » (SIGPEG) et sont pour l'essentiel concentrées le long de l'axe du fleuve Saint-Laurent et la vallée de la rivière Richelieu (Figure 13).

Le détail des carottes disponibles pour le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes est donné en annexe (Annexe 5). Cet inventaire est élaboré à partir des données SIGPEG qui peuvent être incomplètes. Les incohérences ont été corrigés dans la mesure du possible, certains intervalles carottés non inventoriés ont été identifiés à partir des rapports de fin de forage et ont été ajoutés à l'Annexe 5, mais il est possible que certaines omissions existent encore dans cette base de données, à un degré moindre que dans le cas de l'inventaire diagraphique cependant. La principale incertitude qui existe à propos des carottes inventoriées porte sur le degré de préservation des échantillons. L'existence physique et la disponibilité à la carothèque du MRNF de l'ensemble des carottes inventoriées n'a pas été vérifiée dans le cadre du présent rapport. Tout indique par ailleurs que la gamme d'analyses encore possibles sur ces carottes se restreint à des analyses chimiques et géochimiques, les analyses de perméabilité et de saturation en eau devant être évitées compte tenu de l'état de préservation présumé des carottes disponibles.

Sur la base des données disponibles, il est possible de recenser le nombre de puits dans lesquels des carottes ont été prélevées pour chacune des unités stratigraphiques d'intérêt (Tableau 6), sans égard pour la longueur ou le degré de préservation de ces carottes. Ce recensement met en évidence le déséquilibre qui existe dans la répartition des échantillons, le Shale d'Utica et la Formation de Nicolet étant représentés à parts égales avec environ 25 puits chacun, tandis que les formations de Pontgravé et Bécancour ne sont représentées que par 3 ou 2 puits, respectivement. Bien que rares, les carottes disponibles pour ces deux dernières formations représentent un échantillonnage continu sur plusieurs dizaines de mètres et présentent un intérêt évident pour caractériser la section supérieure du roc là où le potentiel aquifère est le mieux développé.

Unité stratigraphique carottée	Nombre de puits
Queenston (Bécancour)	2
Lorraine non différencié	10
Lorraine (Pontgravé)	3
Lorraine (Nicolet)	24
Lorraine (Iberville)	1
Utica	25
Utica (Stony Point)	1

Tableau 6 : Unités stratigraphiques comportant des carottes.

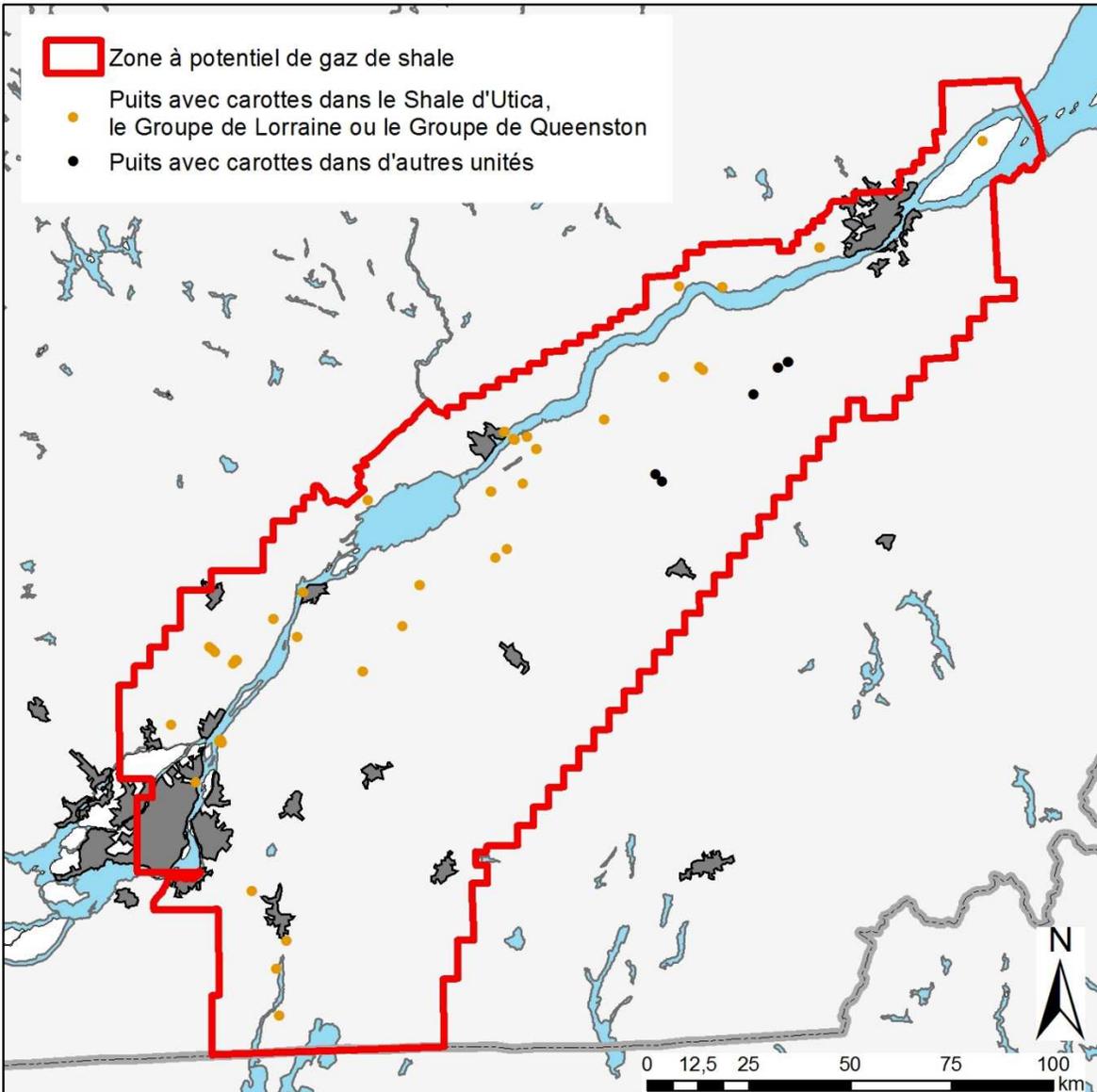


Figure 13 : Carte de localisation des puits carottés dans le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes.

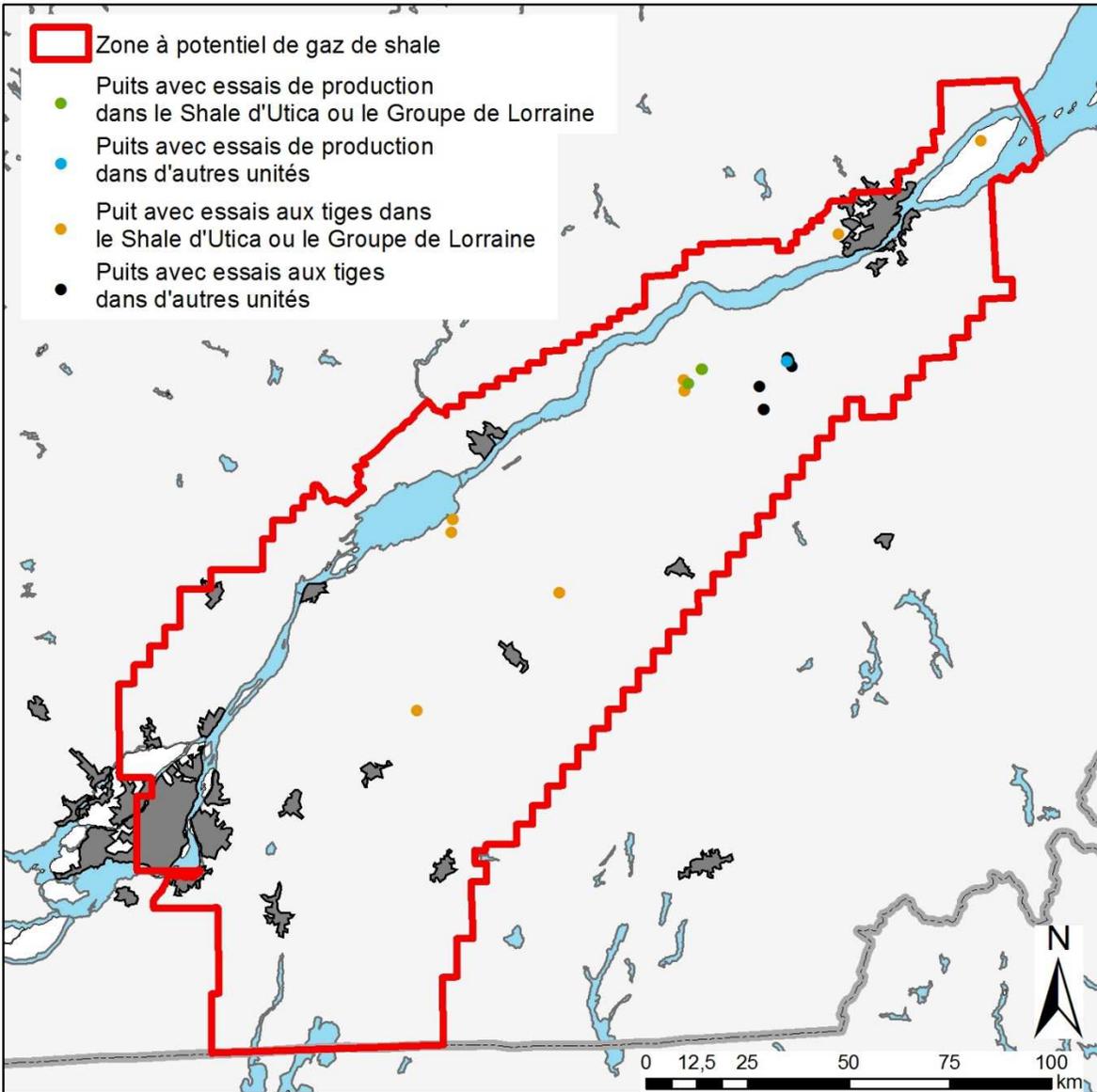
2.7 Propriétés physiques du roc

2.7.1 Pression

Les seules données directement exploitables pour estimer les gradients de pression dans le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes proviennent des résultats d'essais aux tiges et des jauges de pression. Ces dernières fournissent les résultats les plus fiables et présentent l'avantage de mettre en lumière les possibles variations verticales du gradient de pression. Seuls trois puits comportant de telles données ont été identifiés (Tableau 7), à partir des rapports de forage pour les puits A161 et A168, et tel que rapporté par Ahmat (2011) pour le puits A252. Les essais aux tiges réalisés sur les shales fracturés dans la région d'étude (Figure 14) sont en revanche plus nombreux et peuvent à l'occasion se prêter à une

estimation de la pression et du gradient de pression dans ces réservoirs particuliers (Tableau 7). Le détail des indices mesurés, des essais aux tiges et des essais de production est donné en annexe (Annexes 6 et 7, respectivement). Les essais de production, également reportés sur la Figure 14, ne fournissent aucune information pratique pour caractériser les propriétés physiques du roc, les données disponibles ne portant que sur les débits et volumes de gaz produits. Une synthèse des essais aux tiges et des essais de production réalisés dans la région de Villeroy est disponible dans Aguilera (1978) et dans Morin (1991). Des indications additionnelles (Figure 7) sur les gradients de pression dans les shales sont disponibles dans BAPE (2010), Chatellier et al. (2011b), Konstantinovskaya et al. (2012) et Lavoie et al. (2011). Aucune mesure directe n'est disponible pour les unités les moins profondes (formations de Lotbinière et de Bécancour) bien que des poches de gaz surpressurisées soient localement rencontrées dans ces unités (puits A123, A253, AZ41).

Konstantinovskaya et al. (2012) présentent en outre des estimations précises sur les gradients de pression régionaux (contraintes horizontales maximale et minimale, contrainte verticale et régime tectonique contemporain). L'une des conclusions majeures de ces auteurs est que le régime de contraintes actuel est en mode coulissant pour l'intervalle de profondeur 250-4000 m, et que certaines failles normales de socle peuvent être réactivées en décrochement suivant leur orientation par rapport à la contrainte principale horizontale et la pression d'injection (pour la séquestration du CO₂) ou la pression de fracturation (pour la fracturation hydraulique). Il convient de noter que le régime de contraintes décrochant identifié pour l'intervalle 250-4000 m peut aussi s'exprimer sous la forme de structures compressives en surface ainsi que l'ont montré Wallach et Chagnon (1990). Enfin, Brodylo et al. (2011) poussent plus avant la réflexion sur les aspects géomécaniques de la fracturation hydraulique.



Fig

ure 14 : Carte de localisation des puits comportant des résultats d'essais aux tiges ou d'essais de production.

Puits	Unité stratigraphique	Profondeur (m)	Gradient de pression (kPa/m)	Source
A020	Lorraine (Pontgravé)	566,9	3,3	Indice No 2
A048	Lorraine (Nicolet)	246,6	2,1	Indice No 1
A049	Lorraine (Nicolet)	77,7	7,5	Indice No 1
A049	Lorraine (Nicolet)	94,5	6,1	Indice No 2
A049	Lorraine (Nicolet)	240,8	2,4	Indice No 3
A076	Utica	472,5	1,8	Indice No 3
A076	Utica	483	0,6	Indice No 4
A077	Utica	137,5	0,1	Indice No 2
A077	Utica	258,4	0,3	Indice No 3
A077	Utica	357,8	0,6	Indice No 4
A077	Utica	432,8	0,8	Indice No 5
A161	Lorraine	1439,5	16,9	Indice No 1
A161	Lorraine	1463,4	16,7	Indice No 2
A161	Lorraine	1452,1	14,8	Jauge de pression
A161	Utica, Trenton	2044,3	9,3	DST No 8
A168	Lorraine	1578,7	11,7	DST No 3
A168	Lorraine	1767,8	12,6	Jauge de pression
A176	Lorraine	285,6	10,8	DST No 3
A178	Laurier	600,8	5,2	DST No 5
A183	Laurier, Trenton, Black River imbriqués	1055,2	11,8	DST No 6
A183	Laurier, Trenton, Black River imbriqués	1243,6	12,9	DST No 2
A185	Lorraine, Utica	2342,7	8,3	DST No 5
A185	Lorraine	2342	8,42	DST No 5 (Konstantinovskaya et al.,2012)
A190	Lorraine, Utica	1901	13,5	DST No 2
A252	Lorraine	1500	11,9	Jauge de pression (Ahmat, 2011)
A252	Utica	1800	11,1	Jauge de pression (Ahmat, 2011)
A256	Bourret	870	2,9	DST No 1
n.d.	Lorraine, Utica	1610	12,9	Jauge de pression (Chatellier et al.,2011b)
n.d.	Lorraine, Utica	2010	13,9	Jauge de pression (Chatellier et al.,2011b)
n.d.	Lorraine, Utica	2150	11,7	Jauge de pression (Chatellier et al.,2011b)
n.d.	Utica	200 à 800	9 à 11	Lavoie et al. (2011)
n.d.	Utica	600 à 2300	10 à 17	Lavoie et al. (2011)
n.d.	Lorraine	1280 à 2590	9,7	BAPE (2010)
n.d.	Utica	1280 à 2590	13,6 à 15,8	BAPE (2010)

Tableau 7 : Synthèse des gradients de pression.

Ces gradients ont été estimés à partir des essais de pression, des jauges de pression et des indices mesurés lors des opérations de forage.

2.7.2 Température

Les températures de sous-surface et le gradient géothermique peuvent être approchés à partir des températures de fond de trou mesurées lors de l'enregistrement des diagraphies, à partir des fluides récupérés lors des essais aux tiges, ou à l'aide de sondes de pression-température. Aucune donnée obtenue à partir de cette dernière technique ne semble disponible dans la région à l'étude.

En considérant les températures de fond de trou mesurées lors de l'enregistrement des diagraphies pour 42 puits, Lefebvre (1982) obtient un gradient géothermique moyen de 11,7 °C/km pour l'ensemble de la région, avec une zone chaude dans la région du Lac Saint-Pierre et de Bécancour (18,7 °C/km) et une zone froide dans la région de Sainte-Croix et Saint-Vincent-de-Paul (9 °C/km). Cette étude est certainement indicatrice des variations régionales dans le gradient géothermique, mais les valeurs absolues proposées ne sont pas utilisables en tant que tel car les calculs ne tiennent pas compte du temps de résidence de la boue après l'arrêt de la circulation et la température moyenne au sol de 15,5 °C qui est utilisée est vraisemblablement trop élevée. Le gradient géothermique moyen résultant de 11,7 °C/km est anormalement bas pour un bassin sédimentaire.

Tran Ngoc et al. (2011) proposent un gradient géothermique moyen de 23,5 °C/km pour la région de Bécancour, à partir des données d'essais aux tiges et des températures de fond de trou mesurées lors des enregistrements diagraphiques et en tenant compte d'une température moyenne au sol de 8 °C. Ce gradient géothermique est plus élevé que celui estimé par Lefebvre (1982) mais les auteurs ne précisent pas si les températures ont été ajustées pour tenir compte du temps de résidence de la boue après l'arrêt de la circulation.

En tout état de cause, les températures de fond de trou sont disponibles pour la quasi-totalité des puits dans lesquels des diagraphies ont été enregistrées, de même que pour de nombreux essais aux tiges. L'essentiel des forages traversent le Shale d'Utica et les températures de fond de trou enregistrées dans les carbonates et les grès de la plate-forme permettent d'estimer le gradient géothermique qui caractérise la plate-forme. Ce gradient peut ne pas être représentatif du gradient géothermique correspondant au Shale d'Utica et aux unités sus-jacentes car les grès et les carbonates ont une conductivité thermique généralement supérieure à celle des shales. À cette incertitude s'ajoute le fait que les shales surpressurisés sont caractérisés par une conductivité thermique encore plus basse. On peut donc anticiper trois régimes de température distincts selon la position stratigraphique, au-dessous, à l'intérieur et au-dessus des shales.

2.7.3 Porosité, perméabilité et saturation

En dehors de l'analyse diagraphique il n'existe aucune donnée fiable pour apprécier les propriétés physiques des grès, calcaires et siltstones des formations de Pontgravé (Groupe de Lorraine) et de Bécancour (Groupe de Queenston). Dans le cas des shales, l'analyse diagraphique est de surcroît compliquée par l'abondance de minéraux argileux ou denses tels la pyrite, mais quelques résultats d'analyse de laboratoire sont disponibles pour aider à caler les diagraphies, au moins de manière qualitative.

L'application des méthodes d'analyse conventionnelles à des roches de très faible perméabilité donne généralement peu de résultats, sauf dans le cas particulier où une perméabilité de fracture significative est présente. C'est le cas de quelques essais aux tiges réalisés avec un succès relatif dans le shale parautochtone (puits A168, A178 et A183, Tableau 8), pour lesquels il a été possible d'estimer une perméabilité de fracture. La conclusion générale qui ressort des essais aux tiges pratiqués sur les shales dans la région d'intérêt est que les shales fracturés peuvent avoir des débits intéressants mais que leur faible perméabilité et leur faible volume de stockage rendent ces réservoirs non-commerciaux.

Des mesures directes de perméabilité, porosité et saturation en eau, réalisées à partir de carottes, sont également disponibles pour trois puits (A065, A253 et A254, Tableau 8). Dans le cas du puits A065, le faciès analysé correspond aux formations de Terrebonne/Tétreauville du Groupe de Trenton, immédiatement en-dessous du Shale d'Utica. Les résultats d'analyse ont malgré tout été intégré au Tableau 8 dans la mesure où ces faciès peuvent facilement être confondus avec ceux du Shale d'Utica. Des mesures de densité de formation et de densité de la matrice sont également rapportées pour les puits A253 et A254, qui peuvent être utilisées pour caler les diagraphies. Aucune information n'est fournie quant au protocole d'analyse, ce qui limite l'usage qui peut être fait de ces résultats.

Dans un cas unique (puits A263), une diagraphie par résonance magnétique nucléaire fournit des valeurs de perméabilité indicatives sur toute l'épaisseur du Shale d'Utica et du Groupe de Lorraine. Les perméabilités ainsi estimées (à partir de la porosité mesurée par le même outil) doivent être callées avec des carottes avant de pouvoir être exploitées, et l'outil présente de surcroît le désavantage de n'être sensible qu'à des perméabilités supérieures à 0,1 mD.

Enfin, des valeurs de porosité et de perméabilité sont rapportées dans Lavoie et al. (2011) pour le Shale d'Utica et dans BAPE (2010) pour le Shale d'Utica et le Groupe de Lorraine (Tableau 8). Aucune information précise n'est cependant disponible quant à la position stratigraphique et géographique des échantillons et ces données n'ont donc qu'une valeur indicative.

Dans tous les cas, qu'il s'agisse de rapports d'analyse de carottes ou de publications, les valeurs indiquées démontrent une grande variabilité qui peut être imputée à l'hétérogénéité intrinsèque du shale mais aussi aux méthodes d'analyse, qui ne sont jamais mentionnées.

Unité stratigraphique	Profondeur (m)	Perméabilité (mD)	Porosité (%)	Saturation en eau(%)	Source
Lorraine	1554,5 à 1602,9	0,68			Puits A168, DST No 3
Laurier	457,2 à 533,4	0,0003			Puits A178, DST No 5
Laurier, Tr., B.R. imbriqués	1044,9 à 1244,8	0,023			Puits A183, DST No 2
Laurier, Tr., B.R. imbriqués	1051,9 à 1250,3	0,00827			Puits A183, DST No 6
Terrebonne-Tétreauville	803,76 à 830,15	<0,01 à 0,4	0,8 à 11,9	20,3 à 90,6	Puits A065, carotte
Lorraine	1325 à 1340,5	4,03x10-12 à 7,71x10-7	0,12 à 4,66	37,86 à 95,53	Puits A253, carotte (*)
Utica	1419 à 1492	2,36x10-12 à 2,46x10-6	0,16 à 3,58	31,16 à 92,17	Puits A253, carotte (*)
Lorraine	1490,64 à 1502,23	5,82x10-7 à 6,74x10-5	2,7 à 5,1	20 à 45	Puits A254, carotte (*)
Utica	1574,48 à 1676,05	9,62x10-8 à 2,34x10-5	1,3 à 4,6	12 à 63	Puits A254, carotte (*)
Utica	n.d.	10-5 à 10-4	2 à 5,8		Lavoie et al. (2011)
Utica	n.d.	10-3 à 5x10-3	2 à 5,5		Lavoie et al. (2011)
Utica	n.d.	10-2 à 8x10-2	2 à 3		Lavoie et al. (2011)
Lorraine	1280 à 2590	4x10-4	5	45	BAPE (2010)
Utica	1280 à 2590	3x10-4	0,7 à 6,6	30	BAPE (2010)

Tableau 8 : Synthèse des propriétés pétrophysiques pour le Shale d'Utica et le Groupe de Lorraine.

Ces propriétés comprennent des valeurs de perméabilité, porosité et saturation en eau recensées à partir des résultats d'essais aux tiges, des analyses de carottes, ainsi que des publications. (*) : Les valeurs de porosité indiquées correspondent à la porosité effective; Tr : Groupe de Trenton; B.R. : Groupe de Black River.

3. Synthèse des données hydrogéologiques

Trois phases de cartographie des aquifères du Québec peuvent être définies : a) les travaux dans les années 1960, 1970 et 1980, b) les travaux de 1995 à 2008, et c) les travaux reliés au Programme de connaissance sur les eaux souterraines (PACES) du Québec du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). La nature des travaux réalisés pendant ces trois phases est brièvement décrite dans les sections suivantes. Par la suite, les données disponibles dans la zone avec un potentiel pour le gaz de shale seront décrites plus en détail. La Figure 15 montre la localisation des

projets de cartographie hydrogéologique qui seront décrits dans les sections suivantes, tandis que le Tableau 9 donne quelques informations concernant ces projets.

3.1 Description et avancement des projets de caractérisation régionale

3.1.1 Travaux historiques dans les années 1960, 1970 et 1980

La ressource en eau souterraine au Québec a rarement fait l'objet d'une caractérisation exhaustive comprenant, par exemple, la cartographie et la classification des diverses formations aquifères. Des initiatives en ce sens ont pourtant été amorcées par les Ministères des ressources naturelles ainsi que de l'environnement du Québec durant les années 1960 à 1980 dans le cadre de programmes fédéraux et provinciaux : DHI - décennie hydrologique (1965-1975); ARDA - aménagement rural et développement agricole (1967-1975); programmes du MEER (Ministère de l'expansion économique régionale); PCI - programmes de connaissances intégrées (1975-1982); et le volet cartes de vulnérabilité (1985-1988) (McCormack, communication personnelle). Ces travaux ont principalement mené à des études de reconnaissance (McCormack, 1979 ; Paré, 1980) mais aussi, de façon ponctuelle, à quelques études détaillées (Simard, 1970 et 1977). Ces travaux n'ont cependant pas couvert tout le territoire et utilisaient la technologie de cartographie et l'information disponibles à ces époques. Lefebvre et al. (1999) documentent les rapports publiés dans le cadre de ces travaux.

Ces études ont produit une série de cartes hydrogéologiques et hydrogéochimiques concernant 1) la géologie des dépôts meubles et du socle rocheux exprimée en terme de perméabilité ou de potentiel aquifère, 2) les utilisateurs d'eaux souterraines ainsi que les types de captage présents sur le territoire, et 3) la distribution de certains paramètres physico-chimiques (fer, dureté, chlorure, pH et conductivité). Les données additionnelles aussi généralement présentées sont la localisation des puits d'essais, des sondages stratigraphiques et des prises d'eau municipales et privées. Des coupes stratigraphiques complètent à l'occasion ces cartes et la localisation des sources peut aussi y être présentée. Une minorité de rapports hydrogéologiques contient aussi des informations paramétriques (i.e., épaisseur des dépôts, topographie du socle, piézométrie, etc.).

La production de cartes de vulnérabilité par le Ministère de l'environnement a débuté au début des années 1980. L'évaluation de la vulnérabilité s'est initialement faite à partir de critères qualitatifs concernant les aspects physiques de la ressource (Grenier et McCormack, 1985). D'autres cartes de vulnérabilité ont été élaborées en fonction des débits probables disponibles. Ainsi, la carte de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Yamaska comprend trois classes de vulnérabilité en fonction des débits probables (McCormack, 1985). Les méthodes qualitatives d'évaluation ont éventuellement été remplacées par la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987) qui utilise un système à cotation numérique pondérée.

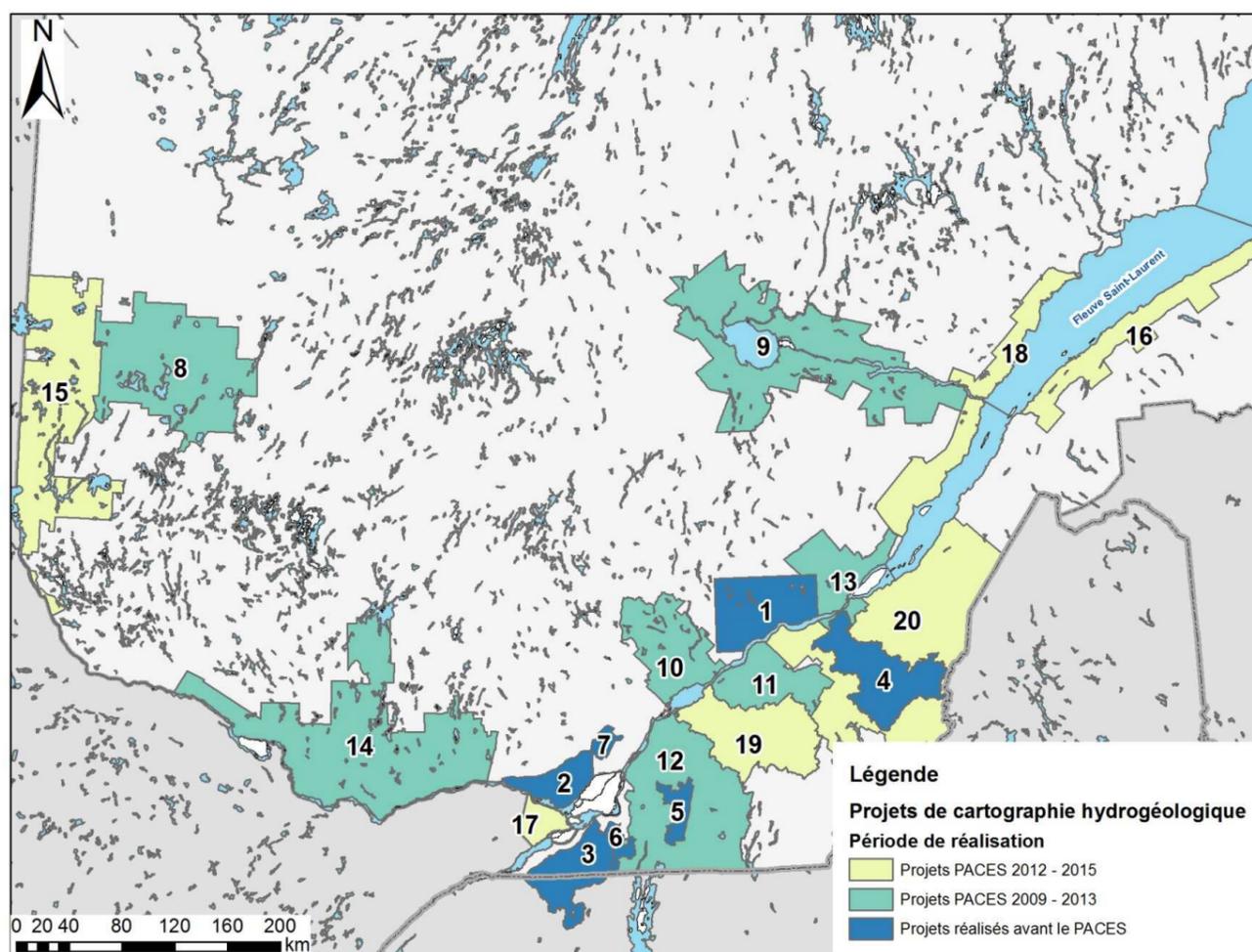


Figure 15 : Carte de localisation des projets de cartographie des aquifères entrepris entre 1995 et 2012. Les numéros indiqués sur la carte correspondent à ceux des projets compilés au Tableau 9.

No	Nom du Projet	Organismes responsables	Programme / Financement	Bassins couverts (en tout ou partie)	Superficie totale (km ²)	Période de réalisation
<i>Projets antérieurs au PACES réalisés entre 1995 et 2008</i>						
1	Piémont Laurentien (Portneuf)	CGC, INRS, MDDEP	Programme d'hydrogéologie CGC	Sainte-Anne, Portneuf, Jacques-Cartier	3 411	1995-1999
2	AFSOQ (Basses Laurentides)	CGC, INRS, U. Laval, MDDEP	DEC, Programme d'hydrogéologie CGC	Du Nord, Mille-Îles	1 497	1999-2003
3	Châteauguay	CGC, MDDEP, INRS	Programme d'hydrogéologie CGC	Châteauguay	2 528	2003-2006
4	Chaudière	COBARIC, TecSult	CDAQ, UPA, AgCan	Basse et moyenne Chaudière	3 627	2007-2008
5	Montréal Est St-Hyacinthe	TechnoRem	CDAQ, UPA, AgCan	Yamaska	649	2007-2008
6	Montréal Ouest	TechnoRem	CDAQ, UPA, AgCan	Châteauguay	673	2007-2008
7	Lanaudière	TechnoRem	CDAQ, UPA, AgCan	L'Assomption	316	2007-2008

Tableau 9 : Sommaire des projets de cartographie des aquifères du Québec réalisés ou entrepris de 1995 à 2012.

No	Nom du Projet	Organismes responsables	Programme / Financement	Bassins couverts (en tout ou partie)	Superficie totale (km ²)	Période de réalisation
<i>Projets PACES des phases I et II (2009-2013)</i>						
8	Abitibi-Témiscamingue I	UQAT (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Abitibi, Témiscamingue	9 188	2009-2013
9	Saguenay-Lac Saint-Jean	UQAC (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Saguenay, Lac-Saint-Jean	13 210	2009-2013
10	Sud-Ouest de la Mauricie	UQAR (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Saint-Maurice	3 350	2009-2013
11	Bécancour	UQAM (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Bécancour	2 924	2009-2013
12	Montérégie Est	INRS-ETE (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Richelieu, Yamaska, Baie Missisquoi	9 036	2009-2013
13	Communauté métropolitaine de Québec (CMQ)	U. Laval (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Jacques-Cartier, Saint-Charles, Montmorency	3 051	2010-2013
14	Outaouais	U. Laval (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Du Lièvre, Gatineau, Rouge	13 488	2010-2013

Tableau 9 : Sommaire des projets de cartographie des aquifères du Québec réalisés ou entrepris de 1995 à 2012 (suite 1).

No	Nom du Projet	Organismes responsables	Programme / Financement	Bassins couverts (en tout ou partie)	Superficie totale (km ²)	Période de réalisation
<i>Projets PACES de la phase III (2012-2015)</i>						
15	Abitibi-Témiscamingue II	UQAT (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Abitibi, Témiscamingue	10 362	2012-2015
16	Bas-Saint-Laurent I	UQAR (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Rimouski	3 333	2012-2015
17	Vaudreuil-Soulanges	Polytechnique, UQAM (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Vaudreuil-Soulanges	814	2012-2015
18	Charlevoix Haute-Côte Nord	UQAC (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Montmorency-Malbaie, Des Escoumins	4 587	2012-2015
19	Bas-Saint-François-Nicolet	UQAM (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Saint-François, Nicolet	4 585	2012-2015
20	Chaudière-Appalaches	INRS-ETE (GRIES)	PACES, MDDEP, partenaires régionaux	Du Chêne, Chaudière, Etchemin, Côte Du-Sud, Fleuve Saint-Jean	14 625	2012-2015

Tableau 9 : Sommaire des projets de cartographie des aquifères du Québec réalisés ou entrepris de 1995 à 2012 (suite 2).

3.1.2 Travaux de 1995 à 2008

La Commission Géologique du Canada (CGC) a initié en 1994 un programme d'hydrogéologie qui lui permettait de renouer avec l'évaluation des ressources en eau souterraine, une activité scientifique qui avait été importante à la CGC des années 1940 à 1970, mais qui avait été délaissée suite à la création d'Environnement Canada. Le programme d'hydrogéologie de la CGC a été coordonné initialement par les directeurs des divisions de la CGC qui ont choisi les projets à réaliser dans différentes régions du Canada. En 1999, la Division de Québec de la CGC a reçu le mandat de coordonner ce programme et a embauché un nouvel hydrogéologue en chef de la CGC, le Dr. Alfonso Rivera, qui a coordonné ce programme de 1999 à 2012. Le Centre géoscientifique de Québec (CGQ), formé de la Division Québec de la CGC et du Centre Eau Terre Environnement de l'INRS (INRS-ETE, à l'origine INRS-Géoressources), a réalisé plusieurs projets au Québec et ailleurs au Canada dans le cadre de ce programme.

En 1995, en relation avec le programme d'hydrogéologie de la CGC, le CGQ a initié des projets sur les ressources régionales en eaux souterraines, mettant l'emphase particulièrement sur l'inventaire et la cartographie des aquifères régionaux. Ces travaux ont été coordonnés par la CGC avec la participation de l'INRS-ETE et d'un grand nombre d'autres institutions, ainsi qu'avec l'appui du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Depuis 1995, cinq projets d'hydrogéologie régionale réalisés au Québec ont reçu le support du programme d'hydrogéologie de la CGC : Portneuf, Basses-Laurentides, Châteauguay, Chaudière et Montérégie Est. En plus de développer les connaissances sur les régions étudiées, ces projets ont aussi visé le développement des méthodes de cartographie hydrogéologique, ainsi qu'à servir de modèle pour un éventuel programme systématique de cartographie des ressources en eau souterraine au Québec.

Le projet du Piémont Laurentien (#1 au Tableau 9) a été réalisé entre 1995 et 1999 dans la Municipalité régionale de comté (MRC) de Portneuf. Ce projet a permis de caractériser la ressource en eau souterraine tant au niveau de sa distribution, de son potentiel d'exploitation que de sa qualité. Dans cette MRC, située sur le piémont des Laurentides à 30 km de Québec, ce sont les grandes nappes libres de sables et graviers deltaïques qui possèdent le plus important potentiel aquifère. Une série de cartes hydrogéologiques des aquifères deltaïques a été produite, incluant la piézométrie, l'épaisseur des complexes deltaïques et les contextes hydrogéologiques, ainsi que des coupes hydrostratigraphiques. La qualité de l'eau souterraine est généralement très bonne pour toutes les formations géologiques. Toutefois, un problème de contamination agricole a été identifié dans certains secteurs des complexes deltaïques par la présence de nitrates en concentrations élevées. Les complexes deltaïques sont les unités aquifères les plus productives et exploitées dans la MRC ainsi que celles qui ont la meilleure qualité d'eau. Elles sont cependant les plus vulnérables à la contamination agricole. La cartographie hydrogéologique de cette région a été documentée sous la forme de 5 dossiers publics de la CGC (Bourque et al., 1998; Fagnan et al., 1998; Murat et al., 1998; Paradis et al., 1998; Parent et al., 1998) et résumée dans des articles scientifiques dans des revues (Fagnan et al., 1999; Paradis et al., 2007), dans des comptes rendus de conférences (Boisvert et Michaud, 1998 et 1999; Larose-Charrette et al., 2000; Michaud et al., 2000; Murat et al., 2003 et 2004; Paradis et al., 2000) et dans des mémoires de maîtrise (Fagnan, 1998; Larose-Charrette, 2000; Murat, 2000; Paradis, 2000; Girard, 2001).

Un deuxième projet de cartographie hydrogéologique a porté sur la *Caractérisation hydrogéologique régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec* (AFSOQ) dans un secteur des Basses-Laurentides englobant les MRC d'Argenteuil, Mirabel, Deux-Montagnes et Thérèse-de-Blainville (#2 au Tableau 9). Dans ce système aquifère, l'écoulement régional de l'eau souterraine dans les aquifères de roc fracturé est divergent à partir de hauts topographiques qui constituent les zones de recharge préférentielle de l'eau souterraine. À l'échelle régionale, l'eau souterraine du territoire d'étude est de qualité variable mais elle est très peu contaminée par les activités humaines.. La vulnérabilité à la contamination du système aquifère régional a été aussi évaluée. Les secteurs vulnérables chevauchent les zones de recharge préférentielle et ils sont donc dispersés partout sur le territoire. 35% du territoire étudié est à protéger car il représente les principales zones de recharge préférentielle de l'aquifère à l'échelle régionale. La principale ressource exploitable en eau souterraine se retrouve dans les roches sédimentaires fracturées, particulièrement à l'interface du roc et des sédiments sus-jacents et jusqu'à une profondeur d'environ 100 m dans la séquence rocheuse. Au-delà de cette profondeur, les quantités d'eau deviennent négligeables pour les fins de l'exploitation. Ces travaux ont été documentés dans des rapports (Nastev et al., 2002; Savard et al., 2002a, 2002b et 2002c), un atlas hydrogéologique (Paradis et al., 2002), une carte géologique (Bolduc et Ross, 2001), un bulletin de la CGC (Savard et al., sous presse), des articles scientifiques (Nastev et al., 2004a, 2004b, 2004c, 2005 et 2006; Cloutier et al., 2006, 2008 et 2010; Ross et al., 2004a, 2005 et 2006), des articles de conférence (Cloutier et al., 2000, 2001 et 2004; Savard et al., 2000; Hamel et al., 2001; Karanta et al., 2001; Nastev et al., 2001; Ross et al., 2002, 2003 et 2004b; Murat et al., 2003 et 2004) ainsi que des mémoires et thèses (Étienne, 2002; Hamel, 2002; Karanta, 2002; Lemieux, 2002; Cloutier, 2004; Ross, 2004).

Suite à ces deux projets initiaux de cartographie hydrogéologique, deux guides méthodologiques ont été produits pour le MDDEP : un sur la cartographie des aquifères granulaires sur la base du projet dans Portneuf (MDDEP, 2008a) et un autre sur la cartographie des aquifères rocheux fracturés à partir de l'expérience acquise lors du projet dans les Basses-Laurentides (MDDEP, 2008b). Ces projets ont servi d'assise méthodologique aux autres projets de cartographie réalisés ultérieurement, y compris pour les projets du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) qui sera discuté plus loin.

Le projet de cartographie du système aquifère du bassin de la rivière Châteauguay s'est déroulé de 2003 à 2007, et a impliqué de plusieurs équipes multidisciplinaires, à la fois du Canada et des États-Unis, étant réalisé par la CGC et le MDDEP avec une participation du USGS (#3 au Tableau 9). Le projet a défini les unités aquifères et la qualité de l'eau souterraine, ainsi que son exploitabilité. Ce projet a permis de cristalliser la méthodologie et les étapes de réalisation des projets hydrogéologiques qui ont été adoptées pour les projets PACES, de même que les types de livrables inclus dans l'atlas hydrogéologique produit (Côté et al., 2006). La géologie du Quaternaire (Tremblay et Lamothe, 2005) ainsi que du socle rocheux (Lavoie, 2004) de la région d'étude a été mise à jour. Les résultats des travaux réalisés ont été publiés dans un numéro spécial d'une revue scientifique (Blanchette et al., 2010; Croteau et al., 2010; Dagenais, 2010; Giroux et al., 2010; Lamontagne et Nastev, 2010; Latifovic et al., 2010; Lavigne et al., 2010a et 2010b; Tremblay et al., 2010a et 2010b; Williams et al., 2010). Ces travaux ont fait l'objet d'autres articles scientifiques (Morin et al., 2007; Nastev et al., 2008), d'articles de conférence (Nastev et

al., 2004a et 2004b; Blanchette et al., 2005; Croteau et al., 2005; Dagenais et Nastev, 2005; Lavigne et al., 2005) ainsi que de mémoires de maîtrise (Benoît, 2005; Blanchette, 2006; Croteau, 2006; Lavigne, 2006; Tremblay, 2006).

Entre 2007 et 2008, quatre projets de cartographie hydrogéologique ont été réalisés avec le support du programme CDAQ soutenu financièrement par Agriculture Canada (AgCan) et administré par l'Union des producteurs agricoles (UPA). Le CDAQ avait pour but d'assurer l'alimentation en eau pour des besoins d'exploitation agricole. Les travaux reliés aux projets supportés par le CDAQ ont été réalisés par des firmes d'experts en hydrogéologie, avec le partenariat de regroupements régionaux de l'UPA. TechnoRem a ainsi réalisé trois projets localisés en Montérégie ouest (TechnoRem, 2008a; comprenant trois rapports; #6 au Tableau 9), en Montérégie Est (TechnoRem, 2008b; #5 au Tableau 9) et Lanaudière (UPA et TechnoRem, 2009; #7 au Tableau 9). Les travaux réalisés par TechnoRem (2008a) en Montérégie ouest couvrent en bonne partie le même territoire que le projet Châteauguay de la CGC/MDDEP. Le projet de TechnoRem a cependant ajouté des informations plus détaillées qui n'ont pas été intégrées avec celles du projet réalisé par la CGC et le MDDEP. Ce territoire est cependant à l'ouest de la zone d'intérêt parce que le Shale d'Utica n'est pas présent dans cette région. Les données issues des travaux de TechnoRem (2008b) en Montérégie Est ont été intégrées dans le projet PACES réalisé dans cette région. Puisque le projet PACES va produire des livrables cartographiques plus détaillés que le projet CDAQ, les résultats du projet CDAQ ne sont pas repris dans le présent rapport. Enfin, le projet réalisé par TechnoRem dans Lanaudière (UPA et TechnoRem, 2009) est situé en dehors de la zone d'intérêt pour le gaz de shale et ce contexte hydrogéologique ne sera pas discuté dans le présent rapport.

Le COBARIC et Tecslut ont réalisé pour l'UPA un projet CDAQ qui a couvert la Basse et la Moyenne Chaudière (#4 au Tableau 9). La CGC a aussi donné un support à ce projet. Bien que ce territoire soit englobé dans celui qui sera couvert par le projet PACES Chaudière-Appalaches (#20 au Tableau 9), les résultats du projet CDAQ déjà disponibles sont pertinents car ce territoire se trouve partiellement à l'intérieur de la zone d'intérêt pour le gaz de shale. Un atlas hydrogéologique sur CD-Rom a été produit pour diffuser les résultats du projet CDAQ sur le bassin de la Chaudière (COBARIC et UPA, 2008). Ces résultats ont aussi été résumés dans un article de conférence (Benoît et al., 2008). De plus, après le projet CDAQ, la CGC a poursuivi des travaux plus détaillés sur cette région qui ont fait l'objet d'articles de conférence, incluant une caractérisation géochimique de l'eau souterraine (Benoît et al., 2009 et 2011) ainsi qu'un modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine (Brun Kone et al., 2011). Ces travaux ont montré que le système aquifère de cette région comprend localement des dépôts meubles grossiers et régionalement du roc fracturé qui est généralement en conditions libres dans les Appalaches et en conditions semi-captives dans les basses terres du Saint-Laurent. La conductivité hydraulique du roc est uniforme et faible (10^{-7} m/s), ce qui devrait limiter l'écoulement régional et favoriser un écoulement local. Cependant, la datation isotopique montre une augmentation progressive de l'âge de l'eau souterraine et une diminution des proportions d'eaux jeunes lors de l'écoulement allant des Appalaches vers la rivière Chaudière, ce qui indiquerait une diminution de la recharge vers l'aval ainsi qu'un temps de résidence accru. L'eau souterraine dans les zones de recharge des Appalaches est de type Ca-HCO₃ et devient de type Na-HCO₃ dans les basses terres, mais la salinité demeure très réduite sur l'ensemble du territoire, indiquant une recharge assez bien distribuée sur l'ensemble de la région.

Une difficulté avec le projet CDAQ en Chaudière-Appalaches est reliée au fait que la base de données produite n'est pas accessible publiquement. Il faudra donc attendre que le projet PACES en Chaudière-Appalaches soit complété en 2015 pour avoir accès aux informations sur les ressources en eau souterraine dans cette région, à moins que le MDDEP n'intègre les données des projets réalisés antérieurement au PACES dans la base de données qui servira à la diffusion publique de l'information hydrogéologique issue des projets PACES (ce qui devrait se faire à partir de l'automne 2013).

3.1.3 Travaux du PACES à partir de 2009

Le projet de *Politique de protection et de conservation des eaux souterraines*, publié en avril 1996 par le ministère de l'Environnement, mettait en évidence de nombreuses lacunes en matière de connaissances sur les eaux souterraines. En 1999-2000, les travaux de la *Commission sur la gestion de l'eau au Québec* du BAPE ont confirmé ce diagnostic. Pour y pallier, le BAPE recommandait dans son rapport « ... de réaliser un inventaire cartographique systématique des eaux souterraines dans le Québec habité. ». Une des priorités d'action de la *Politique nationale de l'eau* (action no. 2) consiste à mettre en œuvre une gestion intégrée par bassin versant afin d'améliorer la gouvernance de l'eau. Toutefois, puisqu'« on gère bien ce que l'on connaît bien », le projet de Politique préconise également, en ce qui a trait aux eaux souterraines, de réaliser un inventaire des aquifères du Québec (action no. 7), conformément aux recommandations du BAPE. Cet inventaire des aquifères doit permettre non seulement de disposer du savoir nécessaire à la décision et à l'action en matière de protection et de conservation des eaux souterraines, mais également de remplir les engagements du Québec à l'égard de l'entente additionnelle placée en annexe de la *Charte des Grands Lacs* (signée et conclue le 18 juin 2001), soit de procéder à « ...l'adoption de mesures prévoyant une meilleure compréhension du rôle des eaux souterraines, et l'adoption d'un plan de mise en œuvre permanente. » (Directive no. 5 : Élaborer un système d'aide à la décision visant l'utilisation de la meilleure information disponible).

En 2008, le MDDEP a créé le *Bureau de l'eau* et a annoncé la mise en œuvre du *Programme de connaissances sur les eaux souterraines* (PACES) du Québec qui vise 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 (MDDEP, 2008c et 2011). Les objectifs initiaux du PACES étaient de deux ordres :

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

Dans l'appel de proposition de 2011, le MDDEP (2011) a ajouté un autre objectif, soit de compléter la couverture des territoires ciblés par l'industrie du gaz de shale pour l'exploration du gaz naturel. Cet objectif fait suite aux recommandations de la Commission du BAPE sur l'industrie du gaz de schiste

(BAPE, 2011) ainsi qu'aux besoins du Comité de l'Évaluation environnementale stratégique qui a été formé, suite aux recommandations du BAPE, pour poursuivre la réflexion sur cette industrie.

Le PACES représente ainsi un effort de couverture systématique de l'ensemble du territoire municipalisé du Québec pour qu'un portrait des ressources en eau souterraine soit disponible afin de supporter la gestion et la protection de cette ressource. Les projets PACES sont sous la responsabilité d'institutions universitaires et ils doivent être réalisés avec des partenaires régionaux qui contribuent 20% des coûts des projets (contributions monétaire et en nature). Toutes les universités impliquées dans la réalisation de ces projets se sont regroupées pour former le Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES). Les institutions reliées au GRIES réalisent ainsi les projets PACES en collaboration et en concertation, ce qui assure une cohérence dans les façon de faire et dans les livrables PACES (Palmer et al., 2011).

Comme l'indique le Tableau 9, trois phases d'appel de projets ont eu lieu depuis le début du PACES en 2008. Les projets reliés à ces phases sont aussi distingués sur la carte de la Figure 15. Cinq (5) projets ont été retenus lors du premier appel : Abitibi-Témiscamingue (Phase I), Saguenay-Lac Saint-Jean, Sud-Ouest de la Mauricie, Bécancour et Montérégie Est (#8 à #12 au Tableau 9). Compte tenu des nombreux aspects qui devaient être définis pour la première fois, tant au niveau des travaux que des produits livrables, le MDDEP a accordé 4 ans pour la réalisation de ces projets initiaux (2009 à 2013). Deux autres projets ont été initiés suite à une deuxième phase d'appel de projet, soit les projets de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) et de l'Outaouais (#13 et #14 au Tableau 9). Ces projets doivent être réalisés sur une période de trois ans, ce qui fait qu'ils vont être complétés en même temps que les projets de la Phase I, soit en 2013, puisqu'ils ont débuté l'année suivante (2010). Une troisième phase d'appel de proposition a octroyé des fonds pour la réalisation de 6 autres projets qui vont être réalisés entre 2012 et 2015 : Abitibi-Témiscamingue (Phase II), Bas-Saint-Laurent (Phase I), Vaudreuil-Soulanges, Charlevoix Haute-Côte Nord, Bas-Saint-François-Nicolet et Chaudière-Appalaches (#15 à #20 au Tableau 9). Dans la section suivante, les données produites par les projets PACES sont décrites et plus de détails sont donnés sur les projets réalisés à l'intérieur de la zone d'intérêt pour les gaz de shale.

3.1.4 Information hydrogéologique disponible dans la zone d'intérêt

Le PACES encadre la réalisation des projets qui sont subventionnés, tant au niveau des phases de réalisation des travaux que des produits exigés à la suite de chacune de ces phases et à la fin des projets (MDDEP, 2008c et 2011). Les projets PACES doivent ainsi être réalisés en trois phases annuelles, respectivement dédiées à 1) la collecte des données existantes, 2) La réalisation de travaux de terrain complémentaires, et 3) à la synthèse des informations et à leur transfert aux partenaires régionaux ainsi qu'au MDDEP. Le Tableau 10 suivant présente, en trois parties, la nature des produits qui doivent être livrés à la suite de chacune des trois phases des projets PACES. Ainsi, les exigences du PACES font en sorte que des produits complets et uniformes découlent de chaque projet et que ces produits fassent un portrait complet des ressources en eau souterraine. Les projets PACES sont toutefois réalisés à une échelle régionale, ce qui permet de donner un portrait général de l'état des ressources dans une région (MRC ou OBV), mais ces projets ne remplacent pas les études locales qui demeurent requises pour

résoudre des problèmes spécifiques (approvisionnement en eau, problème de contamination, localisation de l'emplacement d'un nouveau site d'enfouissement, etc.). En plus des normes du PACES qui assurent la production de livrables similaires pour tous les projets, la concertation et la collaboration établie entre les projets, qui sont tous impliqués dans un regroupement de recherche (GRIES), assure la cohérence entre les méthodes de réalisation et les formats de présentation des livrables PACES (Palmer et al., 2011). Ouellet et al. (2011) décrivent les retombées initiales des travaux entrepris dans le cadre du PACES jusqu'à 2011.

Phase I – Collecte des données existantes
<p>Base de données hydrogéologiques géoréférencées incluant</p> <ul style="list-style-type: none"> Description de forages Essais de pompage Données de suivi piézométrique Données géochimiques Caractéristiques et propriétés hydrogéologiques des différentes unités (notamment : porosité, fracturation, transmissivité) Aires d'alimentation des ouvrages de captage collectifs Analyse statistique des données météorologiques sur plusieurs années Débits de base des cours d'eau aux stations disponibles Description de l'occupation du territoire (répartition de la population et principaux usages du territoire)
<p>Couches d'information numérique préliminaires incluant</p> <ul style="list-style-type: none"> Topographie Routes, limites municipales et toponymie Modèle altimétrique numérique (MAN) Hydrographie Limites de bassins et de sous-bassins Occupation du sol Couverture végétale Milieus humides Affectation du territoire Pédologie Géologie du Quaternaire (préliminaire) Géologie du roc (préliminaire) Piézométrie (préliminaire) et emplacement des points de suivi des nappes s'il y a lieu Propriétés hydrauliques Géochimie de l'eau souterraine Qualité de l'eau de surface Prélèvements d'eau souterraine Aires d'alimentation et de protection des ouvrages de captage collectifs Activités anthropiques pouvant altérer l'eau souterraine

Modèle conceptuel préliminaire (coupes, blocs diagrammes 3D, description des différents contextes stratigraphiques et hydrostratigraphiques)
Couche numérique des contextes hydrogéologiques (préliminaire)
Rapport d'étape (synthèse des données disponibles et identification des données complémentaires requises)

Tableau 10 : Liste des produits livrables dans le cadre des projets PACES (MDDEP, 2011).

Phase II – Travaux de terrain complémentaires
Base de données des informations complémentaires recueillies
Rapport d'étape (travaux réalisés au cours de la Phase II)

Tableau 10 : Liste des produits livrables dans le cadre des projets PACES (MDDEP, 2011) (suite 1).

Phase III – Synthèse et transfert
Analyse et interprétation des données colligées dans le cadre du projet selon huit thèmes : <ul style="list-style-type: none"> Description de la région Contexte géologique Contexte hydrogéologique (modèle conceptuel, propriétés hydrauliques, conditions d'écoulement) Bilan hydrologique (recharge, utilisation de la ressource, résurgences) Qualité de l'eau Vulnérabilité et activités anthropiques Pérennité de la ressource (quantité et qualité) Recommandations (gestion et suivi de la ressource)
Cartes thématiques et texte technique pour chacun des huit thèmes, portant sur le résultat de l'analyse et de l'interprétation des données ; notamment, production des couches d'information suivantes : <ul style="list-style-type: none"> Topographie Routes, limites municipales et toponymie Modèle altimétrique numérique (MAN) Pente du sol Hydrographie Limites de bassins et de sous-bassins Occupation du sol Couverture végétale Milieus humides (zones d'intérêt écologique) Affectation du territoire Pédologie Géologie du Quaternaire Géologie du roc Coupes stratigraphiques et hydrostratigraphiques Épaisseur des dépôts meubles Topographie du roc

Contextes hydrogéologiques Épaisseur et limites des aquifères régionaux Piézométrie dans les formations superficielles Piézométrie dans le roc Paramètres hydrogéologiques – base de données ou cartes (K, T, S, porosité, etc.) Vulnérabilité des aquifères selon la méthode DRASTIC (couche synthèse + couches de chacune des composantes de l'indice) 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.) Qualité (critères eau potable) Qualité (objectifs esthétiques) Pressions exercées sur la ressource « eau souterraine » Emplacement des stations météorologiques, hydrométriques et de suivi de la nappe Zones de recharge préférentielles et de résurgence
Documents thématiques et géodatabase pour l'ensemble des données

Tableau 10 : Liste des produits livrables dans le cadre des projets PACES (MDDEP, 2011) (suite 2).

La Figure 16 montre la répartition des projets PACES présentement en voie de réalisation par rapport aux limites de la zone d'intérêt pour le gaz de shale. La Figure 1 montre que les forages réalisés pour évaluer le potentiel gazier du Shale d'Utica se sont concentrés sur la rive sud du Saint-Laurent, notamment parce que l'Utica n'est généralement pas profond et est même affleurant sur la rive nord, ce qui n'est pas propice à son exploitation (Figure 7). On s'intéresse alors plus aux informations hydrogéologiques disponibles sur la rive sud du Saint-Laurent dans la zone d'intérêt pour le gaz de shale. La Figure 18 montre que les projets PACES couvrant ce secteur sont, d'ouest en est, la Montérégie Est, le Bas-Saint-François-Nicolet, Bécancour et Chaudière-Appalaches. Les projets Montérégie Est et Bécancour ont été initiés dans la Phase I du PACES et vont donc être complétés en 2013. Par contre, les deux autres projets ne seront initiés qu'en avril 2012 et complétés en mars 2015. Les connaissances sur les conditions hydrogéologiques qui prévalent dans la zone d'intérêt pour le gaz de shale sont donc en voie de développement, mais un portrait complet ne sera disponible qu'en 2015. Une brève description des résultats issus des projets réalisés en Montérégie Est et à Bécancour, ainsi que les publications déjà disponibles sur ces régions sera faite dans le reste de la présente section.

D'après Lefebvre et al. (2011), le projet PACES de la Montérégie Est couvre une superficie d'environ 9 000 km² et comprend trois bassins versants, soit ceux des rivières Richelieu, Yamaska et de la baie Missisquoi, neuf municipalités régionales de comté (MRC) et 106 municipalités. La région s'étend du fleuve St-Laurent, au nord, jusqu'aux États-Unis, au sud (New York et Vermont). La population de la région d'étude est d'environ 577 000 habitants, dont 28% utilisent l'eau souterraine comme source d'approvisionnement. La mauvaise qualité des eaux de surface dans la région est connue mais peu d'informations étaient disponibles sur l'eau souterraine.

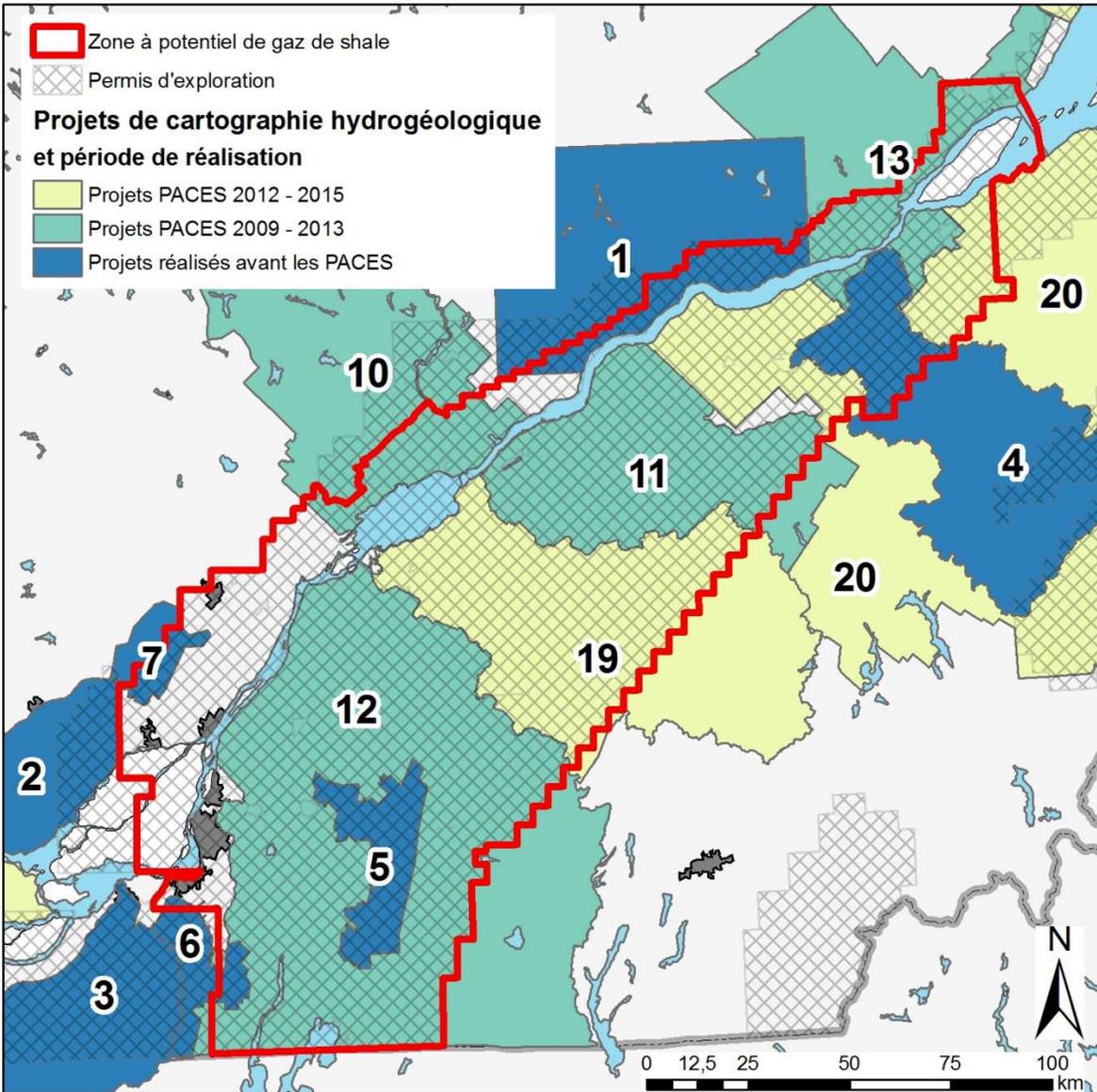


Figure 16 : Projets de cartographie hydrogéologique dans la zone d'intérêt. Les numéros indiqués sur la carte correspondent à ceux des projets compilés au Tableau 9.

La compilation des données existantes a permis de reconnaître quatre contextes hydrogéologiques en Montérégie Est : les Basses-terres du St-Laurent, le piémont appalachien, les Appalaches et les Collines montérégiennes. Les données existantes ont été complétées par des levés de terrain complémentaires. En plus de dresser un portrait de la ressource en eau souterraine, le projet vise le développement d'une approche efficace et novatrice de caractérisation hydrogéologique, basée sur une combinaison d'approches aux échelles locale et régionale, incluant diverses méthodes géophysiques, des forages et sondages au piézocône ciblés, une campagne d'échantillonnage d'eau et de sols, des essais hydrauliques et la cartographie des formations superficielles (Quaternaires). Une campagne de terrain a été réalisée entre juin et novembre 2010. Celle-ci a permis de récolter plus de 200 échantillons d'eau souterraine

provenant surtout de puits résidentiels et analysés principalement pour les ions majeurs et mineurs, les métaux et plusieurs isotopes (^2H , ^{18}O , $^3\text{H}/^3\text{He}$). Une centaine d'essais au perméamètre de Guelph ont été effectués à 30 sites pour mesurer les conductivités hydrauliques des dépôts. Plus de 250 km de levés géophysiques ont été réalisés avec quatre différentes méthodes, soit la sismique réflexion à haute résolution, la méthode électromagnétique TDEM, la résistivité électrique et le géoradar. 43 sondages au piézocône ont été réalisés pour définir en détail la séquence de sédiments et caler l'interprétation des levés géophysiques. En octobre et novembre 2010, une campagne de forages a été réalisée, comprenant 18 forages conventionnels au roc et 4 forages rotonsonic dans les dépôts meubles; généralement convertis en puits d'observation. Certains puits d'observation peu profonds ont été installés par enfoncement dans le piedmont appalachien. Chaque puits a fait l'objet d'un échantillonnage d'eau, d'un essai de perméabilité et de levés par diagraphies. Ces puits d'observation vont constituer un réseau de suivi des niveaux d'eau. La pérennité de ce réseau régional sera assurée par son intégration au réseau de surveillance du MDDEP qui va assurer les suivis de nappe et le maintien des infrastructures.

Les résultats obtenus des phases I et II du PACES pour le projet en Montérégie Est sont documentés dans Beaudin et al. (2010) et Rivard et al. (2011), respectivement. Un dossier public de la CGC a aussi été produit pour documenter la présence et l'étendue de la zone d'eau saumâtre de 2000 km² contenue dans les aquifères rocheux fracturés de la partie nord de la Montérégie Est allant des Montérégiennes jusqu'au fleuve Saint-Laurent (Beaudry et al., 2011a). Beaudry et al. (2011b) présentent aussi ces résultats de même que plus de détails sur la qualité et la géochimie de l'eau souterraine en Montérégie Est. D'autres aspects des travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont fait l'objet d'articles de conférence. Laurencelle et al. (2011) décrivent la fracturation présente dans les aquifères rocheux ainsi que la distribution de la conductivité hydraulique entre les unités géologiques et par rapport à la profondeur. Dubé-Loubert et al. (2011) résument le contexte des dépôts quaternaires de la Montérégie Est et les travaux en voie de réalisation pour mettre à jour leur cartographie. Blouin et al. (2011) décrivent l'approche qui est utilisée pour intégrer des levés géophysiques avec les informations fournies par les forages des puisatiers pour mieux définir la distribution spatiale et en profondeur des dépôts meubles. Ces travaux profitent des levés de sismique réflexion à haute résolution réalisés par la CGC en Montérégie Est. Les résultats de ces levés sont décrits par Pugin et Pullan (2011) qui préparent aussi un dossier public de la CGC pour documenter et rendre public rapidement ces résultats. En plus de bien définir la distribution en profondeur des dépôts meubles, ces levés ont montré des structures interprétées comme résultant de l'échappement de fluides, probablement de gaz naturel. La nature de ces échappements et l'origine du gaz n'ont cependant pas été déterminées. Enfin, Lefebvre et al. (2011) donnent un aperçu général des conditions hydrogéologiques de la Montérégie Est qui ont été définies grâce au projet PACES.

Le Projet PACES Bécancour couvre la partie basse du bassin de la rivière Bécancour et de huit sous-bassins connexes situés près du Saint-Laurent (superficie totale 2924 km²) (Larocque et al., 2010 et 2011). L'assemblage de l'information disponible a permis de trouver, au total, 10 616 points représentant de l'information géologique, hydrogéologique ou géochimique. Les informations disponibles ont permis d'identifier un manque important de données sur les paramètres hydrogéologiques (e.g. transmissivité, porosité). Les données météorologiques et hydrométriques, de

même que celles touchant l'occupation du sol, la couverture végétale et les milieux humides sont assez complètes. La stratigraphie des dépôts meubles de la zone d'étude est très incertaine; en particulier dans les portions basses du bassin, à proximité du fleuve Saint-Laurent. Un modèle conceptuel préliminaire a été développé sous la forme de quatre coupes topo-géologiques des dépôts meubles. Ce modèle a permis de constater l'importance de la couverture de l'unité silto-argileuse sur la zone d'étude et les lacunes au niveau de la localisation des zones de recharges. Les résultats obtenus des phases I et II du PACES pour le projet Bécancour sont documentés dans Larocque et al. (2010 et 2011). Certains articles de conférence présentent des résultats initiaux sur des volets spécifiques du projet Bécancour. Tremblay et al. (2011) donnent un aperçu global du projet et des travaux réalisés ainsi que du contexte hydrogéologique. Godbout et al. (2011) présentent l'hydrostratigraphie des dépôts quaternaires de la région d'étude. Gagné et al. (2011) discutent des résultats de la caractérisation hydraulique des dépôts meubles et des aquifères rocheux fracturés. Meyzonnat et Larocque (2011) décrivent l'évaluation de la vulnérabilité des nappes à la pollution. Enfin, une emphase particulière a été mise sur l'étude des importantes tourbières présentes dans la région de Bécancour (Avard et Larocque, 2011; Ravonjarivelo et Larocque, 2011).

Les rapports et bases de données des projets PACES en voie de réalisation vont être soumis au MDDEP en mars 2013. Suite au processus de révision et considérant le temps requis pour l'intégration de l'information dans la base de données du MDDEP, les données produites par ces projets PACES pourraient être rendues accessibles par le MDDEP via un portail Internet à l'automne 2013. Quant aux projets réalisés avant le PACES, le MDDEP envisage l'intégration de ces données et des cartes qui ont été produites dans la base de données PACES. Ceci assurerait l'accessibilité aux résultats des projets antérieurs au PACES, ce qui est difficilement faisable présentement parce que ces données et cartes ne sont pas intégrées à des bases de données fonctionnelles et publiques.

3.2 Forages pour l'eau

La banque de données des puits forés pour l'eau (SIH) offre une bonne couverture spatiale de la région à l'étude (Figure 8), avec plus de 50 000 puits répertoriés. Elle permet notamment d'apprécier l'épaisseur des dépôts meubles, la profondeur au roc, et souvent la profondeur à laquelle l'eau douce est exploitée, et donne aussi une description lithologique des unités traversées. Cette banque de données présente deux limitations cependant : elle ne donne pas d'indications sur la profondeur maximale de la nappe d'eau douce, et ne recense, sur une base volontaire, que les puits profonds forés pour l'eau depuis 1967. Le SIH contient aussi principalement les données transmises par les foreurs de puits (puisatiers), sans répertorier les forages réalisés dans le cadre de travaux environnementaux ou d'ingénierie. Les projets PACES ont tous répertoriés le plus de rapports possibles concernant l'hydrogéologie des régions étudiées et les forages de grande qualité documentés dans ces rapports ont été ajoutés aux bases de données PACES qui seront transmises au MDDEP en 2013 et en 2015.

3.3 Indices et analyses de gaz et pétrole

3.3.1 Dépôts meubles

Des indices de gaz naturel ont été répertoriés dans les dépôts meubles à partir des rapports des forages réalisés pour le pétrole et le gaz naturel et des forages réalisés pour l'eau. L'identification de ce phénomène apporte des informations importantes sur la nature des fluides présents dans les aquifères peu profonds de la région à l'étude. D'importance notamment est la présence d'indices de pétrole signalés localement dans les dépôts meubles, rarement en forage (Figure 17), mais plus fréquemment à l'affleurement dans les régions de Montréal et Grondines, où deux rapports géologiques font état de gouttelettes de pétrole liquide observées en cassure fraîche à l'affleurement, dans les secteurs ouest et nord-ouest de la région à l'étude (Clark, 1972; Clark et Globensky, 1975).

À la fin du XIX^e siècle et dans les premières décennies du XX^e siècle, l'exploration pour le gaz naturel était axée sur la recherche de gaz dans les dépôts meubles, stimulée par des découvertes économiques en Ontario. Un certain nombre de puits peu profonds (Série « B », SIGPEG) forés le long du fleuve Saint-Laurent (Figure 17) ont alors mis en évidence la présence de gaz dans les dépôts meubles, souvent au contact entre le roc et les sédiments quaternaires, ou à l'intérieur de ceux-ci dans des niveaux sablonneux scellés par des unités argileuses. Le détail de ces données est présenté en annexe (Annexe 8). Parks (1930 et 1931) et Globensky (1972) résument les découvertes les plus importantes.

Les puits forés pour l'eau révèlent aussi parfois la présence de gaz naturel dissout dans l'eau souterraine contenue dans un aquifère, sans qu'il soit toujours possible de déterminer si l'eau et le gaz proviennent des dépôts meubles ou du roc fracturé peu profond. Le jeu de données le plus complet à cet égard a été compilé par Clark (1955, 1964a, 1964b et 1964c) avec près de 600 indices cartographiés dans un secteur restreint qui est représenté sur la Figure 17 et reporté également en annexe (Annexe 9). Il est aussi possible d'identifier des cas isolés rapportés par des sources diverses, et qui n'ont pas été compilés dans le cadre du présent rapport.

Il existe très peu d'analyses permettant de caractériser la source du gaz. Une seule publication (St-Antoine et Héroux, 1993) indique que le gaz rencontré dans les sédiments meubles dans la région du lac Saint-Pierre peut être d'origine thermogénique, biogénique ou mixte. Il convient de noter également que l'accumulation de gaz naturel au contact entre le roc et les sédiments quaternaires suggère une source profonde dans ces cas précis au moins, mais n'est pas nécessairement diagnostique d'un gaz thermogénique, le shale d'Antrim au Michigan (Hamblin, 2006) offrant à ce titre un bon contre-exemple.

Enfin trois documents rapportent des analyses isotopiques pour des échantillons de gaz prélevés à l'évent du coffrage de surface et dans le cellier (rapports de forage pour les puits A260 et A265, Muehlenbachs (2012) pour les puits A275 et A277). Il n'est pas possible de déterminer la source de ce gaz mais les analyses isotopiques indiquent une origine thermogénique dans tous les cas.

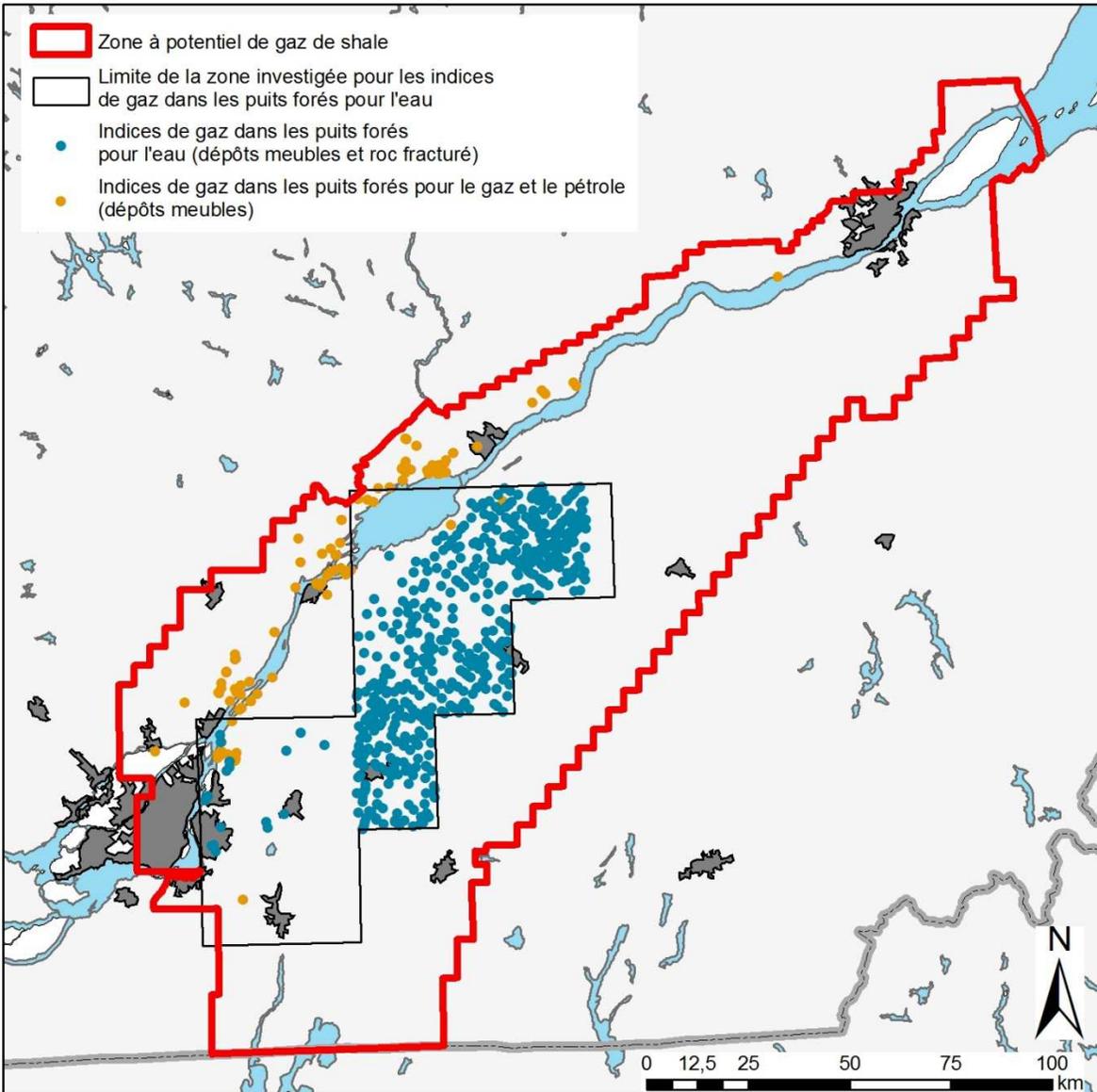


Figure 17 : Carte de localisation des indices de gaz et pétrole dans les dépôts meubles. Données tirées de Clark (1955, 1964a, 1964b et 1964c) et SIGPEG (2012). À noter que les indices de gaz répertoriés dans les puits forés pour l'eau peuvent provenir du roc aquifère sous les dépôts meubles.

3.3.2 Roc

Des indices de gaz et de pétrole ont été répertoriés dans les roches du Shale d'Utica et des unités sus-jacentes à partir des rapports des forages réalisés pour le pétrole et le gaz naturel (Figure 18). Le phénomène n'est pas surprenant dans une région où une roche mère est présente (Shale d'Utica), mais la présence de pétrole (Tableau 11) doit retenir l'attention car elle permet de circonscrire une zone où des composés organiques volatils et des gouttelettes de pétrole en émulsion peuvent se retrouver, de façon naturelle, dans les aquifères. Les indices de pétrole recensés dans le Tableau 11 sont présents à

l'état de trace uniquement et ne sont pas supportés par une analyse en laboratoire. L'analyse de trois échantillons d'hydrocarbures liquides provenant du puits A251 a révélé que deux d'entre eux résultaient vraisemblablement d'une contamination au cours des opérations, et que le troisième échantillon correspondait à un condensat.

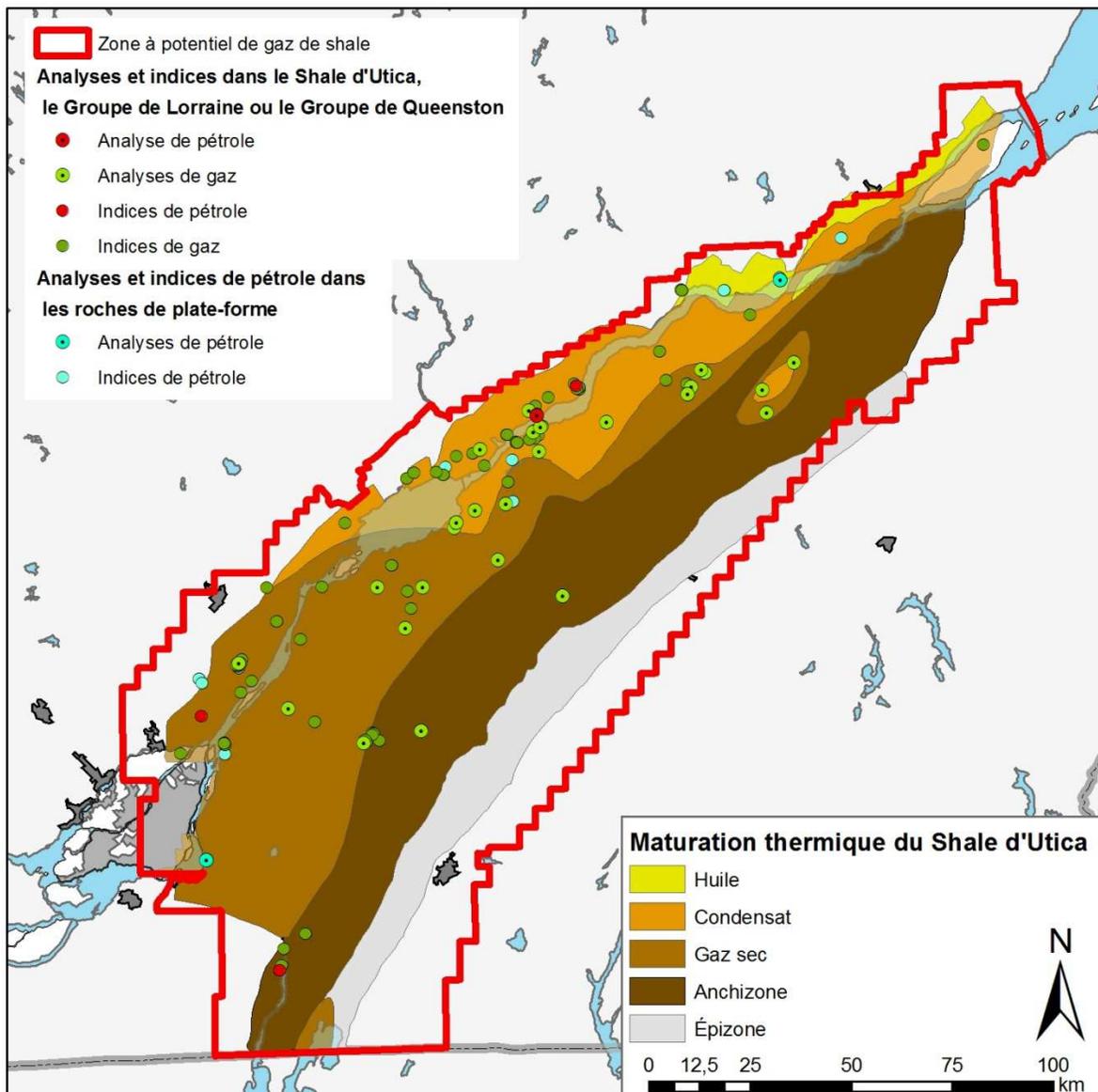


Figure 18 : Carte de localisation des indices et analyses de gaz et pétrole dans le roc. La zonation de la maturité thermique du Shale d'Utica est tirée de Bertrand et Lavoie (2006).

Occurrence	No du puits	Unité stratigraphique	Type de fluide	Sommet (m)	Base (m)	Remarques
Indice	A005	Utica	Pétrole	594,4	594,4	Traces
	A005	Utica	Pétrole	616,9	616,9	Traces
	A077	Utica	Pétrole	106,7	106,7	Traces; non confirmé
	A077	Utica	Pétrole	119,5	119,5	Traces; non confirmé
	B092	Utica	Pétrole	57,9	57,9	Traces
Analyse	A251	Lorraine	Lubrifiant	410	510	
	A251	Utica	Pétrole	644	750	Gravité: 74,7 API
	A251	Utica	Lubrifiant	636	636	

Tableau 11 : Inventaire des indices et analyses de pétrole documentés dans le Shale d’Utica et le Groupe de Lorraine.

Le Tableau 11 et la Figure 18 révèlent par ailleurs que des indices de pétrole sont documentés dans une région où le Shale d’Utica atteint un stade de maturation propre à générer des condensats ou des gaz secs. Une partie de l’huile générée peut encore être préservée à ce stade, contrairement à des stades plus avancés de maturation thermique. Un indice de pétrole rapporté dans l’extrême sud de la région à l’étude, pour le puits A077, paraît en revanche questionnable. Il n’existe aucune analyse pour confirmer cet indice, et seul du gaz naturel a été rencontré dans les puits alentours. En tout état de cause, la présence d’hydrocarbures liquides générés par le Shale d’Utica ne semble pas envisageable dans la moitié sud-est de la région à l’étude. Toutefois, une carte de maturation pour les roches en surface (Bertrand et Lavoie, 2006) révèle que l’essentiel des roches du Groupe de Lorraine dans le domaine autochtone, au nord des Collines montérégiennes, se trouve actuellement dans la zone à condensats. Bien que le potentiel génétique du Groupe de Lorraine soit moindre que celui du Shale d’Utica, il n’est donc pas exclu que des hydrocarbures liquides puissent se retrouver de façon naturelle dans les aquifères, dans une région limitée au sud par les Collines montérégiennes et au sud-est par les Appalaches.

Les indices et les analyses de gaz et pétrole sont recensés en annexe (Annexes 10 et 11, respectivement). Le recensement des indices de gaz constitue un jeu de données dont la valeur est limitée et subjective, dans la mesure où la courbe de gaz disponible pour la grande majorité des forages modernes (à partir des années soixante-dix) témoigne de la présence systématique de gaz dans le Shale d’Utica et les unités sus-jacentes, mais il n’existe pas de norme pour définir le seuil à partir duquel un indice doit être rapporté.

La qualité et le contenu des analyses étant variable, leurs résultats n’ont pas été synthétisés ici. Il est toutefois possible de consulter l’essentiel des résultats d’analyses à partir des rapports de fin de forage pour chaque puits (SIGPEG). L’examen des rapports d’analyses pour les indices de gaz dans le Shale d’Utica et les unités sus-jacentes révèle que le gaz est généralement constitué à plus de 90% de méthane, la fraction restante étant essentiellement composée d’éthane, de propane et de dioxyde de carbone. Il convient de souligner qu’un seul indice de sulfure d’hydrogène (H₂S) a été signalé dans la région à l’étude. Cet indice provient des dolomies du Beekmantown dans la plate-forme carbonatée sous-jacente au Shale d’Utica (puits A247). L’examen des rapports de forage et des analyses de gaz

révèle cependant que dans un cas au moins, des traces de H₂S ont été détectées dans le Shale d'Utica (résultats d'analyse du gaz prélevé lors de l'essai aux tiges no 7 pratiqué dans le puits A197). Cette analyse non-répertoriée a été ajoutée à l'Annexe 11.

Enfin, il existe très peu d'analyses isotopiques permettant de caractériser la nature du gaz présent dans le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes. St-Antoine et Héroux (1993) présentent des résultats d'analyse pour le gaz soutiré des dolomies du Beekmantown dans l'écaille de Saint-Flavien, un gaz thermogénique provenant de l'Utica. Muehlenbachs (2012) présentent également des résultats partiels d'analyses isotopiques réalisées sur deux échantillons de gaz prélevés dans le tubage de production des puits A275 et A277. Chatellier et al. (2011b) et Lavoie et al. (2011) présentent enfin plusieurs séries d'analyses isotopiques partielles dont la valeur est limitée car les échantillons ne sont pas localisés.

3.4 Indices et analyses d'eau

3.4.1 Dépôts meubles

De nombreuses analyses d'eau dans les dépôts meubles sont disponibles pour les puits forés pour l'eau (Figure 19). Ces données proviennent de la banque de données BADGEQ, désormais disponible sur SIGEOM (2012). Les puits d'où proviennent ces analyses coïncident avec ceux de la banque SIH (Figure 8). La couverture des analyses disponibles est cependant moindre que celle des puits forés pour l'eau.

Certains puits forés pour le pétrole et le gaz naturel comportent également des indices d'eau mais une seule analyse a été répertoriée (Figure 19). La plupart des puits concernés proviennent de la Série « B » des puits de moins de 500 pi et présentent les limitations inhérentes à ce jeu de données, notamment en ce qui a trait à sa répartition spatiale. Les indices et l'analyse (unique) d'eau rapportés pour les puits forés pour le pétrole et le gaz naturels sont recensés en annexe (Annexes 12 et 13, respectivement). La qualité et le contenu des analyses étant variable, les résultats n'ont pas été synthétisés ici. Il est toutefois possible de consulter l'essentiel des résultats d'analyses à partir des rapports de fin de forage pour chaque puits (SIGPEG). Plus rarement certains résultats d'analyse ont été consignés dans un document séparé ou directement dans la base de données SIGPEG.

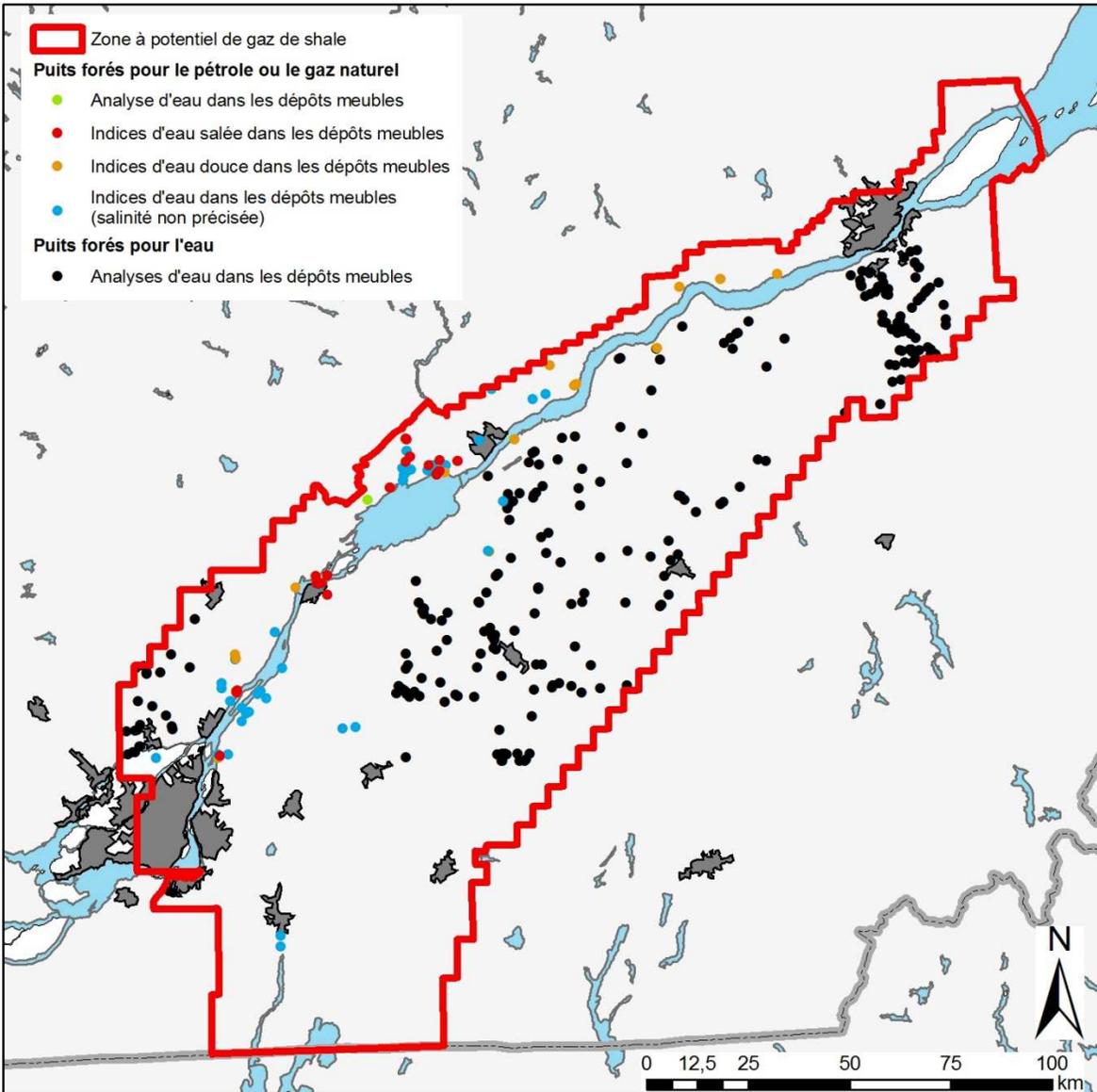


Figure 19 : Carte de localisation des indices et analyses d'eau dans les puits forés pour le pétrole et le gaz naturel (SIGPEG, 2012) et dans les puits forés pour l'eau (SIGEOM, 2012).

3.4.2 Roc

De nombreuses analyses d'eau dans le roc peu profond sont disponibles pour les puits forés pour l'eau (Figure 20). Ces données proviennent de la banque de données BADGEQ, désormais disponible sur SIGEOM (2012). Les puits d'où proviennent ces analyses coïncident avec ceux de la banque SIH (Figure 8).

Des analyses d'eau dans le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes sont également rapportées pour les puits forés pour le pétrole et le gaz naturel (Figure 20). La plupart des puits concernés proviennent de la Série « A » des puits de plus de 500 pi. Les indices et les analyses d'eau rapportés pour les puits forés pour le pétrole et le gaz naturels sont recensés en annexe (Annexes 14 et 15, respectivement). La qualité

et le contenu des analyses étant variable, les résultats n'ont pas été synthétisés ici. Il est toutefois possible de consulter l'essentiel des résultats d'analyses à partir des rapports de fin de forage pour chaque puits (SIGPEG). Plus rarement certains résultats d'analyse ont été consignés dans un document séparé ou directement dans la base de données SIGPEG.

Les projets PACES impliquent l'échantillonnage et l'analyse de l'eau souterraine, généralement à partir de puits s'approvisionnant dans la partie superficielle du roc (20 à 50 m). Beaudry et al. (2011b) rapportent ainsi que 225 échantillons ont été prélevés en Montérégie Est alors que Tremblay et al. (2011) indiquent que 112 échantillons ont été pris dans la région de Bécancour. Ces échantillons d'eau ont fait l'objet d'analyses complètes pour les composés inorganiques majeurs et mineurs, ainsi que des analyses isotopiques pour certains échantillons. Des analyses de gaz dissous ont aussi été faites sur certains échantillons de la région de Bécancour.

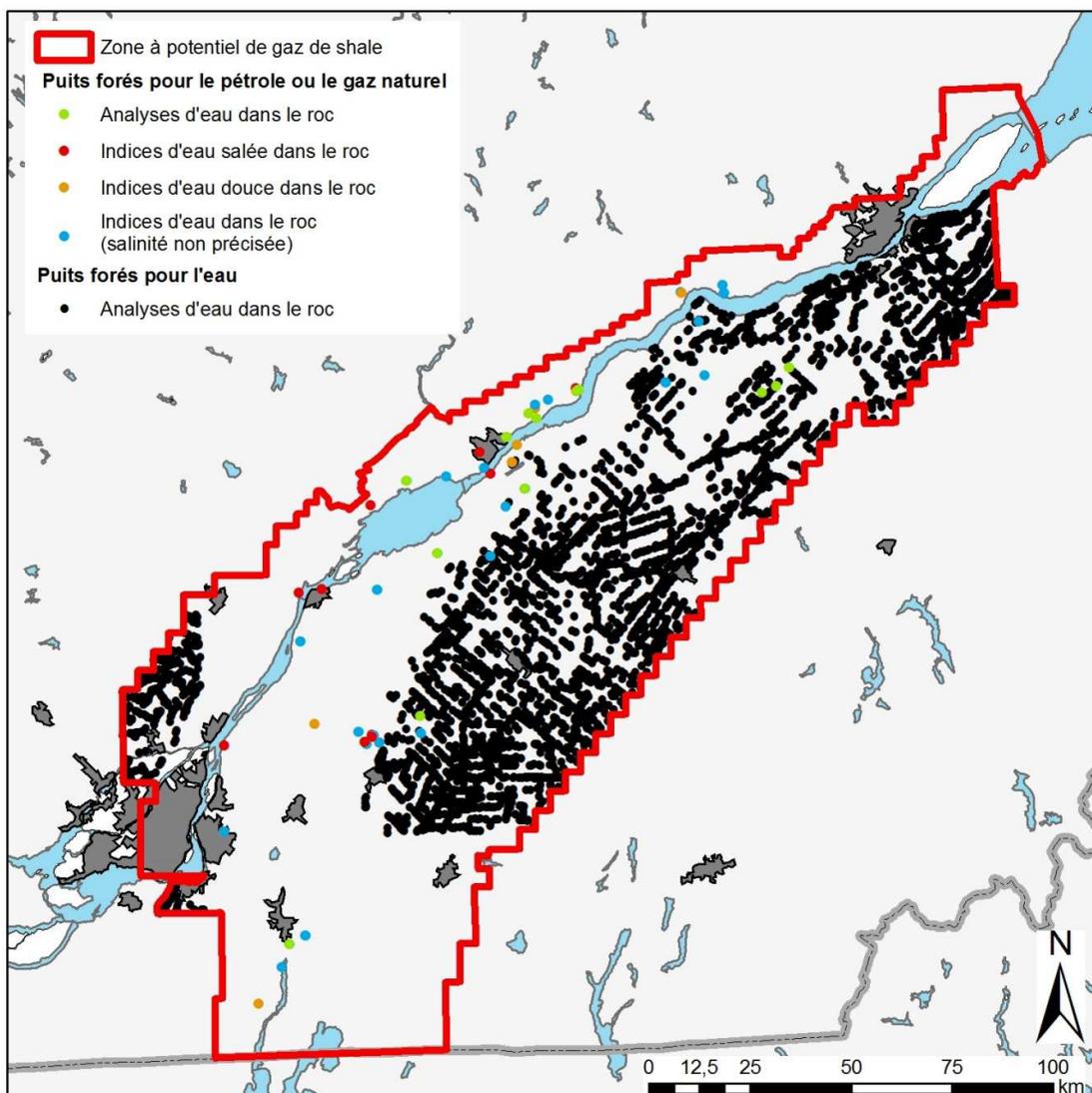


Figure 20 : Carte de localisation des indices (SIGPEG, 2012) et analyses (SIGEOM, 2012; SIGPEG, 2012) d'eau dans le roc.

3.4.3 Salinité

L'eau douce rencontrée dans les dépôts meubles et le roc fracturé peu profond cède localement le pas à de l'eau saumâtre ou salée, en particulier dans la moitié nord du bassin versant des rivières Richelieu, Yamaska et Saint-François (Beaudry et al., 2011a et 2011b). Dans les régions où l'eau douce est présente dans les aquifères peu profonds, la limite inférieure de ces aquifères peu ou pas salins et leur contact avec un aquifère salin demeure inconnue faute de forages pour l'eau suffisamment profonds.

L'analyse des données disponibles pour les puits profonds forés pour le pétrole et le gaz naturel, pour lacunaires que soient les points de contrôle, permet de mieux apprécier la profondeur à laquelle l'eau douce cède le pas à l'eau salée dans le roc. Deux jeux de données peuvent être exploités pour arriver à cette fin : les indices d'eau répertoriés et l'analyse des diagraphies.

L'analyse de la répartition des indices d'eau douce et d'eau salée dans les puits profonds permet de recenser une douzaine de puits dans lesquels les deux types d'eau sont identifiés (Tableau 12). Les résultats sont très hétérogènes, avec souvent un intervalle de plusieurs centaines de mètres séparant les deux types d'indices, ce qui ôte toute utilité à la donnée, mais avec dans certains cas aussi (puits A017, A039 et A074) un intervalle très mince, inférieur à dix mètres, ce qui permet de placer avec précision la transition entre l'eau douce et l'eau salée. Ce qui ressort aussi de cette comparaison, est que la transition peut parfois survenir à grande profondeur, comme dans le cas du puits A074 à 812-815 m de profondeur environ, dans les roches de plate-forme, sous le Shale d'Utica. Ces observations reposent toutefois sur trois puits et exigent d'être confirmées par d'autres sources. Enfin les analyses d'eau recensées ne sont pas répertoriées comme des indices en tant que tels : vraisemblablement l'examen de ces analyses et leur comparaison avec les indices d'eau douce ou salée devrait permettre de mieux apprécier la profondeur à laquelle l'eau douce cède le pas à l'eau salée dans certains puits.

Une autre source de données pour identifier le contact entre l'eau douce et l'eau salée dans les puits profonds consiste en l'analyse des diagraphies. Si aucune diagraphie n'est disponible pour le puits A074 mentionné précédemment (foré en 1959), plusieurs puits forés à travers les formations de Bécancour et Pontgravé comportent des diagraphies qui peuvent aider à déterminer la salinité de l'aquifère traversé. Du fait de leur très faible perméabilité, la Formation de Nicolet et le Shale d'Utica sous-jacents n'offrent toutefois pas le même potentiel pour l'analyse pétrophysique des profondeurs de l'eau douce.

No du Puits	Indice d'eau douce		Indice d'eau salée		Intervalle (m)
	Base (m)	Unité stratigraphique	Sommet (m)	Unité stratigraphique	
A006	37,2	Dépôts meubles	272,8	Lorraine	235,6
A007	28	Dépôts meubles	272,2	Lorraine (Nicolet)	244,2
A008	90,5	Dépôts meubles	335,3	Utica	244,8
A013	214,9	Black River	297,2	Beekmantown	82,3
A016	124,4	Utica	412,1	Trenton	287,7
A017	80,8	Dépôts meubles	86,3	Trenton	5,5
A027	12,2	Queenston	1554,5	Trenton	1542,3
A039	120,4	Black River	129,5	Chazy	9,1
A040	12,8	Utica, Trenton	974,8	Beekmantown	962
A069	7,9	Dépôts meubles	927,5	Trenton, Black River	919,6
A074	811,7	Chazy	815,9	Chazy	4,2
A108	42,4	Dépôts meubles	198,1	Queenston	155,7

Tableau 12 : Inventaire des puits profonds pour lesquels des indices d'eau douce et d'eau salée sont rapportés.

4. Synthèse des données

4.1 Synthèse par bassin versant

La zone d'intérêt pour le gaz de shale s'étend de part et d'autre du fleuve Saint-Laurent. Vingt-deux bassins versants gérés par des Organismes de bassins versants sont ainsi concernés, à des degrés divers, par la problématique du gaz de shale (Figure 21). Une partie des îles de Montréal et de Laval sont également incluses dans la zone d'intérêt, de même que le fleuve Saint-Laurent et le lac Saint-Pierre, qui ne dépendent pas d'un organisme particulier. Le Tableau 13 résume l'essentiel des données disponibles et présentées dans ce rapport pour chacun des 11 bassins versants de la rive sud du Saint-Laurent présent à l'intérieur de la zone avec un potentiel de gaz de shale.

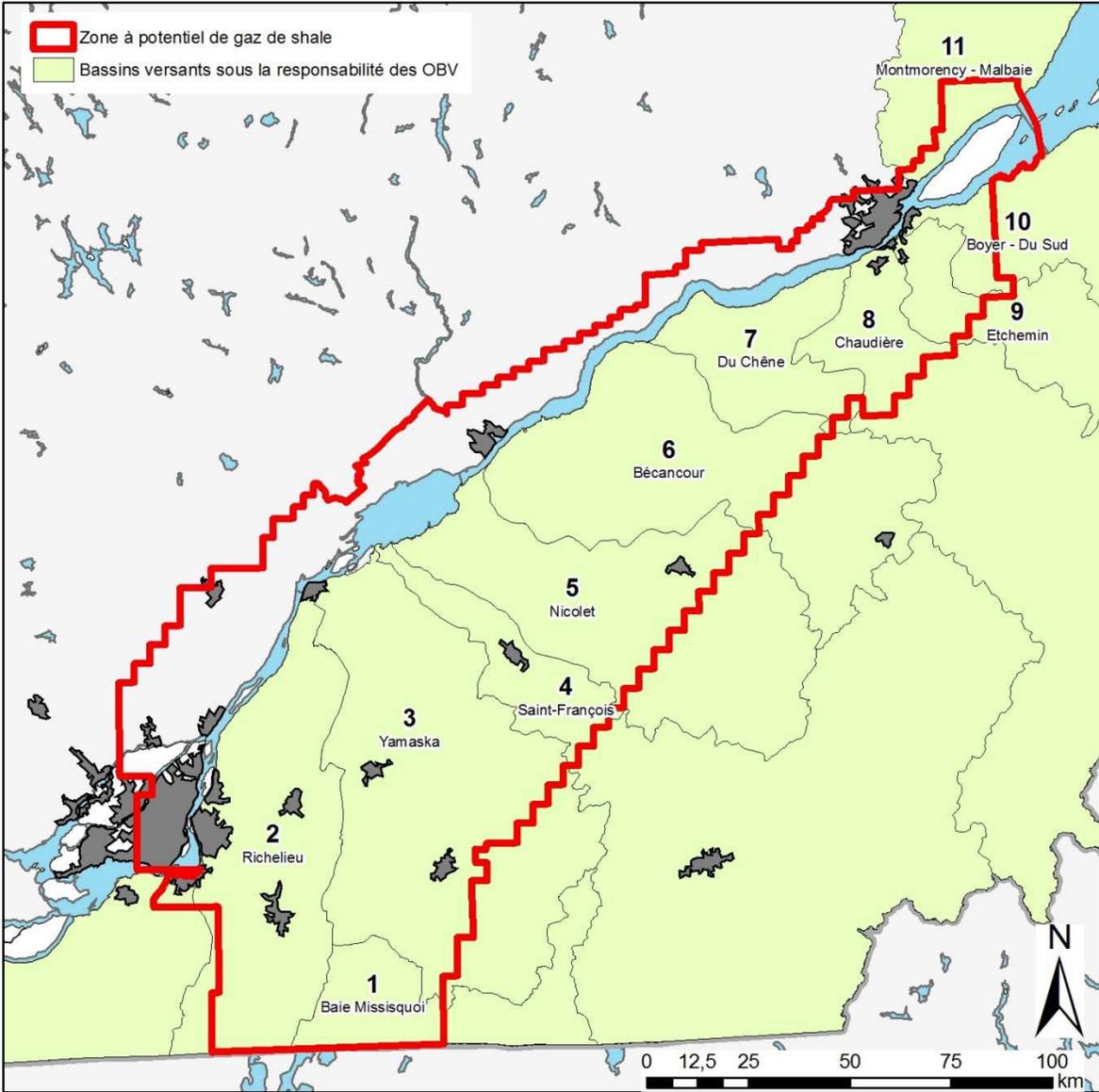


Figure 21 : Carte de localisation des bassins versants sous la responsabilité d'un OBV. Les numéros des bassins correspondent à ceux du Tableau 13.

Bassins versants	1 Baie Missisquoi	2 Richelieu	3 Yamaska	4 Saint-François	5 Nicolet	6 Bécancour	7 Du Chêne	Chaudière	Etchemin	10 Côte-du-Sud	11 Montmorency -Malbaie

Projets PACES	12 Montérégie-Est	12 Montérégie-Est	12 Montérégie-Est	12 Nicolet - Bas Saint-François	12 Nicolet - Bas Saint-François	11 Bécancour; 20 Chaudière-Appalaches	20 Chaudière-Appalaches	13 CMQ; 20 Chaudière-Appalaches	13 CMQ; 20 Chaudière-Appalaches	20 Chaudière-Appalaches	13 CMQ
Superficie dans la zone d'intérêt (km ²)	694	2816	3770	844	2077	2514	1140	724	422	308	1473
Forages pour l'eau (E)	2328	7628	1296	3467	6779	3696	2317	2585	1048	817	3916
Forages pétroliers et gaziers (P&G)	1	83	38	6	21	52	25	6	1	0	9
Puits de gaz de shale (P&G)	0	3	8	2	1	9	4	0	0	0	1
Puits avec diagraphies dans les dépôts meubles (P&G)	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Puits avec diagraphies dans le roc (P&G)	1	6	7	2	12	23	23	6	1	0	5
Puits avec carottes (P&G)	0	13	1	1	1	11	4	0	0	0	1
Essais aux tiges ou essais de production (P&G)	0	0	1	0	3	4	9	0	0	0	2
Analyse du roc par diffraction des rayons X (P&G)	1	5	2	1	3	3	1	0	1	0	2
Indices de gaz dans les dépôts meubles (P&G) (E)	0	38	230	47	158	103	0	0	0	0	0
Indices de gaz et pétrole dans le roc (P&G)	0	10	10	2	2	16	2	0	0	0	1
Analyses de gaz et pétrole dans le roc (P&G)	0	0	3	0	3	6	3	1	0	0	0
Indices d'eau dans les dépôts meubles (P&G)	0	15	8	0	2	3	0	0	0	0	0
Analyses d'eau dans les dépôts meubles (P&G)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Analyses d'eau dans les dépôts meubles (E)	0	0	45	24	27	40	10	50	20	0	24
Indices d'eau dans le roc (P&G)	0	8	10	0	2	6	2	0	0	0	0
Analyses d'eau dans le roc (P&G)	0	1	1	0	1	1	3	0	0	0	0
Analyses d'eau dans le roc (E)	0	2	928	345	738	616	313	219	278	249	228

Tableau 13 : Synthèse des principaux jeux de données disponibles pour chaque bassin versant.
CMQ : Communauté Métropolitaine de Québec; (E) : puits forés pour l'eau; (P&G) : puits forés pour le pétrole et le gaz naturel.

4.2 Synthèse par projet PACES

La zone d'intérêt pour le gaz de shale s'étend à travers onze territoires couverts par les Programmes d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec, qu'il s'agisse de programmes en

cours ou à débiter en 2012 (projets PACES, Figure 15, Tableau 9). Le Tableau 14 résume l'essentiel des données disponibles et présentées dans ce rapport pour six projets en cours ou à débiter en 2012.

Projet PACES en cours ou à débiter	Communauté Métropolitaine de Québec	Montréal Est	Bécancour	Chaudière-Appalaches	Nicolet - Bas Saint-François
Superficie dans la zone d'intérêt (km ²)	1473	7069	2523	2263	2966
Forages pour l'eau (E)	3916	22011	3706	5067	10326
Forages pétroliers et gaziers (P&G)	9	139	52	33	28
Puits de gaz de shale (P&G)	1	11	9	4	3
Puits avec diagraphies dans les dépôts meubles (P&G)	0	3	0	0	0
Puits avec diagraphies dans le roc (P&G)	5	15	23	31	14
Puits avec carottes (P&G)	1	15	12	4	2
Essais aux tiges ou essais de production (P&G)	2	1	3	10	3
Analyse du roc par diffraction des rayons X (P&G)	2	7	2	2	4
Indices de gaz dans les dépôts meubles (P&G) (E)	0	298	107	0	208
Indices de gaz et pétrole dans le roc (P&G)	1	19	15	4	5
Analyses de gaz et pétrole dans le roc (P&G)	0	3	7	4	3
Indices d'eau dans les dépôts meubles (P&G)	0	24	2	1	2
Analyses d'eau dans les dépôts meubles (P&G)	0	0	0	0	0
Analyses d'eau dans les dépôts meubles (E)	24	38	39	57	59
Indices d'eau dans le roc (P&G)	0	18	7	2	2
Analyses d'eau dans le roc (P&G)	0	2	1	3	1
Analyses d'eau dans le roc (E)	228	913	613	831	1097

Tableau 14 : Synthèse des principaux jeux de données disponibles pour des projets PACES en cours à débiter. (E) : puits forés pour l'eau; (P&G) : puits forés pour le pétrole et le gaz naturel.

4.3 Lacunes géographiques

L'essentiel de la zone d'intérêt pour le gaz de shale est couvert par des organismes ou des programmes à vocation hydrogéologique, et aucune lacune significative n'est à souligner.

Une partie des îles de Montréal et de Laval, de même que le fleuve Saint-Laurent et le lac Saint-Pierre, sont incluses dans la zone d'intérêt pour le gaz de shale mais ne dépendent pas d'un organisme particulier (Figure 7). Cette lacune n'a cependant pas d'impact réel sur le suivi hydrogéologique qui peut être fait de l'exploration et de l'exploitation du gaz de shale. L'extrême ouest de la zone d'intérêt définie par le MRNF n'est pas prospective pour le Shale d'Utica (section 2.3), et l'exploration et l'exploitation pétrolière et gazière, qu'il s'agisse de shale ou de réservoirs conventionnels, est interdite depuis le 13 juin 2011 (Loi limitant les activités pétrolières et gazières).

Avec l'approbation de deux projets PACES en 2012 (Nicolet-Saint-François et Chaudière-Appalaches), la couverture de la zone d'intérêt pour le gaz de shale sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent sera complétée en 2015. La couverture demeure incomplète au nord du fleuve mais ceci n'est pas essentiel, pour les raisons évoquées dans le cas des Organismes de bassins versants.

L'essentiel des données à caractère géologique disponibles couvre les zones 1 et 2 de Thériault (2012a), qui correspondent au domaine autochtone peu profond et profond, respectivement (Figure 7). Peu de puits permettent de caractériser l'environnement de sous-surface dans la zone de failles imbriquées (zone 3), mais cette dernière ne représente pas un intérêt stratégique immédiat dans la mesure où l'exploration et l'exploitation du Shale d'Utica demeurera pour un temps encore concentrée dans le domaine autochtone. Seuls les quelques forages existants et les données sismiques permettent de mieux comprendre l'environnement de sous-surface dans la zone 3.

Il convient de noter également qu'un certain nombre de données à caractère géologique demeurent confidentielles, en ce qui a trait notamment aux derniers forages exploratoires réalisés pour le gaz de shale. Les rapports de fin de forage et les diagraphies pour ces puits demeurent confidentiels pour une période de trois ans à compter de la date de fin de forage. Les résultats de 17 puits doivent encore être rendus publics par le MRNF en 2012 et 2013 (Tableau 15). Les rapports géologiques et les diagraphies de ces puits pourront alors compléter le jeu de données déjà disponible pour la région à l'étude. Deux de ces puits en particulier sont localisés dans la zone 3. L'un d'eux n'a pas encore été foré (A285) et aucune date de publication n'est disponible pour les données du second puits (A280).

No du Puits	Nom du Puits	Année de Forage	Profondeur (m/KB)	Status du Puits	Date de Publication
A267	Talisman Energy, Saint-Édouard No 1	2009	2584	Complété\évaluation	2012-04-10
A269	Junex, Saint-Grégoire No 2	2009	1620	Évaluation	2012-11-21
A270	Junex, Saint-Grégoire No 3	2009	875	Évaluation	2012-04-21
A271	Canbriam, Farnham No 1	2009	2507	Suspendu	2012-08-12
A273	Canbriam, Saint-Hyacinthe No 1	2009	2553	Complété\évaluation	2012-09-17
A274	Canbriam, La Présentation No 1	2009	2028	Complété\évaluation	2012-10-08
A275	Talisman Energy, Saint-Édouard HZ No 1a	2009	3181	Complété\évaluation	2012-12-08
A276	Talisman Energy, Leclercville HZ No 1a	2010	3065	Complété\évaluation	2013-03-14
A277	Talisman Energy, Gentilly HZ No 2	2009	2693	Complété\évaluation	2013-01-22
A279	Talisman Energy, Fortierville HZ No 1	2010	3390	Évaluation	2013-06-25
A280	Junex, Villeroy No 1	2010	n.d.	Suspendu	n.d.
A281	Canbriam Energy, La Présentation HZ No 1a	2010	2592	Complété\évaluation	2013-06-02
A282	Canbriam Energy, Saint-Barnabé-Sud HZ No 1	2010	2988	Évaluation	2013-07-25
A283	Talisman Energy, Sainte-Gertrude HZ No 1	2010	3170	Évaluation	2013-08-10
A284	Canbriam Energy, Saint-Hyacinthe HZ No 1a	2010	3349	Évaluation	2013-08-29
A285	Junex, Saint-Louis-de-Blandford No. 1	n.d.	n.d.	Localisation\n'à pas été foré	n.d.
A286	Canadian Forest Oil, Saint-Denis-sur-Richelieu No. 1	2010	1524	Évaluation	2013-12-04
A287	Gastem, Saint-Janvier-de-Joly No. 5	n.d.	n.d.	Suspendu	n.d.

Tableau 15 : Inventaire des forages pétroliers et gaziers réalisés ou prévus dans la zone d'intérêt et pour lesquels les données demeurent encore confidentielles à la date de rédaction du rapport.

Une année de forage non déterminée (n.d.) signifie que le forage n'a pas débuté.

4.4 Lacunes thématiques

L'exercice de synthèse des données géologiques et hydrogéologiques disponibles pour le Shale d'Utica, les groupes de Lorraine et de Queenston, ainsi que pour les dépôts meubles, a permis de mettre en lumière un certain nombre de lacunes thématiques qui pourraient être en partie comblées en tirant parti des données disponibles :

Ainsi le cadre stratigraphique du Shale d'Utica et des unités sus-jacentes mérite d'être raffiné. Un modèle stratigraphique séquentiel régional pour le Shale d'Utica existe déjà, qui doit encore être adapté pour tenir compte des variations locales. Ce modèle reste à développer pour les groupes de Lorraine et de Queenston. Les outils disponibles pour arriver à ces fins sont nombreux : cartes d'affleurements (parfois à réinterpréter, là où le Shale d'Utica est absent comme dans la région de Montréal), carottes dans les groupes de Lorraine et de Queenston, diagraphies spécialisées de type rayonnement gamma spectral, etc.

Les contacts entre les différentes unités, tels que recensés dans la banque de données SIGPEG à partir des rapports de fin de forage, sont sujets à caution et méritent d'être réinterprétés sur la base des travaux récents. Une attention particulière doit être portée aux contacts entre les unités supérieures (formations de Lotbinière et Bécancour), qui sont moins bien définies que ceux du Shale d'Utica. Les diagraphies, les carottes, les résultats d'analyse de fluorescence et de diffraction des rayons X sont les outils à privilégier pour ce travail, les descriptions géologiques des rapports de fin de forage devant en revanche être utilisées avec circonspection.

Les propriétés physiques des aquifères profonds, en particulier pour les formations de Lotbinière et Bécancour, peuvent être approchées par le biais des diagraphies (estimation de la porosité, de la saturation en eau, de la salinité et du gradient géothermique notamment), des carottes (analyses en laboratoire, identification visuelle des intervalles gréseux, calcaireux ou silteux, corrélation des carottes aux diagraphies par des mesures de rayonnement gamma) et des rapports d'analyse d'eau et de gaz. L'identification des intervalles perméables en profondeur et la caractérisation de leurs propriétés en tant qu'aquicludes ou aquitards n'a pas encore été entreprise de façon systématique à partir des données pétrolières (perméabilité intergranulaire ou de fracture, gradients de température et de pression, etc.).

Les rapports d'analyse de fluides (eau, gaz et pétrole) sont disponibles mais n'ont pas encore été synthétisés. Leur examen statistique devrait permettre de mieux définir le portrait régional des fluides présents en sous-surface (contact eau douce/eau salée, présence de gaz dissouts ou d'hydrocarbures immiscibles) et aider à mieux contraindre les modèles pétrophysiques (résistivité apparente de l'eau en diagraphie).

Le lien entre les fluides présents en profondeur et ceux documentés dans les aquifères peu profonds devrait également être complété par l'échantillonnage et l'analyse systématique des gaz dissouts. Seul un petit secteur de la région d'intérêt pour le gaz de shale comporte des indices, au demeurant nombreux, de la présence de méthane dans l'eau, et aucune analyse chimique ou isotopique n'est disponible pour ces indices.

Les diagraphies disponibles pour les shales (Shale d'Utica et Formation de Nicolet essentiellement) ne peuvent pas être exploitées de la même façon que dans le cas des unités plus gréseuses ou carbonatées sus-jacentes, tant que le calage avec des analyses de carottes ne sera pas possible. Les rapports de fin de forage des puits encore confidentiels, lorsqu'ils seront disponibles, permettront peut-être d'augmenter le volume d'analyses de carottes disponibles. En attendant, les diagraphies enregistrées dans les shales peuvent tout même être utilisées pour mieux caractériser les propriétés géomécaniques de la roche. En

particulier, les diagraphies soniques pour lesquelles les ondes de compression et de cisaillement sont disponibles permettent de classer les intervalles de shale selon leur ductilité relative. Ceci devrait permettre de mettre en évidence les intervalles plus ductiles qui pourraient agir comme barrière à la propagation des fractures naturelles ou artificielles, et ainsi de juger du degré d'étanchéité des roches recouvrant le Shale d'Utica.

Les diagraphies acoustiques et de résistivité enregistrées dans le shale peuvent également servir à souligner les variations verticales relatives du gradient de pression à travers les différentes unités stratigraphiques. Si les résultats ne sont pas univoques, ils peuvent toutefois être combinés à l'analyse des variations de vitesse des ondes sismiques et de la vitesse de pénétration du trépan lors des forages pour mettre en lumière des intervalles potentiellement surpressurisés au sein des shales.

Enfin, l'élaboration d'un modèle mathématique hydrogéologique destiné à étudier les liens préférentiels potentiels entre le Shale d'Utica et les aquifères sus-jacents passe nécessairement par le développement d'un ou plusieurs modèles structuraux conceptuels qui tiennent compte de la variabilité tectonique et stratigraphique documentée dans la région d'intérêt pour le gaz de shale. Les observations réalisées en affleurement, les levés géophysiques (sismiques et magnétiques) ainsi que les rapports de fin de forage et les diagraphies, constituent les principaux jeux de données disponibles pour arriver à cette fin.

5. Conclusions

Ce rapport synthétise l'essentiel des connaissances et des données publiques disponibles sur le Shale d'Utica et les unités sus-jacentes, sédiments quaternaires inclus, dans la zone d'intérêt pour le gaz de shale. L'objectif de cette synthèse est de supporter et orienter des travaux futurs destinés à évaluer le degré d'imperméabilité géologique des successions rocheuses entre les shales ciblés pour l'exploration et l'exploitation du gaz de shale d'une part, et les aquifères peu profonds d'autre part.

La zone d'intérêt pour le gaz de shale, telle que définie par le MRNF, s'étend à travers les Basses-Terres du Saint-Laurent de part et d'autre du fleuve Saint-Laurent, de Québec à Montréal et au Lac Champlain. L'examen des données géologiques de surface et de sous-surface indique qu'il est toutefois possible de restreindre cette zone, en particulier sur ses bordures ouest et nord-ouest, et que l'essentiel de l'effort de caractérisation hydrogéologique devrait porter sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent.

La présente synthèse démontre qu'il n'existe pas de réelle lacune géographique dans la couverture des données déjà disponibles (géologie et forages pétroliers et gaziers) ou qui seront disponibles au terme des projets réalisés dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES) actuellement en cours (soit en 2013 et en 2015). Les projets PACES couvrent en effet l'ensemble de la rive sud du fleuve Saint-Laurent à l'intérieur de la zone d'intérêt. Quant aux données géologiques de sous-surface, elles demeurent certes plus lacunaires dans le secteur sud-est, qui correspond au domaine appalachien, mais cette région ne paraît pas représenter un intérêt immédiat pour l'exploration – et *a fortiori* l'exploitation – du gaz de shale.

Plusieurs lacunes de nature thématique sont en revanche mises en lumière, notamment en ce qui a trait aux propriétés physiques et chimiques de l'environnement hydrogéologique profond. Si les principales caractéristiques des aquifères proches de la surface – dépôts meubles et roc fracturé peu profond – sont ou seront bien documentées grâce aux efforts de cartographie des aquifères initiés dans les années 1960 et qui culminent avec la réalisation des projets PACES en cours (compilation des données existantes, travaux de terrain et modélisation), la caractérisation de l'environnement hydrogéologique profond ne pourra être approchée que par l'intermédiaire des données disponibles pour les puits d'exploration pétrolière et gazière déjà forés. Une revue de détail de ces données géologiques a été réalisée afin d'orienter et de faciliter le travail d'intégration avec les données hydrogéologiques peu profondes. En particulier, le cadre tectonostratigraphique, la disponibilité des enregistrements diagraphiques et des carottes, ainsi que les propriétés physiques et chimiques du roc (composition minéralogique, pression, température, porosité et perméabilité notamment) font ici l'objet d'une synthèse détaillée. Ce travail de compilation s'accompagne d'un recensement des informations disponibles sur la nature des fluides documentés dans le roc et les dépôts meubles à partir des forages pétroliers et gazier, en particulier les indices et analyses d'eau, de gaz et de pétrole.

Une grande partie des lacunes thématiques identifiées pourraient être comblées en tirant parti des données géologiques publiques inventoriées dans le présent rapport, au moins à une échelle semi-quantitative ou semi-régionale. La variabilité géologique naturelle, la répartition des lignes sismiques et des forages pétroliers et gaziers, de même que la nature et la qualité variables des données publiées pour ces forages, ne

permettent cependant pas d'espérer caractériser l'environnement hydrogéologique profond avec le même degré de finesse que celui obtenu pour les dépôts meubles et le roc fracturé peu profond.

Références

Abanda, P.A., Hannigan, R.E., 2006. Effect of diagenesis on trace element partitioning in shales. *Chemical Geology*, v. 230, p. 42-59.

Aguilera, R., 1978. Log analysis of gas-bearing fracture shales in the Saint Lawrence Lowlands of Quebec. SPE 7445-MS, SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition, 1-3 October 1978, Houston, Texas. 16 p.

Ahmat, D.H., 2011. Basses-Terres du Saint-Laurent et leur potentiel en hydrocarbure. Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 174 p.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. EPA/600/2-87-035, 455 p.

Avard, K., Larocque, M., 2011. Rôle hydrogéologique régional des tourbières sur l'aquifère du bassin versant de la rivière Bécancour. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 7 p.

BAPE, 2010. Comparaison des shales d'Utica et de Lorraine avec des shales en exploitation. Association pétrolière et gazière du Québec, Documentation déposée, No DB25, 7 octobre 2010, 2 pages.

BAPE, 2011. *Développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec*. Rapport 273 d'enquête et d'audience publique, 28 février 2011, 323 p.

Beaudin, I., Beaudry, C., Benoit, N., Carrier, M.A., Gloaguen, E., Lefebvre, R., Michaud, A., Parent, M., Rivard, C., St-Laurent, I., Vigneault, H., 2010. Rapport d'étape de la phase I. Projet d'acquisition des connaissances en Montérégie Est, Rapport préliminaire soumis au MDDEP par l'INRS, la CGC, l'IRDA et l'OBV Yamaska, 23 mars 2010.

Beaudry, C., Malet, X., Lefebvre, R., Rivard, C., 2011a. Délimitation des eaux souterraines saumâtres en Montérégie Est, Québec, Canada. Commission géologique du Canada, Dossier public 6970, août 2011, 26 p. 10.4095/289123.

Beaudry, C., Lefebvre, R., Rivard, C., Malet, X., 2011b. Hydrogéochimie régionale des trois bassins versants de la Montérégie Est. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 8 p.

Beaulieu J., Lajoie J., Hubert C., 1980. Provenance et modèle de dépôt de la Formation de la Rivière Nicolet; flysch taconique du domaine autochtone et du domaine externe des Appalaches du Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 17, p. 855-865.

Benoît, N., 2005. Définition de la transmissivité du bassin de la rivière Châteauguay par modélisation inverse. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada, 113 p.

Benoît, N., Forest, G., Roy, N., Nastev, M., 2008. Développement d'un modèle hydrogéologique conceptuel pour le bassin de la rivière Chaudière, Québec. 9th Joint CGS/IAH-CNC Conference, Edmonton, 8 p.

Benoît, N., Nastev, M., Blanchette, D., Roy, N., 2009. Hydrogéochemie du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec. 10th Joint CGS/IAH-CNC Conf., Halifax, 8 p.

Benoît, N., Blanchette, D., Nastev, M., Cloutier, V., Marcotte, D., Brun Kone, M., Molson, J.W., 2011. Groundwater geochemistry of the Lower Chaudière River watershed, Québec. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 8 p.

Bertrand R., Lavoie V., 2006. Hydrocarbon source rocks and organic maturation of lower Paleozoic successions in the St. Lawrence Platform and in the external domain of the Quebec Appalachians. Geological Association of Canada/Mineralogical Association of Canada, Annual meeting, Abstracts with Program, p. 13.

Blanchette, D., 2006. Caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec, Canada, 71 p. et annexes.

Blanchette, D., Lefebvre, R., Nastev, M., Lamontagne, C., Croteau, A., Lavigne, M.-A., Roy, N., Cloutier, V., 2005. Hydrochemical assesment of groundwater in the Chateauguay River watershed, Quebec. *Proceedings, 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint CGS/IAH Conference*, Saskatoon, Canada, October 2005, Session 4E, Paper 555, 8 p.

Blanchette, D., Lefebvre, R., Nastev, M., Cloutier, V., 2010. Groundwater quality, geochemical processes and groundwater evolution in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), 503-526.

Blouin, M., Gloaguen, E., Pugin, A., Chasseriau, P., 2011. A 3D integrated approach for geological modeling to improve hydrogeological characterization. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 5 p.

Boisvert É., Michaud, Y., 1998. Gestion des données de forage à l'aide d'une approche topologique : application au projet de cartographie hydrogéologique du piémont laurentien, Québec. *Dans recherches en cours 1998-E* ; Commission géologique du Canada, pp. 117-124.

Boisvert, É., Michaud, Y., 1999. GIMS Geoenvironmental information management system. Sommaire exécutif de la 3^e conférence biennale, Americana 1999, 24-26 mars 1999, Montréal, p. 367-368.

Bolduc, A.M., Ross, M., 2001. Géologie des formations superficielles, Lachute-Oka, Québec. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3520, planche cartographique.

Bourque, É., Michaud, Y., Lefebvre, R., Boisvert, É., 1998. Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf: hydrogéochimie des eaux souterraines. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3664-c, planche cartographique.

Brodylo, J., Chatellier, J.-Y., Matton, G., Rheault, M., 2011. The Stability of Fault Systems in the South Shore of the St. Lawrence Lowlands of Quebec: Implications for Shale Gas Development. CSUG/SPE 149307-MS, Canadian Unconventional Resources Conference, 15-17 November 2011, Alberta, Canada, 19 p.

Brun Kone, M.Y., Molson, J.W., Benoit, N., Nastev, M., 2011. A 3D Numerical Model of Groundwater Flow in the Chaudière River Basin, Québec, GeoHydro2011 Conference, Québec.

Castonguay, S., Dietrich, J., Shinduke, R., Laliberté, J.-Y., 2006. Nouveau regard sur l'architecture de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches du sud du Québec par le retraitement des profils de sismique réflexion M-2001, M-2002 et M-2003. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 5328, 19 p.

CBM Solutions, 2009. Mineralogical analyses by X-Ray diffraction of potential gas shales - Molopo - Wells A166, A184 and A194. SIGPEG, rapport 1972OA166-05, 17 p. Voir site internet <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca>

Chatellier, J.-Y., Quartero, E., Urban, M., Molgat, M., Deconinck, A., Francus, P., 2011a. Power and Limitations of X-ray Fluorescence from Cuttings: A Test in the Utica and Lorraine Shales from Quebec. Search and Discovery Article 40766, Posted June 30, 2011, adapted from oral presentation at AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, USA, April 10-13, 2011. Voir site internet http://www.searchanddiscovery.com/documents/2011/40766chatellier/ndx_chatellier.pdf

Chatellier, J.-Y., Ferworn, K., Lazreg Larsen, N., Ko, S., Flek, P., Molgat, M., Anderson, I., 2011b. Overpressure in Shale Gas – When Geochemistry and Engineering Data Meet and Agree. Search and Discovery Article 40767, Posted June 30, 2011, adapted from oral presentation at AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, USA, April 10-13, 2011. Voir site internet http://www.searchanddiscovery.com/documents/2011/40767chatellier/ndx_chatellier.pdf

Clark, T.H., 1955. Région de St-Jean-Beloeil. SIGEOM, rapport RG 66, 92 p.

Clark, T.H., 1964a. La région de Saint-Hyacinthe (moitié ouest). SIGEOM, rapport RG 101, 148 p.

Clark, T.H., 1964b. Région de Yamaska-Aston. SIGEOM, rapport RG 102, 208 p.

Clark, T.H., 1964c. Région d'Upton. SIGEOM, rapport RG 100, 39 p.

Clark, T.H., 1972. Région de Montréal. SIGEOM, rapport RG 152, 260 p.

- Clark, T.H., 1977. Région de Granby (w). SIGEOM, rapport RG 177, 109 p.
- Clark, T.H., Globensky, Y., 1973. Région de Portneuf et parties de St-Raymond et de Lyster, comtés de Portneuf et de Lotbinière. SIGEOM, rapport RG 148, 110 p.
- Clark, T.H., Globensky, Y., 1975. Région de Grondines. SIGEOM, rapport RG 154, 159 p.
- Clark, T.H., Globensky, Y., 1976a. Région de Bécancour et partie nord-est de la région d'Aston. SIGEOM, rapport RG 165, 66 p.
- Clark, T.H., Globensky, Y., 1976b. Région de Sorel et partie sud-est de Saint-Gabriel-de-Brandon. SIGEOM, rapport RG 155, 151 p.
- Clark, T.H., Globensky, Y., 1976c. Région de Trois-Rivières. SIGEOM, rapport RG 164, 87 p.
- Clark, T.H., Globensky, Y., 1976d. Région des Laurentides (moitié est) et de Rawdon (partie sud-est). SIGEOM, rapport RG 157, 112 p.
- Clark, T.H., Globensky, Y., 1977. Région de Verchères. SIGEOM, rapport RG 190, 64 p.
- Cloutier, V., 2004. Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère de roche sédimentaire paléozoïque des Basses-Laurentides, Québec, Canada. Thèse doctorale, INRS-ETE, Québec, Canada, Juin 2004.
- Cloutier, V., Bourque, É., Lefebvre, R., Savard, M., Nastev, M., Martel, R., 2000. Regional hydrogeochemical characterization of groundwater in fractured aquifers of the St. Lawrence Lowlands. Proceedings, 1st Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 53rd Canadian Geotechnical Conference, Oct. 15-18, 2000, Montreal, Canada, p. 3-10.
- Cloutier, V., Bourque, É., Lefebvre, R., Savard, M., Nastev, M., Martel, R., Therrien, R., 2001. Regional groundwater hydrogeochemistry of fractured rock aquifers in south-western Quebec. Proceedings, 2nd Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 54th Canadian Geotechnical Conference, Sept. 16-19, 2001, Calgary, Canada, p. 1068-1076.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M., Therrien, R., 2004. Groundwater origin and geochemical processes in the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canada. In D. Demers, D. Leahy, R. Lefebvre, S. Leroueil et R. Martel, ed., Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, ISBN 0-920505-29-5, Session 2B, p. 18-25.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M., Bourque, É., Therrien, R., 2006. Hydrogeochemistry and groundwater origin of the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada. *Hydrogeology Journal*, v. 14(4), p. 573-590.

Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, v. 353(3-4), p. 294-313.

Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M., Therrien, R., 2010. Desalination of a sedimentary rock aquifer system invaded by Pleistocene Champlain Sea water and processes controlling groundwater geochemistry. *Environmental Earth Sciences*, v. 59(5), p. 977-994.

COBARIC et UPA 2008. Atlas des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Chaudière : secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière. CD-ROM

Comeau, F.-A., Kirkwood, D., Malo, M., Asselin, E., Bertrand, R., 2004. Taconian mélanges in the parautochthonous zone of the Quebec Appalachians revisited : implications for foreland basin and thrust belt evolution. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 41, p. 1473-1490.

Comeau, F.-A., Bédard, K., Malo, M., 2011. Lithostratigraphie standardisée du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent basée sur l'étude des diagraphies. Congrès annuel de l'Association pétrolière et gazière du Québec. Montréal, 24 au 25 octobre 2011. Voir site internet http://chaireco2.ete.inrs.ca/sites/chaireco2.ete.inrs.ca/files/Comeau_et_al_APGQ2011.pdf

Comeau, F.-A., Bédard, K., Malo, M., 2012. Lithostratigraphie standardisée du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent basée sur l'étude des diagraphies. Rapport INRSCO2-2012-V1.4. Sous presse.

Côté, M. J., Lachance, Y., Lamontagne, C., Nastev, M., Plamondon, R., Roy, N., 2006. Atlas du bassin de la rivière Châteauguay: Territoire, eau souterraine, aménagement. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 64 p.

Croteau, A., 2006. Distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional du bassin versant de la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec, Canada.

Croteau, C., Nastev, M., Lefebvre, R., Lamontagne, L., Lamontagne, C., Lavigne, M.-A., Blanchette, D., 2005. Estimation of spatial and temporal distribution of recharge to des Anglais aquifer system, Quebec. Proceedings, 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint CGS/IAH Conference, Saskatoon, Canada, October 2005, Session 8E, Paper 610, 8 p.

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

Dagenais, M.-P., 2010. Analyse sociologique de l'allocation de l'eau souterraine: L'exemple de Franklin, Québec. *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 543-556.

Dagenais, M. P. et M. Nastev. 2005. A case study of a conflict over groundwater: When hydrogeology is not sufficient. In Proceedings of the 58th Canadian Geotechnical Society and 6th Joint Groundwater Specialty Conference of the International Association of Hydrogeologists-Canadian National Chapter and Canadian Geotechnical Society, Saskatoon, Saskatchewan, September 18-21, 2005, 8 pp., CD version.

Dubé-Loubert, H., Parent, M., Brazeau A., 2011. Initiative cartographique Quaternaire dans le cadre de la caractérisation régionale des aquifères pour les bassins contigus des rivières Richelieu, Yamaska et de la Baie Missisquoi. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 7 p.

Étienne, M., 2002. Caractérisation in situ des milieux fracturés à l'aide des diagraphies géophysiques. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 246 p.

Fagnan, N., 1998. Cartographie hydrogéologique régionale et vulnérabilité des aquifères de la MRC de Portneuf. Mémoire de maîtrise, INRS-Géoressources, Québec, Canada, Novembre 1998, 219 p., annexes et planches cartographiques.

Fagnan, N., Michaud, Y., Lefebvre, R., Boisvert, É., Parent, M., Martel, R., Paradis, D., Larose-Charette, D., 1998. Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf: hydrostratigraphie et piézométrie des aquifères granulaires de surface. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3664-b, planche cartographique.

Fagnan, N., Bourque, É., Michaud, Y., Lefebvre, R., Boisvert, É., Parent, M., Martel, R., 1999. Hydrogéologie des complexes deltaïques sur la marge nord de la mer de Champlain. *Hydrogéologie*, v. 4, p. 9-22.

Faure, S., Tremblay, A., Angelier, J., 1996a. Alleghanian paleostress reconstitution in the northern Appalachians : Intraplate deformation between Laurentia and Gondwana. *Geological Society of America Bulletin*, v. 108, p. 1467-1480.

Faure, S., Tremblay, A., Angelier, J., 1996b. State of intraplate stress and tectonism of northeastern America since Cretaceous times, with particular emphasis on the New England-Quebec igneous province. *Tectonophysics*, v. 255, p. 111-134.

Faure, S., Tremblay, A., Malo, M., 2004. Reconstitution of Taconian and Acadian paleostress regimes in the Quebec and northern New Brunswick Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 41, p. 619-634.

Faure, S., Tremblay, A., Malo, M., Angelier, J., 2006. Paleostress analysis of Atlantic crustal extension in the Quebec Appalachians. *The Journal of Geology*, v. 114, p. 435-448.

Gagné, S., Larocque, M., Chaumont-Blonsky, K., Fernandes, S., 2011. Propriétés hydrogéologiques des formations aquifères du bassin versant de la rivière Bécancour (Québec, Canada). *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 7 p.

Girard, F., 2001. Architecture et hydrostratigraphie d'un complexe morainique et deltaïque dans la région de Saint-Raymond de Portneuf, Québec. Mémoire de maîtrise, INRS-Géoressources, Québec, Canada, Octobre 2001, 185 p.

- Giroux, I., Roy, N., Lamontagne, C., 2010. Présence de pesticides dans l'eau souterraine en milieu agricole: Étude pilote du bassin versant de la Rivière Châteauguay. *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 527-542.
- Globensky, Y., 1972. Gaz – Pétrole – Eau salée dans les puits forés au Québec entre 1860 et 1970. SIGEOM, rapport S 127, 57 p.
- Globensky, Y., 1978. Région de Drummondville. SIGEOM, rapport RG 192, 107 p.
- Globensky, Y., 1981. Régions de Lacolle Saint-Jean(s). SIGEOM, rapport RG 197, 197 p.
- Globensky Y., 1987. Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Mémoire 85-02, 70 p.
- Globensky, Y., 1993. Lexique stratigraphique canadien - Région des Appalaches, des Basses-Terres du Saint-Laurent et des îles de la Madeleine. SIGEOM, rapport DV 91-23, 327 p.
- Godbout, P.-M., Lamothe, M., Larocque, M., 2011. Hydrostratigraphy and Quaternary geology of the Bécancour area watersheds, Québec. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 7 p.
- Granger, B., 1974. Étude préliminaire sur les shales fracturés de la zone externe des Appalaches du Québec entre la Rivière Nicolet et la Ville de Québec, projet 2045 - rapport #5723. SIGPEG, rapport 1974TA000-10, 87 p. Voir site internet <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca>
- Grenier, C., McCormack, R., 1985. Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, région de Granby. Gouvernement du Québec, Ministère de l'environnement, Direction des eaux souterraines et de consommation.
- Hamblin, A. P., 2006. The « shale gas » concept in Canada: a preliminary inventory of possibilities. Geological Survey of Canada, Open File 5384, 108 p.
- Hamel, A., 2002. Détermination de la recharge des aquifères de roc fracturé du sud-ouest du Québec. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 271 p.
- Hamel, A., Therrien, R., Gélinas, P., 2001. Groundwater recharge of fractured rock aquifers in southwestern Québec. In: 2nd Joint IAH-CGS Groundwater Specialty Conf., Calgary, p. 1078-1084.
- Karanta, G., 2002. Étude comparative de méthodes de détermination de périmètres de protection autour des ouvrages de captage dans les aquifères captifs fracturés du sud-ouest du Québec. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec, Canada, Octobre 2002, 76 p. et annexes.
- Karanta, G., Martel, R., Nastev, M., Therrien, R., Paradis, D., Lefebvre, R., 2001. Comparative study of methods for wellhead protection area delineation in fractured rock. Proceedings, 2nd Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 54th Canadian Geotechnical Conference, Sept. 16-19, 2001, Calgary, Canada, p. 1350-1357.

Konstantinovskaya, E. A., Rodriguez, D., Kirkwood, D., Harris, L. B., Thériault, R., 2009. Effects of Basement Structure, Sedimentation and Erosion on Thrust Wedge Geometry: An Example from the Quebec Appalachians and Analogue Models. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 57, p. 34-62.

Konstantinovskaya, E., Malo, M., Castillo, D. A., 2012. Present-day stress analysis of the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin (Canada) and implications for caprock integrity during CO2 injection operations. *Tectonophysics*, v. 518-521, p. 119-137.

Lamontagne, C., Nastev, M., 2010. Survol hydrogéologique de l'aquifère transfrontalier du Bassin Versant de la Rivière Châteauguay, Canada - États Unis: *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 359-376.

Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L., 2010. Rapport d'étape Phase I. Projet de connaissances des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour. Rapport de présenté au MDDEP, 31 mars 2010.

Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L., 2011. Rapport d'étape Phase II. Projet de connaissances des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour. Rapport de présenté au MDDEP, 31 mars 2011.

Larose-Charrette, D., 2000. Modélisation hydrogéologique régionale des aquifères libres de la MRC de Portneuf. Mémoire de maîtrise, INRS-Géoressources, Québec, Canada, Avril 2000, 308 p.

Larose-Charette, D., Lefebvre, R., Fagnan, N., Michaud, Y., Therrien, R., 2000. Groundwater flow dynamics in unconfined deltaic aquifers of the Portneuf area, Quebec, Canada. Proceedings, 1st Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 53rd Canadian Geotechnical Conference, Oct. 15-18, 2000, Montreal, Canada, p. 285-292.

Latifovic, R., Pouliot, D., Nastev, M., 2010. Earth observation based land cover for regional aquifer characterization. *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 433-450.

Laurencelle, M., Morin, R.H., Lefebvre, R., Rivard, C., Paradis, D., Lavoie, D., Benoît, N., Carrier, M.A., Beaudry, C., 2011. Initial characterization of fractures and hydraulic properties of a rock aquifer system, Montérégie Est, Quebec, Canada. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 7 p.

Lavigne, M.-A., 2006. Modélisations numériques de l'écoulement régional de l'eau dans le bassin versant de la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec, Canada, 106 p. et annexes.

Lavigne, M.-A., Nastev, M., Lefebvre, R., Blanchette, A., Croteau, A., Benoit, N., Lamontagne, C., 2005. Hydraulic properties of sedimentary rock aquifers in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada. Proceedings, 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint CGS/IAH Conference, Saskatoon, Canada, October 2005, Session 3E, Paper 550, 8 p.

Lavigne, M.-A., Nastev, M., Lefebvre, R., 2010a. Numerical simulation of groundwater flow in the Chateauguay River aquifers. *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 469-486.

Lavigne, M.-A., Nastev, M., Lefebvre, R., Croteau, A., 2010b. Regional sustainability of the Châteauguay River aquifers. *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 487-502.

Lavoie, D. 2004. Geological, stratigraphic and structural settings of the Chateauguay Area. St. Lawrence platform of southern Quebec. Quebec: Geological Survey of Canada, 12 p.

Lavoie, D., Hamblin, A. P., Thériault, R., Beaulieu, J., Kirkwood, D., 2008. The Upper Ordovician Utica Shales and Lorraine Group flysch in southern Québec: Tectonostratigraphic setting and significance for unconventional gas. Geological Survey of Canada, Open File 5900, 56 p.

Lavoie, J.-Y., Marcil, J.-S., Dorrins, P. K., Lavoie, J., Aguilera, R., 2011. Natural-Gas Potential in the St. Lawrence Lowlands of Quebec: A Case Study. SPE 137593-PA, Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada, 12 p.

Lefebvre, P., 1982. Gradient géothermique dans les Basses-Terres - février 1980 - rapport #9206. SIGPEG, rapport 1980TA000-01, 9 p. Voir site internet <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca>

Lefebvre, R., Michaud, Y., Martel, R., Fagnan, N., 1999. La cartographie hydrogéologique régionale – Un outil essentiel à l'inventaire des ressources en eaux souterraines. Mémoire du Centre géoscientifique de Québec présenté au BAPE dans le cadre de la consultation publique sur « La gestion de l'eau au Québec », 22 p. et annexes.

Lefebvre, R., Rivard, C., Carrier, M.A., Gloaguen, E., Parent, M., Pugin, A., Pullan, S., Benoît, N., Beaudry, C., Ballard, J.M., Chassériau, P., Morin, R.H., 2011. Integrated regional characterization of the Montérégie Est aquifer system, Quebec, Canada. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 8 p.

Lemieux, J.-M., 2002. Caractérisation multiapproche à petite échelle de l'écoulement de l'eau souterraine dans un aquifère carbonaté fracturé et implications pour les changements d'échelle. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 100 p.

McCormack, R., 1979. Étude Hydrogéologique, bassin versant de la Saint-François. Programme de Connaissances Intégrées. Gouvernement du Québec, Ministère des ressources naturelles, Direction générale des Eaux. Rapport E.A.-16, 55 p.

McCormack, R., 1985. Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, bassin de la rivière Yamaska. Gouvernement du Québec, Ministère de l'environnement, Direction des eaux souterraines et de consommation.

MDDEP, 2008a. *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires*. Contribution 2003016 de la Commission Géologique du Canada, réalisée conjointement avec l'INRS-Géoressources (maintenant INRS-Eau, Terre et Environnement), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, la MRC de Portneuf et l'université Laval. Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51189-2 (pdf), 101 p.

MDDEP, 2008b. *Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées*. Commission Géologique du Canada, INRS-Eau, Terre et Environnement, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51190-8 (pdf), 162 p.

MDDEP, 2008c. Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec – Guide du demandeur. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, ISBN : 978-2-550-53933-9 (pdf), 4 p.

MDDEP, 2011. Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec – Guide des conditions générales – Troisième appel de propositions. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, ISBN : 978-2-550-53934-6 (pdf), 8 p. et annexes.

Meyzonnat, G., Larocque, M., 2011. Étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine sur la zone Bécancour (Centre-du-Québec). *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 7 p.

Michaud, Y., Boisvert, É., Lefebvre, R., Fagnan, N., Parent, M., Martel, R., Bourque, É., Bolduc, A. M., Paradis, D., Murat, V., Girard, F., Larose-Charette, D., Fortier, R., Therrien, R., Vitali, F., Savard, M. M., 2000. La cartographie hydrogéologique régionale : Un exemple d'application des systèmes d'information géographique (SIG) pour la gestion des ressources en eau souterraine. *Proceedings, 1st Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Oct. 15-18, 2000, Montreal, Canada, p. 293-300.

Morin, C., 1991. Rapport de qualification, poursuite des travaux d'exploration Villeroy. SIGPEG, rapport 1990TA782-01, 52 p. Voir site internet <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca>

Morin, R., R. Godin, M. Nastev, Rouleau, A., 2007. Hydrogeologic controls imposed by mechanical stratigraphy in layered rocks of the Chateauguay River Basin, a U.S. - Canada transborder aquifer. *Journal of Geophysical Research* 112, B04403: 1-12.

MRNF, 2008. Compilation pétrolière et gazière. Basses-Terres du Saint-Laurent et sud des Appalaches. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, SIGPEG, carte AB_CE_250K_C. Voir site internet <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca>

Muehlenbachs, K., 2012. Identifying the sources of fugitive methane associated with shale gas development, updated with new data, Jan 2012. Original presented on November 14, 2011 at *Managing the risks of shale gas: Identifying a pathway toward responsible development* held at Resources For the Future, Washington, DC. Voir site internet <http://www.rff.org/Events/Pages/Managing-the-Risks-of-Shale-Gas.aspx>

Murat, V., 2000. Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : application aux aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire de maîtrise, INRS-Géoressources, Québec, Canada, Novembre 2000, 127 p. et annexes.

Murat, V., Martel, R., Michaud, Y., Fagnan, N., Beaudoin, F., Therrien, R., 1998. Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf: comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. Planche cartographique, Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3664-d.

Murat, V., Martel, R., Michaud, Y., Savard, M., Paradis, D., Nastev, M., Lefebvre, R., Hamel, A., Therrien, R., 2003. Comparing Various Vulnerability Evaluation Methods in Two Canadian Hydrogeological Settings. *Proceedings of the 1st Int. Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk*, Salamanca, Mexique, 28-30 mai 2003, v. 1, p. 60-70.

Murat, V., Martel, R., Savard, M.M., Nastev, M., Paradis, D., Michaud, Y., Lefebvre, R., Therrien, R. 2004. Comparing Vulnerability mapping methods in two Canadian hydrogeological settings. In D. Demers, D. Leahy, R. Lefebvre, S. Leroueil et R. Martel, ed., *Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference*, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, ISBN 0-920505-29-5, Session 3B2, p. 1-5.

Nastev, M., Savard, M., Lapcevic, P., Paradis, D., Lefebvre, R., Martel, R., 2001. Investigation of hydraulic properties of regional fractured rock aquifers. *Proceedings, 2nd Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference*, 54th Canadian Geotechnical Conference, Sept. 16-19, 2001, Calgary, Canada, p. 1058-1066.

Nastev, M., Savard, M.M., Paradis, D., Lefebvre, R., Ross, M., Rivera, A., 2002. Étude quantitative des ressources en eau souterraine du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec. Partie II des livrables, Rapport final, Commission Géologique du Canada, remis le 15 mai 2002 à Développement économique du Canada, 36 p.

Nastev, M., Lamontagne, C., Tremblay, T., Lavoie, D., Hardy, F., Lamothe, M., Croteau, A., Blanchette, D., Lavigne, M.-A., Roy, N., Morin, R., Corland, B., Paradis, D., Benoît, N., Gaudin, R., Dagenais, M.P., Lefebvre, R., Marcotte, D., Rouleau, A., Chapuis, R., Guay, L., 2004a. Hydrogeological overview of the transboundary aquifers in the Châteauguay River basin, Canada-United States. In D. Demers, D. Leahy, R. Lefebvre, S. Leroueil et R. Martel, ed., *Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference*, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, ISBN 0-920505-29-5, Session 1B, p. 25-32.

Nastev, M., Lamontagne, C., Morin, R., Tremblay, T., Hardy, F., Lamothe, M., Croteau, A., Blanchette, D., Lavigne, M.-A., Roy, N., Lavoie, D., Benoît, N., Lefebvre, R., Marcotte, D., Gaudin, R., Rouleau, A., 2004b. Hydrogeology of the transboundary aquifers in the Châteauguay River basin, Canada-United States. 2004 U.S. EPA / NGWA Fractured Rock Conference, Portland, Maine, Sept. 13-15, 2004, *Proceedings* (CD version), p. 483-486.

Nastev, M., Savard, M.M., Lapcevic, P., Lefebvre, R., Martel, R., 2004c. Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, v. 12, p. 257-269.

Nastev, M., Rivera, A., Lefebvre, R., Martel, R., Savard, M.M., 2005. Numerical simulation of groundwater flow in regional rock aquifers, southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, v. 13(5-6), p. 835-848.

Nastev, M., Lefebvre, R., Rivera, A., Martel, R., 2006. Quantitative assessment of regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada. *Water Resources Management*, v. 20(1), p. 1-18.

Nastev, M., Morin, R., Godin, R., Rouleau, A., 2008. Developing conceptual hydrogeological model for Potsdam sandstones in southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, v.16, p. 373-388.

Ouellet, M., Lamontagne, C., Labbé, J.-Y., 2011. Le programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec et ses retombées. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 7 p.

Palmer, S., Campeau, S., Cloutier, V., Daigneault, R., Larocque, M., Lefebvre, R., Lemieux, JM., Molson, J., Rivard, C., Rouleau, A., Therrien, R., 2011. Collaborative approaches to groundwater knowledge acquisition in Quebec: Inter-regional characterization. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 6 p.

Paradis, D., 2000. Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire de maîtrise, INRS-Géoressources, Québec, Canada, Septembre 2000, 242 p.

Paradis, D., Martel, R., Michaud, Y., Lefebvre, R., Beaudoin, F., 1998. Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf: détermination des périmètres de protection en milieu granulaire. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3664-e, planche cartographique.

Paradis, D., Martel, R., Michaud, Y., Lefebvre, R., 2000. Étude comparative des méthodes de détermination des périmètres de protection en milieu granulaire: Exemples du piémont laurentien. *Proceedings, 1st Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Oct. 15-18, 2000, Montreal, Canada, p. 403-410.

Paradis, D., Savard, M.M., Nastev, M., Lefebvre, R., éditeurs, 2002. Atlas hydrogéologique du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec. Partie III des livrables, Commission Géologique du Canada, remis le 15 mai 2002 au Conseil de développement des Laurentides et aux MRC d'Argenteuil, Deux-Montagnes, Mirabel et Thérèse-de-Blainville, et à Développement économique du Canada, 48 p.

Paradis, D., Martel, R., Karanta, G., Lefebvre, R., Michaud, Y., Therrien, R., Nastev, M., 2007. Comparative study of methods for wellhead protection area delineation. *Ground Water*, v. 45(2), p. 158-167.

Paré, D., 1980. Étude Hydrogéologique, bassin versant de l'Assomption. Programme de Connaissances Intégrées. Gouvernement du Québec, Ministère des ressources naturelles, Direction générale des Eaux. Rapport E.C.3, 79 p.

Parent, M., Michaud, Y., Boisvert, É., Bolduc, A., Fagnan, N., Fortier, R., Cloutier, M., Doiron, A., 1998. Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf: géologie et stratigraphie des formations superficielles. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3664-a, planche cartographique.

Parks, W. A., 1930. Le pétrole et le gaz dans la province de Québec, partie-b. Rapport annuel du service des mines de Québec pour l'année 1929 sur le pétrole et le gaz dans la province de Québec. SIGPEG, rapport 1930TC000-02, 154 p.

Parks, W. A., 1931. Gaz naturel dans la vallée du St-Laurent, Québec, Canada. Rapport annuel du service des mines de Québec pour l'années 1930: Gaz naturel dans la vallée du Saint-Laurent, Québec. / Environs du lac Alymer, cantons de l'Est. / Gisements d'amiante dans le Sud de Québec. / Région de la carte de Lesseps, péninsule de Gaspé. SIGPEG, rapport 1931TA000-01, 113 p.

Pugin, A.J.-M., Pullan, S.E., 2011. Seismic reflection surveying in regional hydrogeology: An example from the Montérégie region, Quebec. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 6 p.

Ravonjarivelo, R., Larocque, M., 2011. Simulation des interactions aquifère-tourbière dans deux régions du Québec (Abitibi et Centre-du-Québec). *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, 7 p.

Reichenbach, I., 1993. Black shale as an environmental hazard : a review of black shales in Canada. Geological Survey of Canada, Open File 2697, 71 p.

Rivard, C., Ballard, J.M., Beaudry, C., Mallet, X., Vigneault, H., Carrier, M.A., Gosselin, J.S., Laurencelle, M., Benoît, N., Beaudin, I., Bleser, J., Boivin, R., Gloaguen, E., Parent, M., Pugin, A., Pullan, S., Bellefleur, G., Michaud, A., Laurence-Ouellet, C., Lefebvre, R., 2011. Rapport d'étape de la phase II. Projet d'acquisition des connaissances en Montérégie Est, Rapport de recherche R-1256, Rapport préliminaire soumis au MDDEP par l'INRS, la CGC, l'IRDA et l'OBV Yamaska, 31 mars 2011.

Rocher, M., Tremblay, A., Lavoie, D., Campeau, A., 2003. Brittle fault evolution of the Montréal area (St Lawrence Lowlands, Canada) : rift-related structural inheritance and tectonism approached by paleostress analysis. *Geological Magazine*, v. 140, p. 157-172.

Ross, M., 2004. Stratigraphie et architecture des formations quaternaire au nord-ouest de Montréal – Applications en hydrogéologie régionale. Thèse doctorale, INRS-ETE, Québec, Canada, Mai 2004.

Ross, M., Parent, M., Lefebvre, R., Martel, R., 2002. 3D geologic framework for regional hydrogeology and land-use management; a case study from southwestern Quebec, Canada. *Workshop on 3D Geological Models*, Denver, Colorado, Oct. 25, 4 p.

Ross, M., Martel, R., Lefebvre, R., Parent, M., Savard, M.M., 2003. The use of a 3D geologic framework model of surficial sediments to define bedrock aquifer vulnerability in the St. Lawrence Lowlands,

Quebec, Canada. *Proceedings of the 1st Int. Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk*, Salamanca, Mexique, 28-30 mai 2003, v. 1, p. 157-168.

Ross, M., Martel, R., Lefebvre, R., Parent, M., Savard, M.M., 2004a. Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology – A case study from the St. Lawrence lowlands. *Geofísica Internacional*, v. 43(4), p. 591-602, Special issue: Selected papers presented at the First International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk, AVR-03, Salamanca, Mexico, May 2003.

Ross, M., Martel, R., Parent, M., Lefebvre, R., Savard, M., 2004b. Assessing rock aquifer vulnerability using downward time-of-travel from a 3D model of surficial geology. In D. Demers, D. Leahy, R. Lefebvre, S. Leroueil et R. Martel, ed., *Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference*, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, ISBN 0-920505-29-5, Session 5A, p. 1-8.

Ross, M., Parent, M., Lefebvre, R., 2005. 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: A case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, v. 13(5-6), p. 690-707.

Ross, M., Parent, M., Benjumea, B., Hunter, J., 2006. The Late Quaternary stratigraphic record northwest of Montréal: regional ice sheet dynamics, ice stream activity and early deglacial events. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 43, p. 461-485.

Savard et al., sous presse. Regional hydrogeological characterization of the fractured aquifer system in southwestern Quebec. Geological Survey of Canada, Bulletin.

Savard, M.M., Nastev, M., Lefebvre, R., Martel, R., Fagnan, N., Bourque, E., Cloutier, V., Lauzière, K., Gélinas, P., Kirkwood, D., Lapcevic, P., Karanta, G., Hamel, A., Bolduc, A., Ross, M., Parent, M., Lemieux, J.-M., Boisvert, É., Salad Hersi, O., Lavoie, D., Girard, F., Novakowski, K., Therrien, R., Etienne, M., Fortier, R., 2000. Regional hydrogeology of fractured-rock aquifers of southwestern Quebec (St. Lawrence Lowlands). *Proceedings, 1st Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Oct. 15-18, 2000, Montreal, Canada, p. 247-253.

Savard, M.M., Nastev, M., Lefebvre, R., Paradis, D., Martel, R., éditeurs, 2002a. Hydrogéologie régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec. Partie I des livrables, Rapport final, Commission Géologique du Canada, remis le 15 mai 2002 au Conseil de développement des Laurentides et aux MRC d'Argenteuil, Deux-Montagnes, Mirabel et Thérèse-de-Blainville, 60 p.

Savard, M.M., Lefebvre, R., Nastev, M., Paradis, D., éditeurs, 2002b. Études locales de secteurs choisis du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec. Partie IV des livrables, Commission Géologique du Canada, remis le 15 mai 2002 au Conseil de développement des Laurentides et aux MRC d'Argenteuil, Deux-Montagnes, Mirabel et Thérèse-de-Blainville, 146 p. et annexes.

Savard, M.M., Lefebvre, R., éditeurs, 2002c. Base interactive de données hydrogéologiques du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec. Partie V des livrables, Commission Géologique du Canada,

remis le 15 mai 2002 au Conseil de développement des Laurentides et aux MRC d'Argenteuil, Deux-Montagnes, Mirabel et Thérèse-de-Blainville, 5 p. et CD-Rom.

Séjourné, S., Dietrich, J., Malo, M., 2003. Seismic characterization of the structural front of southern Quebec Appalachians. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 51, p. 29-44.

Séjourné, S., Malo, M., 2007. Pre-, syn- and post-imbrication deformation of carbonate slices along the southern Quebec Appalachian front – Implications for hydrocarbon exploration. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 44, p. 543-564.

SIGEOM, 2012. Système d'information géominière. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Voir site internet <http://sigeom.mrnf.gouv.qc.ca>

SIGPEG, 2010. Zone avec Potentiel de Gaz de Schiste dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Carte (pdf), série Compilation pétrolière et gazière, 1/500 000e. Voir site internet <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca>

SIGPEG, 2012. Système d'Information Géoscientifique Pétrolier et Gazier. Direction du bureau des hydrocarbures, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Voir site internet <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca>

SIH, 2012. Système d'information hydrogéologique. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Voir site internet <http://mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih>

Simard, G., 1970. Étude hydrogéologique du bassin de la rivière Eaton. Gouvernement du Québec, Ministère des richesses naturelles - Direction Générale des Mines. 28 p.

Simard, G., 1977. Isotopes naturels et systèmes d'écoulement de la rivière Eaton. Gouv. du Québec, Ministère des richesses naturelles - Direction générale des eaux. 87 p.

SOQUIP, 1984. Carte structurale du Trenton autochtone, marqueur bleu (feuille Montréal 31H, 1:50.000e). SIGEOM, rapport DP 84-31B.

St-Antoine, P., Héroux, Y., 1993. Genèse du gaz naturel de la région de Trois-Rivières, basses terres du Saint-Laurent, et de Saint-Flavien, Appalaches, Québec, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 30, p. 1881-1885.

St-Julien, P., Hubert, C., 1975. Evolution of the Taconian orogen in the Quebec Appalachians. *American Journal of Science*, v. 275A, p. 337-362.

Talisman Energy, 2006. Drilling and geological report for the Talisman Energy - Saint François du Lac No 1 well. SIGPEG, rapport 2006OA248-03, 48 p. Voir site internet <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca>

TechnoRem, 2008a-1. Cartographie hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des municipalités de Saint-Cyprien-De-Napierville, Hemmingford et Napierville – Montérégie, Rapport final, Projet CDAQ avec appui financier du PAEQ, N° de projet CDAQ : 5202, Référence : PR07-10, 1003 p.

TechnoRem, 2008a-2. Cartographie hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des bassins versants des Rivière Norton, Esturgeon, Saint-Pierre et de la Tortue– Montérégie, Rapport final, Projet CDAQ avec appui financier du PAEQ, No de projet CDAQ : 5074, Référence : PR06-50, 1006 p.

TechnoRem, 2008a-3. Cartographie hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des bassins versants des Rivière l'Acadie et de la Tortue– Montérégie, Rapport final, Projet CDAQ avec appui financier du PAEQ, No de projet CDAQ : 5073, Référence : PR06-49, 1009 p.

TechnoRem, 2008b. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des MRC Maskoutains, Rouville et Brome-Missisquoi – Montérégie Est. Rapport final, Projet CDAQ avec appui financier du PAEQ, 339 p.

Thériault, R., 2008. Caractérisation géochimique et minéralogique des shales de l'Utica et du Lorraine, Basses-Terres du Saint-Laurent – Base de données. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, SIGEOM, rapport 2008-EG-01, 185 p.

Thériault, R., 2012a. Caractérisation du Shale d'Utica et du Groupe de Lorraine, Basses-Terres du Saint-Laurent - Partie 2 : Interprétation géologique. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, SIGEOM, DV 2012-04. Sous presse.

Thériault, R., 2012b. Caractérisation du Shale d'Utica et du Groupe de Lorraine, Basses-Terres du Saint-Laurent - Partie 1 : Compilation des données. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, SIGEOM, DV 2012-03, 212 p. Sous presse.

Tran Ngoc, T. D., Konstantinovskaya, E., Lefebvre, R., Malo, M., 2011. Characterization of deep saline aquifers for CO2 storage capacity assessment, Bécancour area, Québec, Canada. AGU Fall Meeting 2011. San Francisco, 5 au 9 décembre 2011.

Tremblay, T., 2006. Hydrostratigraphie et géologie du Quaternaire dans le bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Canada.

Tremblay, T., Lamothe, M., 2005. Géologie des formations superficielles du bassin versant de la rivière Châteauguay. Feuilles topographiques 31H/04, 31H/05 et 31G/01, Québec: Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 34 p.

Tremblay, T., Hunter, J., Lamontagne, C., Nastev, M., 2010a. High resolution seismic survey in a contaminated esker area, Chateauguay River Watershed, Quebec: *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 417-432.

Tremblay, T., Nastev, M., Lamothe, M., 2010b. Grid-based hydrostratigraphic 3D modelling of the Quaternary sequence in the Chateauguay River Watershed, Quebec. *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 377-398.

Tremblay, L., Larocque, M., Gagné, S., 2011. Regional groundwater assessment of the lower Bécancour area (Québec, Canada). *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City,

Canada, August 28-31, 2011, 5 p. Williams, J.H., Reynolds, R.J., Franzi, D.A., Romanowicz, E.A., Paillet, F.L., 2010. Hydrogeology of the Potsdam Sandstone in northern New York. *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 399-416.

Trempe, R., 1978. Précisions nécessaires sur la lithologie, la stratigraphie et la sédimentologie de la formation d'Utica dans les Basses Terres du St-Laurent - novembre 1978 - rapport #9736. SIGPEG, rapport 1978TA000-07, 17 p. Voir site internet <http://sigpeg.mrnf.gouv.qc.ca>

UPA et TechnoRem, 2009. Cartographie hydrogéologique régionale de la zone de production maraîchère des MRC de Joliette et D'Autray, Rapport final, No de projet CDAQ : 5440, Référence : PR08-74, 310 p.

Wallach, J., Chagnon, J.-Y., 1990. The occurrence of pop-ups in the Québec City area. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 27, p. 698-701.

Williams, J.H., Reynolds, R. J., Franzi, D.A., Romanowicz, E.A., Paillet, F.L., 2010. Hydrogeology of the Potsdam Sandstone in Northern New York. *Canadian Water Resources Journal*, v. 35(4), p. 399-416.